

CAHIER DE RECHERCHE N° 15

**Apprentissage de la diversité et compétition entre options technologiques pour
la production d'électricité photovoltaïque**

Philippe MENANTEAU

Mai 1998

Apprentissage de la diversité et compétition entre options technologiques pour la production d'électricité photovoltaïque

**Ph. Menanteau
Mai 1998**

Introduction

Les cellules photovoltaïques (PV) ouvrent la possibilité de produire de l'électricité directement à partir du rayonnement solaire, sans nécessiter ni pièces mobiles, ni production de chaleur et sans entraîner de pollution atmosphérique, locale ou globale. L'évolution technologique a été importante depuis les premières photopiles qui, en raison de leur coût très élevé et de leur faible rendement, étaient principalement destinées à des applications très spécifiques telles que l'alimentation énergétique des satellites. Les programmes de R&D, publics ou privés, initiés dans de nombreux pays à la suite des chocs pétroliers pour améliorer la productivité des cellules et diminuer leur coût, ont permis une progression sensible des performances ; le prix moyen des cellules qui dépassait 100 \$/Wc au début des années 1970, a ainsi été ramené autour de 5 \$/Wc à la fin des années 1980. La production industrielle qui était limitée à quelques dizaines de kWc au début des années 1970, a été multipliée par un facteur mille en l'espace d'une dizaine d'années pour atteindre 10 MWc en 1982, puis 100 MWc en 1997.

La diffusion des cellules PV s'étend aujourd'hui au delà des marchés niches initiaux sur des applications spécifiques, en particulier, les télécommunications dans les pays industrialisés ou l'électrification des populations rurales isolées, dans les pays en développement. Si des applications nécessitent des mécanismes d'incitation appropriés, le PV représente d'ores et déjà, la technologie de référence sur certains segments de marché. La possibilité pour l'énergie PV de figurer un jour parmi les technologies de production d'électricité et de contribuer significativement à l'approvisionnement énergétique reste toutefois encore incertaine.

L'intermittence et la faible concentration de la ressource constituent des contraintes techniques fortes pour une intégration au système électrique. Mais surtout, la progression des performances est encore insuffisante pour assurer la compétitivité du PV avec les technologies existantes de production d'électricité. Pour pénétrer sur le créneau des applications raccordées au réseau, la dynamique de progression des rendements et de décroissance des coûts doit se poursuivre. Or, il n'est pas certain que les marges de progression résiduelles sur la trajectoire technologique aujourd'hui dominante soient compatibles avec la nécessaire réduction du coût de l'électricité PV.

Plusieurs technologies sont en compétition pour la production de cellules PV, mais le silicium cristallin est la technologie dominante. Sa proximité technologique avec l'industrie des composants électroniques lui a permis de s'imposer rapidement en profitant de la base de connaissance acquise par cette dernière, puis du processus d'apprentissage occasionné par l'élargissement de la diffusion du PV. Aujourd'hui le silicium cristallin est la technologie qui présente les meilleures performances mais elle dépend de procédés industriels mal

adaptés à la production à grande échelle et à faibles coûts, indispensables pour pénétrer sur les marchés énergétiques.

Face à la position dominante du silicium cristallin, d'autres technologies PV tentent d'émerger. Les technologies dites "en couches minces" (CIS, CdTe, notamment) sont potentiellement les plus prometteuses, malgré des rendements théoriques inférieurs, en raison des perspectives importantes de baisse de coûts qu'elles offrent par l'automatisation des procédés de production. Leur émergence est cependant rendue difficile par la position dominante du silicium cristallin qui bénéficie des rétroactions positives liées à sa grande diffusion, alors qu'à l'inverse les nouvelles technologies ne peuvent profiter pleinement des effets d'apprentissage (R. Kemp, 1994).

Le développement actuel de l'industrie PV se trouve ainsi partiellement contraint par cette situation de quasi "lock-in" au profit du silicium cristallin, en raison de la proximité initiale avec l'industrie de l'électronique et de l'effet des rendements croissants d'adoption (B. Arthur, 1988, 1989). Si cette trajectoire est effectivement sous-optimale au plan économique, la question essentielle pour l'industrie PV concerne la possibilité de sélectionner et de faire émerger rapidement un nouveau standard technologique sur lequel concentrer processus d'apprentissage et rétroactions positives (Foray, 1994, 1996). A cette condition la diffusion de la technologie PV pourrait continuer à s'élargir au delà de ses applications spécifiques et éventuellement concurrencer les technologies existantes de production d'électricité.

1. les photopiles au silicium cristallin : une forte dépendance au sentier

La découverte de l'effet PV est attribuée à Becquerel, au début du 19ème siècle (1839). Ce principe scientifique sera concrètement mis en application un siècle plus tard avec la réalisation de la première photopile solaire par Bell Telephone Laboratories en 1954 aux Etats Unis.

A l'origine, les débouchés envisagés concernent la production d'électricité en site isolé (systèmes de télécommunication, alimentation des nouvelles radios à transistors, et applications militaires - W.H. Bloss et al., 1993), mais ce sont les applications spatiales qui constitueront les premiers marchés de l'énergie PV avec, quelques années plus tard, le lancement des premiers satellites de télécommunication.

Les cellules au silicium cristallin qui utilisent la même technologie de base, profitent de la croissance rapide des connaissances qu'entraîne le développement de l'industrie des composants électroniques. Leurs performances s'améliorent rapidement ; les rendements des premières cellules destinées aux applications terrestres qui étaient voisins de 10 à 12% atteignent 19% puis 25% en laboratoire au milieu des années 1980. De même, les coûts décroissent rapidement et imposent la technologie du silicium cristallin comme technologie de référence.

1.1. La filière dominante

A condition de subir un traitement approprié, différents matériaux semi-conducteurs (Silicium (Si) sous forme cristalline ou amorphe, Arséniure de Gallium (GaAs), Tellure de Cadmium (CdTe), Diséléniure de Cuivre et Indium, etc.) sont susceptibles de produire un

courant électrique lorsqu'ils sont soumis à un rayonnement lumineux. La quasi totalité de la production industrielle actuelle de photopiles solaires utilise le silicium sous forme mono- ou multi-cristalline et, dans une moindre mesure, le silicium amorphe (cf. tableau 1). Les autres filières (CdTe, Si en ruban ou en couches minces, CIS, etc.) progressent de façon régulière mais leur diffusion reste encore confidentielle et la production limitée à des pilotes industriels ou des laboratoires de recherche.

Tableau 1: Production mondiale par technologie (en pourcentage)

Technologie	1991	1994	1997
Silicium amorphe	25	16	12
Silicium monocristallin	35	52	
Silicium multicristallin	38	29	
Autres ¹	2	3	5
Total	100	100	100
TOTAL (MWc)	55,4	69,44	105,8

Source : Systèmes Solaires, 1995, 1998

En 1980, le silicium monocristallin représentait 90% de la production commerciale de photopiles, mais son importance relative a progressivement diminué au profit du silicium multicristallin. Ces deux filières utilisent la même matière première et s'appuient sur des procédés de fabrication comparables. Aujourd'hui, leurs parts de marché sont comparables et elles représentent, ensemble, 80% des ventes de photopiles en 1995.

La dernière filière, le silicium amorphe relève d'une technologie fondamentalement différente, dite des "couches minces". Mais, en raison de problèmes techniques, son utilisation est restée limitée à certains segments de marché dont l'importance relative a diminué ces dernières années. Le silicium amorphe n'occupe plus que 10% de parts de marché en 1997 contre 30% dix ans auparavant.

Du fait de sa proximité technologique avec l'industrie des composants électroniques, le silicium cristallin s'est imposé pour la production de photopiles solaires. L'existence d'une base de connaissance commune, la disponibilité de matière première (cf. infra) et l'expérience acquise dans l'industrie électronique ont contribué à le placer en position dominante. Cette proximité a, dans un premier temps, constitué un atout considérable en permettant à l'industrie PV de bénéficier des avancées rapides obtenues dans l'électronique.

1.2 Le procédé de production de base : le silicium monocristallin

La croissance extrêmement rapide de l'industrie électronique au cours des vingt dernières années a nécessité des quantités de plus en plus importantes de silicium d'une extrême pureté. Une partie de ce silicium n'est pas utilisée parce qu'elle ne présente pas une qualité suffisante pour les applications électroniques. Elle constitue la matière première essentielle

¹ Tellure de Cadmium (CdTe), ruban de Si, concentration, film mince de Si.

de l'industrie PV, ce qui représente à peu près 10% de la consommation de l'industrie électronique².

La première étape de fabrication des photopiles mono-cristallines consiste à produire un lingot de silicium présentant de bonnes qualités cristallographiques. Il s'agit d'un lingot cylindrique de 10 à 12 cm d'épaisseur obtenu à partir de silicium liquide préalablement purifié (à partir des rebuts de l'industrie électronique). La vitesse de tirage est volontairement limitée pour permettre une cristallisation optimale : une dizaine d'heures sont ainsi nécessaires à la préparation d'un lingot d'une longueur moyenne d'un mètre.

Le lingot est ensuite découpé en plaques d'une épaisseur de l'ordre de 3-400 μm qui constitueront les cellules PV. Cette opération est à la fois longue et très intensive en matière puisque l'épaisseur de coupe des scies à lame entraîne la perte de la moitié du matériau initial. Les plaquettes obtenues subissent différents traitements (décapage, dopage, etc.) avant le dépôt final des contacts et l'adjonction d'une couche antireflet. Dans la phase finale, les photopiles sont interconnectées pour produire la tension requise et encapsulées dans un module destiné à assurer leur protection.

Ces opérations sont réalisées de façon discontinue, en ateliers successifs (fours de cristallisation, découpe, traitement de surface, sérigraphie, encapsulation) qui imposent des manipulations importantes et délicates. Jusqu'au début des années 1990, les équipements utilisés dans ces unités de production avaient une capacité maximale de l'ordre du mégawatt adaptée à un marché mondial de 10-20 MW.

Les cellules mono-cristallines ainsi obtenues présentent des rendements élevés et une bonne stabilité dans le temps, indispensable aux utilisations spatiales³ pour lesquelles elles ont été conçues à l'origine, mais des coûts de fabrication élevés.

1.3 Des améliorations sur le procédé de production pour réduire les coûts de fabrication

Diverses améliorations incrémentales ont été apportées au procédé décrit ci-dessus pour tenter d'en limiter le coût. Le coulage d'un silicium multicristallin a été développé comme alternative à la méthode de croissance des cylindres monocristallins, lente et coûteuse. L'avantage du moulage provient de la forme carrée ou rectangulaire du lingot, donc des cellules, qui autorise un meilleur taux de remplissage des modules. D'autre part, ce procédé offre une meilleure tolérance aux impuretés. Il est moins complexe à maîtriser, donc moins coûteux, que le tirage de lingots monocristallins ; la diminution du coût de production du matériau PV qui en résulte est dans un rapport de 1 à 2 (35 \$/kg pour le silicium multicristallin contre 66 \$/kg pour le monocristallin).

Les répercussions sur le coût des photopiles n'ont toutefois pas entraîné les réductions de coût anticipées en raison de la baisse du rendement de la photopile qui résulte de l'utilisation du silicium multicristallin⁴. En même temps, les surcapacités de production dans l'industrie

² En 1995, la production mondiale de photopiles (80 MWc) a absorbé près de 1500 tonnes de silicium de qualité électronique pour une production mondiale totale de 14 000 tonnes (A. Ricaud, 1997).

³ Le ratio puissance sur poids est déterminant pour les applications spatiales, beaucoup plus que le coût.

⁴ Les rendements des cellules obtenues avec le silicium multicristallin sont de 1 à 2 points inférieurs à ceux des cellules monocristallines.

électronique permettant la mise sur le marché de silicium monocristallin à faible coût, l'écart de coût avec les photopiles monocristallines est resté faible (W.H. Bloss et al., 1993).

L'autre innovation technologique importante introduite sur le procédé initial a concerné la diminution des pertes de matière dans l'étape de sciage. Les scies traditionnelles développées pour l'industrie électronique présentaient, en effet, plusieurs limitations importantes dont la perte du trait de scie, ainsi qu'une faible vitesse de coupe, un nombre limité de plaquette par centimètre de lingot et des défauts de surface sur les plaquettes. L'introduction de la scie à fil a permis d'améliorer considérablement la productivité du sciage et constitué probablement la "percée technologique" des années 1980 (A. Ricaud, 1997). Avec cette technologie, il est devenu possible de produire 24 plaquettes par centimètre de lingot au lieu de 16 avec la scie traditionnelle et de produire deux millions de plaquettes par an et par machine au lieu de 100 000 auparavant.

Simultanément, d'autres procédés ont été modifiés ; le dépôt des contacts par sérigraphie a ainsi remplacé l'évaporation sous vide trop coûteuse pour une production à grande échelle. L'épaisseur des cellules a été progressivement diminuée, dans les limites imposées par les contraintes de manutention, de façon à augmenter le nombre d'unités produites par lingot.

L'organisation de la production a aussi été modifiée pour en réduire la complexité et limiter le nombre d'opérateurs. Au cours des dix dernières années, l'apprentissage par la pratique⁵ a ainsi entraîné une simplification des procédés industriels de fabrication. Pour un même volume de production de 1 MW/an et par équipe, 10 opérateurs et 9 étapes différentes sont aujourd'hui nécessaires lorsqu'il fallait auparavant 30 opérateurs et 15 étapes différentes (A. Ricaud, 1997).

1.4 Progression des performances et diminution des coûts des photopiles

Parallèlement à l'évolution des procédés de production, dans un cadre qui reste déterminé par leur filiation avec ceux de l'industrie de l'électronique, des perfectionnements ont été apportés aux cellules elles-mêmes qui se sont traduits par une croissance régulière de leurs performances. Ces améliorations ont notamment porté sur la texturation des surfaces pour limiter la réflexion en face avant, la réduction des défauts de cristallisation, l'optimisation des surfaces des collecteurs d'électron, les couches antireflet, etc.

Conséquence de ces diverses améliorations, les performances techniques ont sensiblement augmenté en vingt ans : le rendement moyen des modules qui était de l'ordre de 7-8 % à la fin des années 1970 atteint aujourd'hui 13 à 14% en production industrielle (EPIA, 1996). Des rendements encore plus élevés ont été obtenus en laboratoire, indiquant que de nouvelles marges de progression existent : 17% sur des cellules multicristallines de petite

⁵ La théorie du changement technique distingue plusieurs formes d'apprentissage technologique :

- l'apprentissage par l'expérience ou la pratique ("learning by doing") qui concerne essentiellement les compétences acquises au cours du processus de production et se traduit par des améliorations apportées aux procédés de production produisant une réduction progressive des coûts (Arrow K, 1962);
- l'apprentissage par l'usage ("learning by using") qui se construit à partir de l'expérience acquise non dans la production mais dans l'utilisation des produits et entraîne une adaptation de ces derniers (Rosenberg, 1982 ; Von Hippel, 1988).

Sans négliger l'importance de l'apprentissage résultant de l'interaction entre concepteurs et utilisateurs de systèmes PV, nous nous intéresserons ici exclusivement à l'apprentissage par la pratique. Cet apprentissage se manifeste au sein des firmes et conduit à une amélioration des performances des photopiles ainsi qu'à une modification des procédés de production.

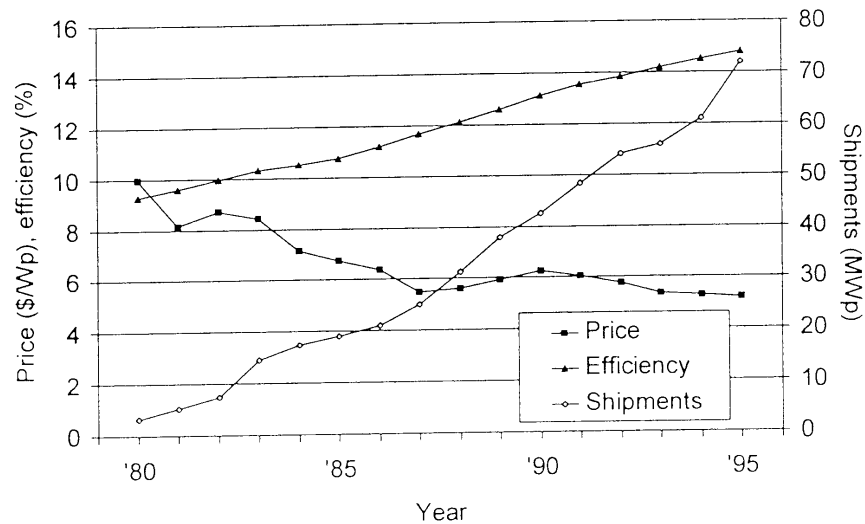
taille et plus de 20% sur des cellules monocristallines en recourant aux meilleurs procédés aujourd'hui disponibles. La plupart de ces procédés restent extrêmement coûteux et ne peuvent être mis en œuvre dans des conditions industrielles, mais des rendements de cellules de l'ordre de 18% (16% pour les modules) seront certainement atteints prochainement à un coût compétitif (M. Rodot, 1995).

Parallèlement, l'extension du marché mondial du PV a incité les industriels à tenter de mobiliser les effets d'échelle en accroissant leurs capacités de production. Cette évolution n'a cependant pas produit les effets escomptés en raison d'une progression insuffisante des capacités et de l'absence de transformation radicale des procédés. Résultat, les coûts ont diminué dans des proportions importantes depuis les premières applications terrestres⁶ pour atteindre aujourd'hui 3-4 \$/Wc (EPIA, 1996), mais ils restent sensiblement supérieurs aux objectifs fixés à la fin des années 1970 : 4,0 \$/Wc en 1983 et moins de 0,5 \$/Wc au début des années 1990 (cité par A. Nicolon et J.C. Hourcade, 1987).

1.5 Dépendance au sentier et poursuite du processus d'apprentissage

La tendance à la baisse des coûts observée depuis la fin des années 1970, s'est fortement ralentie depuis dix ans et ce malgré une poursuite de la croissance des ventes au plan mondial (Fig. 1). Cette stagnation est en contradiction avec la relation que l'on peut habituellement observer dans un grand nombre de secteurs industriels, entre décroissance des coûts unitaires et expérience accumulée dans la production, matérialisée par les "courbes d'expérience" (Neij, 1997 - Ayres et Martinas, 1992).

Fig. 1 : Modules photovoltaïques : ventes, prix moyen et rendement des modules - période 1980-95



Source : M. Grubb, 1997

Les "courbes d'expérience" montrent une relation étroite entre le coût de production unitaire d'un bien et la production industrielle cumulée de ce même bien considérée comme une approximation de l'expérience acquise par la firme. Le cas général montre une décroissance régulière du coût unitaire de la technologie en fonction de la production

⁶ Au début de années 1970, le coût des photopiles pour les applications terrestres est voisin de 300 \$/Wc (W.H. Bloss, et alii 1983).

cumulée, conséquence des effets d'apprentissage dans la production (innovation dans les procédés de fabrication), de l'amélioration de la productivité du travail, de la standardisation des produits, des effets d'échelle en production, etc.

Dans certains cas, la pente de la courbe d'expérience présente une nette discontinuité que l'on peut interpréter comme une modification du rythme de progrès technique en fonction du cycle de vie de la technologie (Utterback et Abernathy, 1975). Dans une première phase, les efforts de R&D se concentrent sur la conception et les performances de la nouvelle technologie, et entraînent une décroissance relativement lente des coûts. La baisse des coûts tend à s'accélérer lorsque la technologie entre dans sa phase de croissance, à mesure que la concurrence se déplace des performances vers les prix et oriente les efforts de R&D vers les procédés de production (Ayres et Martinas, 1992). Elle peut ensuite se ralentir à nouveau lorsque les marges de progression liées à la standardisation se réduisent.

En ce qui concerne le PV, le ralentissement de la décroissance des prix intervient alors que le cycle de vie de la technologie n'a pas encore atteint la maturité. A ce stade, l'accroissement de la production industrielle et les effets d'échelle, l'automatisation des procédés, l'apprentissage par la pratique, devraient au contraire se traduire par une accélération de la pente de la courbe d'apprentissage. Ce ralentissement de la décroissance des prix ne correspond pas nécessairement à une évolution parallèle des coûts de production, l'infléchissement dans la baisse des prix s'expliquant alors de façon purement conjoncturelle⁷ par une modification de la pression concurrentielle. Mais cet infléchissement peut aussi être interprété comme le signe d'un épuisement des effets d'apprentissage, ici entendu au sens large comme l'ensemble des facteurs concourant à la diminution des coûts d'une technologie, sur la trajectoire du silicium cristallin en raison des limitations imposées par les procédés de fabrication utilisés.

En dépit d'une croissance importante de la production depuis 20 ans, les procédés utilisés restent en effet très proches de ceux développés initialement pour la production des cellules spatiales, à partir de procédés développés dans l'industrie électronique. L'intensité des recherches engagées par l'industrie électronique et la progression générale des connaissances sur les propriétés du silicium a déterminé l'intérêt de l'industrie PV pour le silicium. L'industrie PV a pu bénéficier des processus d'apprentissage déjà engagés dans l'industrie électronique. Une partie des procédés de fabrication expérimentés dans l'électronique ont ainsi pu être transférés vers le PV sans nécessiter un nouvel apprentissage. Finalement, la disponibilité de sous-produits de la fabrication des composants électroniques a conforté le choix initial en faveur du silicium cristallin sans que cette filiation entraîne de forte contrainte⁸ tant que le PV est resté limité à certaines niches de marché.

La contrainte apparaît plus forte aujourd'hui en raison de l'incapacité des procédés de production hérités de l'industrie électronique à accompagner l'évolution du PV vers la production industrielle de masse. Fondamentalement, ces procédés sont plus adaptés à la production de quantités limitées de photopiles présentant des rendements élevés et une

⁷ La baisse des prix au plan mondial a pu être un temps trop rapide en raison d'une situation transitoire de surcapacité industrielle et se ralentir ensuite pour permettre un rattrapage des coûts de production.

⁸ Le différentiel de croissance entre le PV et l'électronique avait suscité des craintes sur la possibilité de continuer à utiliser les rebus de la production de composants électroniques. Pour l'instant aucune contrainte d'approvisionnement n'est réellement perceptible même si à terme une émancipation de l'industrie PV est nécessaire en recourant à la fabrication d'un silicium de "qualité solaire".

qualité irréprochable. Le rendement, la qualité de fabrication et la durée de vie étaient les critères déterminants pour les photopiles destinées aux applications spatiales. En revanche, le coût des cellules restait un critère secondaire, compte tenu de leur faible poids relatif dans le coût total de construction et de lancement d'un satellite. Ainsi, l'organisation de la production en atelier, à l'image des laboratoires de recherche qui ont produit les premières cellules PV, a permis d'assurer une production de grande qualité, mais constitue une contrainte lorsque la minimisation des coûts et la baisse des prix deviennent un déterminant de la dynamique de diffusion.

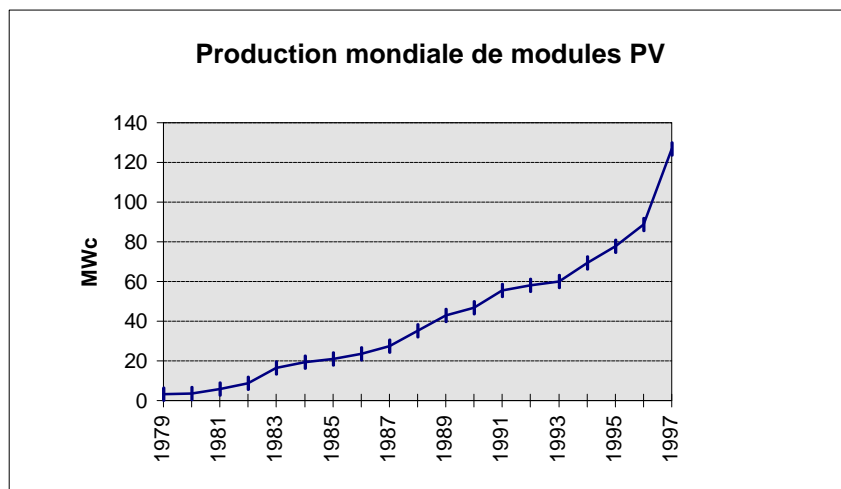
2. Diffusion de la technologie PV : des marchés niches initiaux aux applications énergétiques

L'élargissement progressif des marchés du PV s'est accompagné d'un processus d'apprentissage graduel qui a entraîné une progression continue des performances et une réduction considérable des coûts des photopiles. Cette évolution des performances économiques a permis aux photopiles d'étendre leur champ d'application bien au delà des premières niches de marché. La progression des performances est toutefois encore insuffisante pour permettre au PV de concurrencer les technologies classiques de production d'électricité, sauf lorsque celles-ci se trouvent à la limite de leur domaine de compétitivité (Willinger et Zuscovitch 1993).

2.1 Les principaux domaines d'application

La production mondiale de modules PV atteint 127 MWc en 1997 contre à peine 5 MWc en 1982, soit une croissance annuelle moyenne de 17% sur les dix dernières années. Malgré cette croissance, les ventes cumulées restent très faibles à l'échelle du secteur énergétique ; la capacité totale installée dans le monde en 1994 était estimée à 350 MWc en éliminant l'ensemble des applications non-énergétiques (loisirs, applications intérieures, etc. - cf. infra).

Fig. 2 : Production mondiale de modules PV



Source : PV News

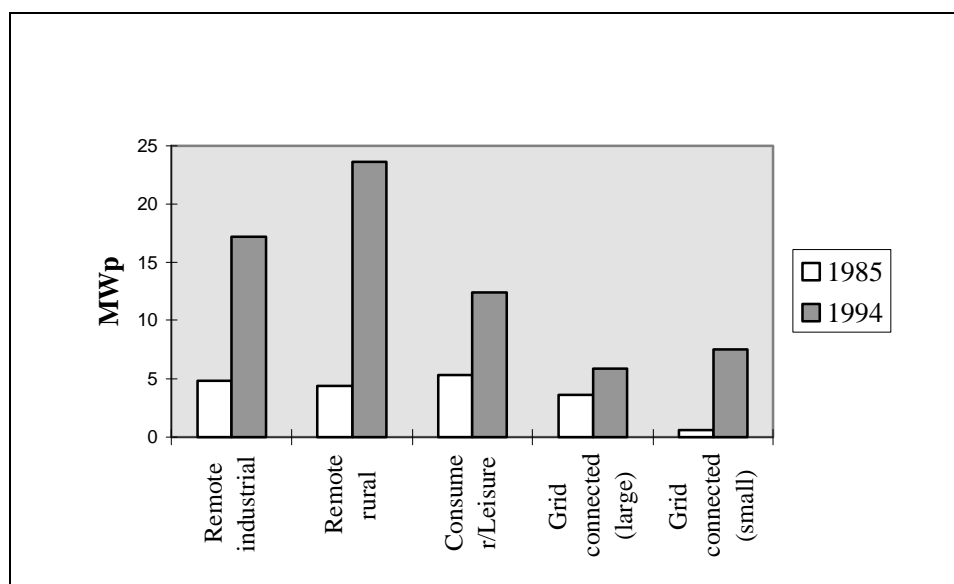
Les utilisations spatiales du PV étant aujourd'hui marginales avec moins de 5% de la demande totale, on retient classiquement quatre grandes catégories d'usage de l'énergie PV⁹ :

- les applications "professionnelles" concernent l'alimentation électrique d'équipements isolés ou difficilement accessibles tels que les stations météo, les relais de télévision, la protection cathodique des pipelines, les usages militaires, la signalisation sur les autoroutes, etc.;
- les systèmes isolés à usage domestique ou collectif sont utilisés pour l'alimentation électrique de constructions non raccordées au réseau (refuges de montagne, par exemple ou habitations isolées), pour les pays industrialisés, et pour l'électrification rurale, dans les pays en développement, pour l'alimentation de systèmes d'éclairage, de communication, ou de pompage;
- la catégorie des systèmes raccordés au réseau recouvre aussi bien les centrales PV de "grande" puissance (au delà de 1 MWc) que les installations de plus petite taille (quelques kWc) intégrés dans la construction, type "toits solaires";
- enfin, il convient d'ajouter les applications de loisir ou d'intérieur qui recouvrent les modules installés notamment sur les bateaux, les chargeurs de batteries, les lampes de jardin, etc., et les applications en substitution des batteries pour l'alimentation des montres, des calculettes ou des ordinateurs, par exemple. Ces applications de faible ou très puissance ne sont pas à proprement parler des applications énergétiques mais elles constituent des débouchés importants de la production PV, en particulier pour le silicium amorphe;

La répartition des puissances installées par pays est mal connue. En ce qui concerne les applications "énergétiques", il est clair que les pays industrialisés sont pour l'instant les seuls concernés par les installations PV raccordées au réseau, avec une nette prédominance pour les Etats Unis et l'Europe. En revanche, la répartition par grandes régions est plus équilibrée pour les installations isolées (électrification villageoise ou domestique, pompage, usages professionnels, etc.) et fait apparaître un poids plus important des pays en développement.

On notera enfin que le segment des applications de loisir est dominé par le silicium amorphe, dont le médiocre rendement est compensé, sur ces applications nécessitant de faibles quantités d'énergie, par l'avantage d'un faible coût de production. Peu significatives sur le plan énergétique, ces applications ont joué un rôle important dans la stratégie de développement de la filière PV au Japon (Nicolon et Hourcade, 1987) en créant un marché niche pour cette technologie. Malheureusement, l'utilisation exclusive des premières applications en lumière artificielle a longtemps dissimulé une limitation majeure de cette technologie que la recherche n'a pas encore permis de contourner. La baisse de rendement du silicium amorphe en lumière naturelle est aujourd'hui une des raisons de son recul relatif dans les ventes mondiales (cf. Tableau 1).

⁹ Les utilisations spatiales du PV sont aujourd'hui marginales (moins de 5% de la demande totale). Elles ne seront pas évoquées ici car il ne s'agit pas d'un marché "énergétique" et la diminution des coûts n'est pas la préoccupation essentielle ce qui peut déterminer des trajectoires technologiques différentes des applications terrestres.

Fig. 3 : Ventes mondiales de modules PV par applications

Source : EPIA, 1996

2.2 Les effets d'entrainement de marchés niches bien établis et solvables

En 1994, les télécommunications restent le marché le plus important (12,6 MW) suivi par les systèmes individuels pour l'électrification domestique dans les pays en développement (10,1 MW). L'importance relative des applications reliées au réseau apparaît forte en 1994 mais elle est moins marquée sur la moyenne des années 1990. Les applications "hors-réseau" demeurent donc très nettement majoritaires, avec un maintien de la dynamique antérieure sur les applications professionnelles et une très forte croissance pour le rural isolé, en particulier dans les pays en développement.

Le marché des applications "professionnelles" a joué dès l'origine un rôle essentiel pour le développement des applications terrestres des photopiles. Pour ces équipements isolés, l'autonomie et la fiabilité de la fourniture priment, comme pour les applications spatiales, sur le coût de l'électricité produite. En l'absence de réseau électrique, les alternatives sont par ailleurs extrêmement coûteuses et le PV s'y est rapidement imposé comme une technologie de référence. L'importance relative des ventes réalisées sur ce segment et l'absence des fluctuations qu'ont connu les marchés subventionnés, confèrent incontestablement aux applications professionnelles une importance particulière parmi les différents marchés niches.

Ces marchés niches revêtent une importance particulière parce qu'ils contribuent à démontrer la maturité de la technologie et permettent à l'industrie PV de consolider son expérience en production et de bénéficier d'effets d'échelle. Mais le niveau de performances que doivent atteindre les cellules PV sur les marchés énergétiques est d'un ordre de grandeur supérieur pour les applications isolées et a fortiori pour les systèmes raccordés au réseau.

2.3 Le créneau majeur de la production d'électricité : des systèmes isolés aux applications raccordées au réseau

Le développement des marchés des systèmes destinés aux applications isolées ou raccordés au réseau dépend étroitement de subventions allouées dans le cadre de programmes de soutien à la technologie ou d'aide au développement. A la différence des applications professionnelles qui constituent des marchés solvables, ils demeurent tributaires des variations des budgets publics. Néanmoins, la progression des performances est là aussi manifeste, et si la compétitivité économique est encore loin d'être acquise pour les systèmes raccordés au réseau, le PV est aujourd'hui reconnu comme une option technologique fiable pour l'électrification rurale décentralisée dans les pays en développement.

- **Une émergence à la frontière du paradigme: l'électrification rurale décentralisée**

Mises à part quelques tentatives, finalement peu convaincantes, pour développer des centrales solaires visant à remplacer les groupes électrogènes diesel dans les villages africains, le pompage de l'eau a été la première application réellement importante du PV dans les pays en développement. Progressivement, de nouvelles applications sont apparues et notamment des systèmes individuels destinés à l'alimentation en électricité de ménages isolés non raccordés au réseau électrique. Le pompage et l'électrification domestiques sont aujourd'hui les principales utilisations du PV dans les pays en développement et, selon certaines analyses, le segment de marché le plus porteur à l'horizon 2010 (EPIA, 1996).

Potentiellement, le marché de l'électrification rurale est considérable puisqu'on estime qu'entre un quart et un tiers de la population rurale des pays en développement n'est pas électrifiée. Compte tenu des contraintes budgétaires des compagnies d'électricité et de la faible rentabilité des extensions de lignes dans les zones rurales, seules des solutions d'électrification décentralisée sont envisageables pour un grand nombre de régions où la dynamique de consommation ne justifie pas un réseau.

En dépit de coûts encore élevés, qui peuvent atteindre ou dépasser 20\$/Wc, l'option PV¹⁰ constitue une alternative intéressante dans la mesure où elle fournit des kWh électriques ayant une très forte valeur d'usage (pour le pompage de l'eau, pour l'éclairage, pour la production de froid, etc.). La modularité des systèmes PV permet de satisfaire, dans des conditions économiques, des besoins souvent limités dans un premier temps, et d'évoluer lorsque la croissance de la demande le justifie. Enfin, l'option PV peut fonctionner en relative autonomie, dans des villages isolés où les compétences techniques sont nécessairement limitées, à condition qu'une structure de maintenance soit mise en place au plan régional ou national.

Ainsi, en raison de la qualité du service rendu par rapport aux alternatives classiques (groupes électrogènes diesel, batteries, piles, kérosène, ...), la diffusion des systèmes PV familiaux s'effectue sur une base commerciale privée dans plusieurs pays où les revenus des ménages ruraux le permettent, le Kenya et l'Indonésie en particulier. De manière générale toutefois, des financements publics sont indispensables compte tenu de la faible solvabilité des populations rurales. Ils proviennent, depuis quelques années, des organisations internationales et de certaines compagnies d'électricité qui considèrent de plus en plus le PV comme une réelle alternative technologique pour l'électrification rurale décentralisée, particulièrement bien adaptée au contexte technique et économique des zones rurales des

¹⁰ Il s'agit ici de petits systèmes "individuels" de l'ordre de 50 Wc en moyenne destinés à assurer la fonction éclairage ; avec des puissances plus importantes il est possible d'alimenter une télévision ou un réfrigérateur qui deviennent accessibles aux ménages ruraux dans certains pays.

PVD ; après l'Organisation Mondiale de la Santé (les réfrigérateurs PV dans les centres de santé ruraux), et la Commission Européenne (Programme Régional Solaire, notamment), la Banque Mondiale a lancé récemment un grand programme en faveur de l'électrification PV (PV market Transformation Initiative). Potentiellement, l'électrification PV des populations rurales non raccordées au réseau dans les PVD représente un marché de l'ordre de 15 à 20 GWc (Palz, 1994 ; EPIA, 1996), pour des ventes annuelles dans ce secteur de l'ordre de 15 à 20 MW.

- **Une compétitivité encore lointaine avec les technologies existantes de production d'électricité**

En ce qui concerne les applications raccordées au réseau, la logique économique est différente. On ne se situe plus à la périphérie du paradigme électrique, dans une zone de rendement décroissant (Willinger et Zuscovitch, 1993), à l'image des zones rurales faiblement denses où les techniques d'électrification classique en réseau se révèlent peu adaptées. Les "grandes" centrales PV destinées à l'alimentation du réseau électrique sont positionnées au cœur même du paradigme, face à des options technologiques bénéficiant d'effets de taille et de rendements croissants d'adoption, et d'une base de connaissance déjà constituée (Kemp, 1994). Les conditions de compétition entre technologies, de plus en plus favorables au PV à la frontière du paradigme électrique, lui sont ici clairement défavorables. La difficulté d'émergence sur ce créneau révèle la progression insuffisante des performances technico-économiques des systèmes PV face aux solutions techniques éprouvées sur leur domaine de compétitivité.

Pour se limiter au seul aspect économique, on observera que les écarts de coût avec les techniques existantes de production d'électricité sont encore considérables. A 4000 \$/kWc, le coût des modules a considérablement diminué depuis les premières applications terrestres du PV, mais il est encore bien supérieur au coût de construction des centrales électriques classiques¹¹. D'autant que le coût des modules ne représente qu'une partie du coût total d'une centrale PV, lequel intègre aussi les structures, le câblage, le génie électrique, les bâtiments, etc. Pour une centrale PV de 1 MW (La Serre - Italie), le coût des modules compte pour 60% du coût total, et le coût d'investissement total s'établit à 7625 \$/kWc¹².

Il en résulte un coût du kWh qui, dans des conditions favorables, se situe entre 30 et 40 cents (Ahmed, 1994). A titre d'exemple, le coût obtenu sur les onze systèmes installés au début des années 90 aux Etats Unis par le "Utility PV Group" est voisin de 75 cents, en moyenne (Martin, 1998). Ainsi, même dans des conditions où la pointe de consommation correspond au maximum d'ensoleillement, les centrales PV ne constituent pas pour l'instant une option compétitive pour la production d'électricité sur le réseau..

Le "concept" de centrales électriques PV de grande taille (au delà d'un MW) n'est toutefois pas le seul envisagé pour les systèmes raccordés au réseau. Dans un nombre croissant de pays, ce sont des systèmes PV de petite taille, couplés au réseau, (de l'ordre du kW) qui bénéficient des aides publiques en faveur de la promotion du PV. Les incitations en faveur de ces petits systèmes distribués répondent à une double logique : l'intégration des systèmes

¹¹ A titre indicatif les coûts d'investissement pour des moyens de production classiques sont de 1400 \$/kW (7040 FF/kW) pour le nucléaire, 680 \$/kW (3400 FF/kW) pour un cycle combiné gaz et 1230 \$/kW (6140 F/kW) pour une centrale charbon à lit fluidisé (DGEMP, 1997).

¹² En tenant compte d'un ensoleillement relativement favorable, le coût de production du kWh est estimé à 0,55 \$/kWh (EPIA, 1996).

PV en toiture ou en façade de bâtiments entraîne une réduction sensible des coûts d'installation¹³ mais, surtout, le rapprochement entre la production et le point de consommation finale limite les besoins de renforcement des réseaux de transport et de distribution et accroît la valeur de l'électricité produite (cf. M. Grubb, 1997). Dans cette configuration, le système alimente prioritairement la demande locale et réinjecte sur le réseau la production additionnelle.

Cette approche présente par ailleurs l'avantage d'abaisser partiellement la contrainte majeure que représente l'intermittence de la ressource solaire. Le foisonnement des apports sur l'ensemble du territoire rend alors la production PV moins aléatoire que dans le cas de grandes centrales raccordées au réseau. Il n'en demeure pas moins que la ressource solaire, plus encore que la ressource éolienne ou hydraulique, présente un caractère fortement intermittent et partiellement aléatoire, qui limite sa contribution à une partie minoritaire des besoins énergétiques, sauf percée majeure dans le domaine du stockage électrique de grande capacité.

L'intérêt potentiel de la "production distribuée" a justifié la création de niches tarifaires particulièrement favorables dans plusieurs pays industrialisés et entraîné une croissance rapide des installations de "toits solaires". Ainsi, en Allemagne, le tarif de rachat de l'électricité produite par les installations PV individuelles est établi à 90% du prix moyen de vente domestique pratiqué par les compagnies d'électricité sur l'ensemble du territoire ; en conséquence, l'objectif initial de "1000 toits solaires" a été largement dépassé avec plus de 2250 réalisations. Au Japon, l'objectif final a été fixé à 70 000 réalisations individuelles et le nombre d'installations atteint déjà 10 000 (36 MWc) en 1997 ; aux Etats Unis, le programme porte sur 1 million d'installations soit près de 3 000 MWc à l'horizon 2010 (Martin, 1998).

Ces objectifs extrêmement volontaristes visent à créer un effet d'annonce destiné à mobiliser les acteurs de la filière PV autour d'un segment de marché qui pourrait représenter à moyen terme la principale application du PV dans les pays industrialisés¹⁴. Dans une large mesure, la réalisation de ces objectifs dépendra du maintien ou du renforcement des mécanismes incitatifs déjà existants : obligation de rachat par les compagnies d'électricité, subventions à l'investissement, incitations fiscales et niches tarifaires (Bal et Finon, 1997). Mais l'association d'objectifs de diffusion mobilisateurs et de programmes de soutien doit aussi inciter les industriels à prendre des risques pour tenter de mobiliser des économies d'échelle ou mettre en place de nouvelles filières, de façon à accélérer la diminution des coûts. Sans mécanismes d'autorenforcement, la seule création de niches tarifaires ne permettra pas à la technologie PV d'atteindre les niveaux de diffusion souhaités.

3. Compétition intra-technologique et stratégie des acteurs

¹³ Il serait possible de réduire le coût des composants non-PV dans une proportion de 1 à 3 en intégrant les modules à la construction ce qui entrainerait une diminution du coût du kW installé de 30% (ETSU, 1994). Par ailleurs, cette solution permet de contourner la contrainte d'occupation des sols qui pourrait se révéler importante si le PV était amené à contribuer significativement à la production d'électricité.

¹⁴ Le scénario établi par l'Association Européennes des Industries du PV pour 2010 place les systèmes isolés (électrification rurale, pompage, etc., concerne prioritairement les PVD) en tête avec 40% de parts de marché, puis à égalité les usages professionnels et les petits systèmes raccordés au réseau, mais avec un rythme de croissance plus important pour ces derniers (EPIA, 1996).

En élargissant les niches de marché existantes, les mécanismes incitatifs évoqués ci-dessus renforcent la dynamique de diffusion du PV, confortent l'expérience industrielle des firmes et facilitent la mobilisation d'économies d'échelle. Ils contribuent à mobiliser les mécanismes d'autorenforcement qui permettent aux performances de continuer à progresser et rapproche la technologie PV de la zone de compétitivité avec les technologies établies. Mais, ces mécanismes d'autorenforcement présentent la propriété de dépendance au chemin (Arthur, 1988) et tendent à conforter les solutions techniques établies par rapport aux options émergentes. Ils confortent ainsi la position dominante du silicium cristallin dont les marges de progression sont limitées, au détriment de technologies nouvelles plus prometteuses.

3.1 Concurrence entre filières et incertitude sur les performances futures

La croissance actuelle du marché mondial (un doublement des ventes depuis 1993 et + 43% en 1997) permet d'envisager la poursuite de la diminution des coûts des photopiles au silicium par l'incorporation de nouvelles innovations sur les cellules et les procédés de production. Il est raisonnable d'espérer atteindre des rendements de 15 % pour les modules au début du prochain siècle et 18% ultérieurement, avec des coûts de production proches de 2,0 \$/Wc (4,0 \$/Wc en 1995).

Toutefois, les marges de progression sur la trajectoire de la technologie du silicium cristallin ne semblent pas suffisantes pour diminuer les coûts de production en deçà de la barre de 1\$/Wc (cf. partie I). En revanche, les technologies des "couches minces" qui mobilisent des procédés de production radicalement différents pourraient conduire à des coûts de cet ordre, ou inférieurs, à condition de bénéficier d'un processus d'apprentissage comparable à celui du silicium cristallin.

"..it is assumed that prices of PV modules based on crystalline Si may go down to the range of 2 US\$/Wp, but a decrease down to 1 US\$/Wp or even lower appears not to be possible. Prices of this level may require either ribbon/sheet technologies ... or real thin film technologies". (W. H. Bloss et alii, 1993)

Alors que la technologie du silicium cristallin nécessite des épaisseurs de cellules de quelques centaines de microns, les "couches minces" se contentent de quelques microns pour absorber la même proportion de radiations lumineuses. Cette technologie réduit considérablement la quantité de matière première nécessaire ainsi que la consommation énergétique du procédé. Elle est surtout particulièrement adaptée à la production industrielle à grande échelle puisque le matériau actif peut être directement déposé sur des substrats de verre ou métalliques de "grande" taille (1 à 2 m²), puis découpé à la dimension voulue. Ce mode de production en continu est potentiellement beaucoup plus efficace que les procédés discontinus imposés par la découpe des lingots de silicium cristallin. Ainsi, en dépit d'un rendement théorique plus limité (cf. Tableau 2), les technologies en couches minces apparaissent potentiellement plus prometteuses parce qu'elles offrent des perspectives de réduction des coûts beaucoup plus importantes que les technologies du silicium cristallin.

Le silicium amorphe a été la première technologie "en couches minces" disponible au stade industriel. Les procédés de fabrication sont maîtrisés depuis plusieurs années mais les coûts demeurent du même ordre que ceux du silicium cristallin en raison d'une demande insuffisante et des difficultés à mobiliser de réelles économies d'échelle en production. Par ailleurs, cette technologie est handicapée par des rendements faibles (5-6% contre 13-14%

pour le silicium cristallin) et instables au rayonnement solaire. Sans innovation importante sur ce point, la contrainte de rendement semble devoir limiter l'usage du silicium amorphe aux applications de très faible puissance

D'autres technologies en "couches minces" sont apparues depuis quelques années qui sont aujourd'hui proches du stade industriel. Le Diséléniure de Cuivre et Indium (CIS) et le Tellure de Cadmium (CdTe) semblaient les deux filières les plus prometteuses, au début des années 1990, les rendements obtenus étant à la fois élevés (ils dépassent 10% sur les modules de laboratoire) et stables, et les marges de progression importantes (cf. Tableau 2). Depuis, la diversité technologique s'est encore accrue récemment avec l'apparition de nouvelles filières telles que le silicium en couches minces qui pourrait profiter à la fois des connaissances acquises sur ce matériaux et des perspectives de baisse de coût liées aux couches minces.

Tableau 2 : Rendements des cellules PV (%)

		Limite Théorique	Cellules Experiment.	Modules Prototypes	Modules industriels
Silicium cristallin	monocristallin	27	23-24	22	15
	multicristallin	22	17	17	11
Couches minces	Silicium amorphe	20	12	10	6-7
	CIS	25	16	8	7
	CdTe	22	14-16	10	8

Source : A. Ricaud, 1997

Ces différentes filières sont susceptibles de faire descendre les coûts de production du PV en dessous de 2 \$/Wc et même 1 \$/Wc à moyen terme, en exploitant les possibilités d'automatisation des procédés de fabrication et d'économies d'échelle offertes par les couches minces. En s'appuyant sur l'expérience acquise par Solarex aux Etats Unis, H. Kelly estime que les coûts de production des cellules en couches minces pourraient atteindre 1,2-2,7 \$/W pour une capacité de production de 100 000 m²/an et 0,5-0,8 \$/Wc en accroissant celle-ci à 1 million de m²/an et en améliorant les rendements des modules de 10 à 15% (Kelly, 1993). Pour l'instant, les coûts annoncés pour ces technologies en couches minces sont des coûts prospectifs dans la mesure où, à l'exception du silicium amorphe, elles n'ont pas encore réellement atteint le stade industriel.

Dans le même temps, la technologie du silicium cristallin continue d'enregistrer des progrès grâce aux effets d'apprentissage que procure son statut actuel de "dominant design" au sein des technologies PV. Avec plus de 80% des ventes mondiales, l'expérience accumulée sur cette technologie suscite un nombre d'innovations incrémentales sur les cellules ou sur les procédés, plus important que pour les technologies alternatives, ce qui permet au rendement de continuer à progresser.

De même la croissance du marché autorise une certaine extension des capacités de production de cellules au silicium cristallin, qui même pénalisées par le caractère discontinu des procédés, bénéficient néanmoins des effets de taille. Siemens Solar se propose, par exemple, d'atteindre un prix de 2 \$/Wc sur des cellules au silicium monocristallin grâce à une meilleure géométrie des lingots, une évolution des procédés et une amélioration des techniques de manutention, sur une unité de production d'une capacité nominale de 25-100 MWc / an (Frankl, 1995).

Ainsi, les industriels sont, d'une façon générale, convaincus de ce que le recours aux technologies en couches minces s'imposera à terme pour dépasser ce seuil et approcher éventuellement de la compétitivité avec les technologies existantes de production d'électricité ; l'Association Européenne des Industries Photovoltaïque estime que *"to further decrease module costs below 1,8 Ecu/Wp (2,25 \$/Wc) it is necessary to develop technologies different from the traditional x-Si¹⁵"* (EPIA, 1996).

Mais, l'incertitude demeure encore très forte en ce qui concerne les perspectives d'évolution des différentes alternatives en présence et leurs chances respectives de s'imposer comme futur "dominant design". Concernant les nouvelles technologies, les marges de progression des performances, la faisabilité des procédés de fabrication à l'échelle industrielle, l'importance des économies à attendre d'un accroissement de la taille des unités de production, la possibilité de conjuguer effets de taille et amélioration des performances du produit, ainsi que l'évolution des coûts des matières premières et les impacts environnementaux de certains procédés industriels à risque, sont fortement incertains.

De ce fait, pour les industriels, *"... there are not, at present, any particular reasons to prefer one [alternative technology] to the other."* (EPIA, 1996). D'autre part, et compte tenu des marges de progression, certes limitées mais néanmoins réelles, que conserve le silicium cristallin, les entreprises leaders craignent de s'engager prématurément sur les nouvelles filières pendant que leurs concurrents directs continuent à progresser sur la trajectoire de référence. Cette double incertitude se manifeste dans les stratégies technologiques des entreprises.

3.2 Choix technologiques et stratégies des entreprises

Au milieu des années 1990, les capacités de production mondiales sont majoritairement affectées au silicium cristallin mais l'amorphe conserve une place importante (35% des capacités de production en 1994). A l'exception de l'Europe, les grandes entreprises telles que Siemens Solar ou Solarex aux Etats Unis, et Kyocera ou Sanyo au Japon, possédant des unités de production de cellules au silicium cristallin mais également au silicium amorphe. En revanche, les technologies des couches minces sont presque inexistantes à l'exception d'une unité de production de Solar Cells (10 MW de CdTe) aux Etats Unis.

Avec un taux moyen d'utilisation des capacités de production inférieur à 60%, l'industrie PV reste globalement surcapacitaire. Celle-ci est particulièrement importante en ce qui concerne le silicium amorphe¹⁶ en raison d'anticipations trop optimistes sur l'amélioration des performances de cette technologie et sur la croissance de ses marchés. Le rythme rapide de croissance des ventes observé depuis plusieurs années incite cependant les firmes à envisager l'accroissement de leurs capacités de production.

Selon les objectifs affichés par les industriels, la capacité mondiale de production pourrait ainsi s'accroître de plus de 260 MWh dans les prochaines années, pour atteindre 400 MWh en l'an 2000. Cette extension programmée des capacités de production concerne la totalité des filières technologiques : le silicium cristallin (mono- et multi-) ne représenterait que

¹⁵ Silicium cristallin (mono- ou multi-)

¹⁶ Le taux moyen d'utilisation des capacités de production de cellules au silicium amorphe est voisin de 35%, au Japon aux Etats Unis et en Europe, alors qu'il se situe entre 0,60 et 0,84 pour les cellules cristallines dans ces mêmes régions (EPIA, 1996).

50% des capacités additionnelles ; un tiers des nouvelles unités de production programmées concernerait les nouvelles technologies (CIS, CdTe et silicium en couches minces) et le solde correspondrait à de nouvelles capacités de production au silicium amorphe, malgré les incertitudes concernant l'avenir de cette technologie (Martin, 1998).

Cet accroissement de la diversité technologique ne vise pas à répondre à une segmentation accrue des marchés, les différentes technologies PV sont potentiellement en concurrence sur l'ensemble des applications (sites isolés, applications professionnelles, systèmes raccordés au réseau). L'accroissement de la diversité traduit en réalité une incertitude fondamentale de la part des firmes sur l'avenir de la compétition technologique entre les différentes filières.

La période actuelle correspond à un processus d'apprentissage spécifique, "*apprentissage extensif ou apprentissage de la diversité, qui implique l'exploration d'un grand nombre de directions possibles, conduit à l'élimination successive de certaines variantes et s'achève avec la sélection du standard.*" (Foray, 1994). Cet apprentissage par la diversité est essentiel dans la mesure où il permet de réduire progressivement l'incertitude quant à la fiabilité et à la performance des alternatives technologiques en présence. En évitant d'éliminer prématurément telle ou telle option apparemment moins performante, le maintien de la diversité prolonge les effets d'apprentissage sur chaque technologie et contribue à révéler la meilleure option disponible

Mais, à l'inverse, le maintien de la diversité retarde la sélection d'un standard et la mise en place des rétroactions positives qui lui sont associées : "*la diversité peut diminuer les performances économiques en empêchant l'exploitation des économies d'échelle et des externalités de réseau et en bloquant la réduction des coûts qui serait obtenue sur une application particulière.*" (Foray, 1994). S'il convient de préserver l'ensemble des options disponibles avant un enfermement prématuré sur une alternative dont les mérites sont incertains, l'émergence d'un standard est nécessaire pour bénéficier complètement des mécanismes d'autorenforcement et assurer le succès de l'innovation.

Pour l'instant, aucune option ne semblant nettement supérieure aux autres et en mesure de s'imposer comme futur "dominant design", les grandes entreprises du PV adoptent face à l'incertitude une stratégie attentiste pour éviter de s'engager trop hâtivement dans une direction qui se révélerait économiquement sous-optimale. Ainsi, l'examen des capacités de production additionnelles annoncées pour l'an 2000 montre que rares sont les entreprises figurant parmi les premières entreprises mondiales qui envisagent de diversifier leur production de modules.

BP Solar (CdTE) et ASE (Si en ruban) sont les deux seules entreprises parmi les dix plus grands producteurs mondiaux à programmer des extensions de capacité basées sur les nouvelles technologies (couches minces). Les principaux leaders persévèrent en revanche sur les technologies éprouvées, silicium mono- ou multi-cristallin principalement. Ce choix est motivé par la supériorité actuelle des performances obtenues avec ce matériau (rendements élevés, stabilité dans le temps) et la perspective de continuer à progresser sur la courbe d'expérience. Par ailleurs les procédés de production sont bien maîtrisés et continuent à évoluer de façon régulière. L'ampleur des améliorations à attendre de cette progression, qui ne permettra probablement pas au PV de devenir compétitif pour la production d'électricité sur le réseau, est suffisante pour accompagner l'élargissement progressif du marché sur les principales applications actuelles. En comparaison, les investissements massifs dans de nouvelles capacités de production que requièrent les

nouvelles technologies sont jugés encore trop risqués en raison des incertitudes techniques qui subsistent sur la faisabilité industrielle de certains procédés et sur la taille des unités nécessaire pour réellement bénéficier d'effets d'échelles.

Tableau 3 : Extension des capacités de production par technologies

Société	Production de modules 1997 (MWc)	Extension programmée des cap. de production 2000 (MWc)	Technologie
Siemens Solar (D)	24	6	mono-Si
Kyocera (J)	15,4		multi-Si
Solarex (USA)	14,8	14 10	multi-Si a-Si
BP Solar Int. (GB)	11,3	30 10	mono-/multi-Si couches minces
Sharp (J)	10,6	24 14	mono-Si a-Si
Photowatt (F)	5,7	5	multi-Si
Sanyo (J)	4,7	-	-
Astropower (USA)	4,3	-	-
Solec Int. (USA)	4,0	16	mono-Si
ASE (USA)	4,0	39	Si rubans

Source : Systèmes Solaires, 1998.

La concurrence technologique entre filières classiques et nouvelles devrait s'intensifier si les extensions de capacité annoncées sur ces dernières, par les industriels, se réalisent. Certaines firmes d'importance secondaire font le pari de l'innovation sur ces nouvelles filières pour tenter de gagner des parts de marché et s'imposer sur le marché mondial. Ceci pourra conduire les leaders à anticiper une percée rapide des nouvelles technologies et à modifier leurs stratégies d'investissement pour ne pas se laisser distancer. Mais s'ils devaient faire un choix différent et conforter leur option initiale en faveur des technologies éprouvées, les marges de progression encore existantes et leurs capacités d'investissement peuvent retarder d'autant l'émergence des nouvelles technologies et l'élargissement de la diffusion du PV au delà de ses niches actuelles de marché.

4. Conclusion et perspectives

Les technologies PV offrent la possibilité d'une production d'électricité à partir d'une ressource d'énergie renouvelable et largement disponible au plan mondial (sinon équitablement répartie). Leur développement constitue de ce fait un enjeu majeur dans la perspective d'un approvisionnement énergétique compatible avec la contrainte d'environnement local et global.

La diffusion du PV s'est élargie depuis vingt ans. Certaines applications sont d'ores et déjà rentables, notamment, pour les usages isolés de faibles ou très faibles puissances. Le PV figure ainsi aujourd'hui parmi les options techniques pour l'électrification rurale décentralisée, ce qui lui ouvre des perspectives considérables dans les PVD où une grande partie de la population rurale n'a pas accès aux réseaux électriques.

De même, en ce qui concerne la production d'électricité sur le réseau, la production décentralisée par des systèmes intégrés dans les bâtiments ouvre la possibilité de contourner la contrainte technique de faiblesse des rendements (et les contraintes d'encombrement qui en résultent) et partiellement celle de l'intermittence de la ressource. Dans ces conditions, la contribution du PV à l'approvisionnement énergétique pourrait dépasser la seule fourniture d'électricité pour les usages non raccordés au réseau ; dans une étude effectuée pour le compte de la Commission des Communautés Européennes, l'Association Européenne des Industriels du PV estime ainsi à 16% de la consommation finale d'électricité, soit 360 TWh, la contribution potentielle des systèmes PV intégrés aux bâtiments (EPIA, 1996).

Mais, pour l'instant, la compétition technologique se situe clairement à la frontière du paradigme de la fourniture centralisée d'électricité, basé sur la recherche d'économies d'échelle en production et la distribution en réseaux. Celui-ci est moins performant dans les régions nécessitant des extensions coûteuses pour desservir un nombre limité de consommateurs et des consommations unitaires faibles ; on entre alors dans une zone de rendements décroissants qui laisse apparaître des domaines de compétitivité pour de nouvelles options technologies. Ces nouvelles options qui ne bénéficient pas des effets de taille et d'apprentissage, présentent, en revanche, des performances insuffisantes pour concurrencer les solutions techniques établies à l'intérieur du paradigme. Les performances actuelles des technologies PV sont ainsi clairement insuffisantes pour leur permettre d'être compétitives sur le créneau de la production décentralisée d'électricité.

L'élargissement de leur base de diffusion et les mécanismes d'autorenforcement qui en résultent, vont entraîner une amélioration progressive des performances et de la compétitivité des technologies PV. Celle-ci sera-t-elle suffisante pour qu'elles aient un rôle à jouer dans la production d'électricité au delà de la seule desserte des usages non raccordables au réseau ? Selon les scientifiques et les ingénieurs, il semble établi que les technologies des couches minces sont potentiellement les seules options susceptibles de profiter pleinement des rétroactions positives pour concurrencer les technologies existantes dans la production d'électricité à grande échelle. Si tel était le cas, l'amélioration des performances des technologies en couches minces devrait être privilégiée en accumulant le maximum d'expérience sur ces technologies de façon à accélérer le processus d'apprentissage en cours. Une nouvelle phase d'apprentissage par la standardisation, caractérisée par un apprentissage intensif sur une option particulière, succéderait alors à la phase actuelle d'apprentissage de la diversité.

Cette évolution du processus d'apprentissage n'est pas possible au stade actuel de développement technologique. La phase d'apprentissage par la diversité n'a pas permis de réduire suffisamment l'incertitude quant aux performances futures des différentes options technologiques en compétition. Il est aujourd'hui encore impossible d'identifier l'option la plus prometteuse, autour de laquelle pourraient converger les anticipations des agents. De plus, des marges d'amélioration persistent sur les technologies PV éprouvées qui constituent autant de contre-incitations à innover sur les nouvelles filières.

De ce fait, l'expérience accumulée par l'industrie PV est dispersée sur différentes options au lieu de profiter à une option particulière et d'accélérer la progression sur une trajectoire technologique donnée. Les performances des cellules PV progressent, mais l'amélioration des rendements et la diminution des coûts sont moins rapides que dans la période antérieure où le silicium cristallin constituait clairement la technologie de référence. On peut cependant anticiper une nouvelle phase d'accélération de l'apprentissage dès lors qu'un "dominant design" s'imposera, du fait de ses qualités propres ou en raison des

comportements stratégiques des firmes. L'amélioration des performances de la technologie PV sera alors peut-être compatible avec l'émergence d'un nouveau paradigme électrique basé sur la production décentralisée d'électricité.

Bibliographie

Ademe (1996) : L'électricité solaire : la solution photovoltaïque. Brochure Ademe - 32 p.

Ahmed K. : (1994) : "Renewable Energy Technologies ; A review of the status and cost of selected technologies". World Bank Technical Paper N° 240. Whashington.

Arrow K. : "The economic implications of learning by doing". Review of Economic Studies, 1962, vol. 29.

Arthur W.B. (1988) : "Competing technologies : an overview". In Technological Change and Economic Theory. Ed. by G. Dosi et alii. Pinter Publishers, London.

Arthur W.B. (1989) : "Competing technologies, increasing returns and lock-in by historical events". Economic Journal, Vol 99, n°1, 116-31.

Ayres R. U. and Martinas K.: "Experience and the life cycle : some analytic implications". Technovation, 1992, vol. 12 n°7, pp. 465-486.

Bal J.L. et Finon D. (1997) : "Les politiques européennes de promotion des énergies renouvelables : la France est-elle à la traîne ?". Réalités Industrielles (Annales des Mines). N° Août 1997.

Bloss W.H., Pfisterer F. and Hertlein H.P. : "Photovoltaics : solar energy". Contribution au Sommet Solaire Mondial, Siècle de l'Unesco, Paris, 5-9 Juillet 1993.

Carlson D.E. (1990) : "Photovoltaic Technologies for commercial power generation". Annual Review of Energy and Environment. Vol. 15, 1990.

Chabot B. (1995) : L'économie des énergies renouvelables dans les pays industrialisés et en développement. In Stratégies énergétiques, biosphères et sociétés (SEBES). Mai 1995.

Dracker R. and De Laquil P. (1996) : "Progress commercializing solar-electricity power systems". Annual Review of Energy and Environment. Vol. 21, 1996.

EPIA (1996) : European PV Industry Association "Photovoltaics in 2010". European Commission - Directorate General for Energy. Bruxelles.

ETSU (1994) : "An assessment of renewable energy for the UK". ETSU Report for the Department of Trade and Industry.

Foray D. (1994) : "Les nouveaux paradigmes de l'apprentissage technologique". Revue d'Economie Industrielle N°69. Paris.

Foray D. (1996) : "Diversité, sélection et standardisation : les nouveaux modes de gestion du changement technique". Revue d'Economie Industrielle N°75. Paris..

Frankl P. (1995) : "Photovoltaics". Research Report. Dipartimento di Meccanica e Aeronautica. Universita degli Studi di Roma "La Sapienza". Rome.

Grubb M. (1997) : "Renewable Energy Strategies for Europe - vol II - Electricity systems and primary electricity sources". The Royal Institute of International Affairs - Energy and Environment Programme. Earthcan Publication Ltd, London.

Hourcade JC. et Nicolon A. (1987) : "La course d'obstacle des énergies renouvelables". Energie Internationale 1987-88. Ed. Economica. Paris 1987.

Kelly H. (1993) : "Introduction to PV technology". In Renewable Energy : Sources for fuel and electricity. Ed. TB. Johansson, H. Kelly, A.K.N. Reddy and R. H. Williams.

Kemp R. (1994) : "Technology and the transition to environmental sustainability ; the problems of technological regime shifts". Futures 26 (10).

Kristiansson L. (1995) : "Diffusion and learning curves of renewable energy technologies". IIASA Working Paper WP 95 126.

Martin P.E. (1998) :

Neij L: "Use of experience curves to analyse the prospects for diffusion and adoption of renewable energy technology". Energy Policy, 1997, vol. 23, n°13, pp.1099-1107.

Palz W. : "A global photovoltaic action plan" Solar Europe. Oct 1993.

Palz et Zibetta (1991) : "Energy pay-back time of photovoltaic modules, International Journal of Solar Energy, Vol 10, pp 211-216.

Ricaud A. (1997) : Photopiles solaires ; de la physique de la conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédés. Ed. Presses Polytechnique et Universtaire Romandes. Lausanne 1997.

Rodot M. (1993) : "Production d'électricité par les photopiles". Revue de l'Energie N° 449.

Rodot M. (1995) : "Travaux de pointe pour photopiles de course". Systèmes Solaires N° 109.

Rosenberg. N, 1982. : Inside the black box: technology and economics. Cambridge University Press.

Strategies Unlimited (1993) : "Solar Flare". Nov. 1993.

Utterbanck J.M. and Abernathy J. (1975) : "A dynamic model of process and product innovation". Omega Vol 3 n°6.

Von Hippel E. (1988) : The sources of innovation. Oxford University Press. Oxford.

Willinger M. et Zuscovitch H. (1993) : "Efficiencie, irréversibilités et constitution des technologies" In Revue d'Economie Industrielle, N° 65, 3eme trimestre 1993, pp. 7-22.