

**Compétition technologique, rendements croissants
et lock-in dans la production d'électricité d'origine
solaire photovoltaïque.**

Pierre TAILLANT

Cahier N° 01.10.25

Octobre 2001

Centre de Recherche en Economie et Droit de l'ENergie – CREDEN

Université de Montpellier I

Faculté des Sciences Economiques

BP 9606

34 054 Montpellier Cedex France

Tel. : 33 (0)4 67 15 83 32

Fax. : 33 (0)4 67 15 84 04

e-mail : taillant@sceco.univ-montp1.fr

Compétition technologique, rendements croissants et lock-in dans la production d'électricité solaire photovoltaïque.

Résumé

Ce cahier de recherche a pour objet d'étudier, à travers le modèle évolutionniste de compétition technologique de B.ARTHUR, les phénomènes de rendements croissants d'adoption et la situation de lock-in ("verrouillage technologique") dans le secteur des cellules solaires photovoltaïques destinées à la production d'électricité "verte".

Les processus de dépendance du sentier et des facteurs historiques aléatoires, comme les commandes publiques, peuvent conduire à une situation où la technologie qui prédomine n'est pas forcément la plus performante. Dans le cas du solaire photovoltaïque, il apparaît que la filière "silicium cristallin", dominante, est celle qui présente actuellement les meilleurs rendements énergétiques. Cependant, compte tenu de l'évolution de sa courbe d'expérience traduisant un début d'épuisement des effets d'apprentissage, les perspectives de diminution des coûts semblent désormais limitées malgré une demande soutenue et des activités de Recherche & Développement encore intenses. Par contre la filière "couches minces" présentant des rendements moins élevés pourrait gagner en compétitivité grâce à l'automatisation des procédés de fabrication.

Dans ces circonstances, les politiques publiques technologiques doivent veiller à sauvegarder une diversité des choix dans l'éventail des technologies possibles afin que certaines options, prometteuses mais moins attractives aujourd'hui, puissent développer par la suite des trajectoires "supérieures".

Mots clés : *Electricité solaire photovoltaïque ; Innovations technologiques ; Compétition technologique ; Rendements croissants d'adoption ; Dépendance du sentier ; Lock-in.*

Introduction

Depuis le début des années quatre-vingt dix et dans un contexte marqué par l'instabilité du prix du pétrole, la montée des préoccupations environnementales et la déréglementation des marchés électriques, les énergies renouvelables (ENR), dont le solaire photovoltaïque (PV), connaissent un regain d'intérêt en Europe, tant de la part des Pouvoirs Publics que des compagnies électriques et pétro-gazières. Les ENR se sont initialement développées sur des marchés "niches" très étroits, comme l'électrification des zones rurales isolées dans les pays en développement. Plus récemment des installations comme les éoliennes *offshore* ou les "toits PV" montrent que certaines sources d'énergies renouvelables arrivent à une certaine maturité technologique et ont de plus en plus vocation, dans les pays industrialisés, à être intégrées aux réseaux de distribution d'électricité. Ce renouveau actuel, en plus du thème récurrent de la sécurité d'approvisionnement énergétique, s'appuie sur deux nouvelles préoccupations : la volonté de limiter les émissions de gaz à effet de serre, conformément aux objectifs fixés par le Protocole de Kyoto de 1997, et la réalisation des chiffres¹ fixés par la directive européenne sur les énergies renouvelables adoptée le 7 septembre 2001 par le Conseil de l'Union Européenne.

Dans ce cadre, ce cahier a pour objet d'étudier les phénomènes de rendements croissants d'adoption (RCA) et la situation de *lock-in* ("verrouillage technologique") pouvant en résulter dans le secteur des cellules solaires PV destinées à la production d'électricité "verte".

Notre objectif, dans un premier temps, est de caractériser la courbe d'expérience et la trajectoire technologique des cellules PV à partir de l'évolution de leur rendement, des quantités produites en fonction des différentes technologies (silicium cristallin et silicium amorphe/couches minces) et des prix de vente. Après avoir dégagé les faits stylisés traduisant la domination en termes de parts de marché d'une technologie, nous analyserons ensuite cette

¹ La directive (« relative à la promotion de l'électricité produite à partir des sources d'énergies renouvelables sur le marché intérieur de l'électricité ») fixe la part des ENR à 12% de la consommation brute d'énergie de l'Union en 2010 (contre 6% aujourd'hui). Ce qui représente une part spécifique de 22,1% d'électricité produite à partir des SER dans la production totale d'électricité (grandes installations hydroélectriques incluses).

situation à travers le modèle évolutionniste de compétition technologique de B.ARTHUR basé sur les rendements croissants d'adoption.

1. Rendements croissants d'adoption et énergie solaire photovoltaïque

Cette première section a pour but d'explicitier les éléments qui permettent d'avancer l'hypothèse selon laquelle l'existence de RCA dans le secteur de l'énergie solaire PV peut conduire à une compétition technologique dont l'issue est caractérisée par une situation de *lock-in*.

L'économie évolutionniste de l'innovation en tant que récente discipline de l'économie industrielle développe des paradigmes alternatifs de processus de diffusion technologiques en insistant particulièrement sur ses aspects dynamiques. Dans l'approche néoclassique traditionnelle, les rendements factoriels décroissants et les rendements d'échelle constants permettent d'assurer la stabilité et la prédictabilité de l'équilibre économique en tant que solution à un problème d'optimisation, mais ils ne permettent pas d'expliquer les phénomènes de *lock-in* technologiques. L'intégration de la dynamique du changement technologique dans la théorie évolutionniste, notamment par B.ARTHUR, permet d'interpréter les rendements croissants (d'adoption ou d'échelle) comme résultat des effets d'apprentissage² endogénéisant le changement technique et conduisant à des états d'irréversibilité et de dépendance du sentier (*path-dependence*).

B.ARTHUR [1988, 1989] a posé les fondements de sa théorie de la compétition technologique en s'appuyant au départ sur une idée que l'on peut résumer simplement : on ne choisit pas une technologie parce qu'elle est plus efficace, mais c'est parce qu'on la choisit qu'elle devient plus efficace³. A partir de là, dans un domaine technologique donné, la distribution des choix individuels est à l'origine de rétroactions positives (*increasing returns*) et augmente la probabilité que la technique adoptée au cours de la période t_0 soit à nouveau choisie à la période t_1 . L'analyse des sources des RCA dans un secteur à forte intensité technologique

² Nous assimilerons les termes "apprentissage" et "expérience".

³ « *What makes competition between technologies interesting is that usually technologies become more attractive – more developed, more widespread, more useful – the more they are adopted* » ARTHUR [1988].

comme celui des cellules solaires PV, peut nous aider à expliquer pourquoi ceux ci peuvent conduire à une situation sous-optimale en termes de maximisation du bien-être des agents, en ce sens que la technologie dominante n'est pas obligatoirement celle qui offre les meilleurs rendements.

B.ARTHUR [1988] propose une classification des causes des RCA en se penchant particulièrement sur cinq d'entre eux : l'apprentissage par l'usage, les économies d'échelle, les externalités de réseau, les rendements croissants informationnels et les interrelations technologiques.

i. L'apprentissage par l'usage et les économies d'échelle

Nous avons choisi de regrouper l'apprentissage par l'usage et les économies d'échelle même si B.ARTHUR distingue formellement les deux dans sa typologie. En effet, nous souhaitons apporter ici un éclairage à l'aide de la notion de courbe d'expérience, mise en évidence dans son principe pour la première fois par T.WRIGHT [1936] pour l'industrie aéronautique, et généralisée ensuite par le Boston Consulting Group (BCG) [1980]. Dans ce cas comme le suggère L.NEIJ [1997], et même si cela est discutable⁴, il est commode d'établir l'association entre l'apprentissage et les économies d'échelle. Les effets d'échelle techniques peuvent être renforcés par les effets d'apprentissage, les deux étant liés aux volumes produits.

L'apprentissage par l'usage (dans le sens du *learning by doing*, ARROW [1962] et du *learning by using*, ROSENBERG [1982]) signifie que plus une technologie est adoptée, plus les effets d'expérience vont jouer en faveur de sa diffusion et de son amélioration. Les économies d'échelle sont quant à elles habituellement définies à partir d'une situation dans laquelle un accroissement des facteurs de production (inputs) entraîne une augmentation plus que proportionnelle de la production. Dans ce cas une fonction de production vérifiera l'hypothèse de rendements d'échelle croissants, ce qui conduit toujours à une fonction de coût moyen décroissante à long terme (dans ce cas le coût marginal sera toujours inférieur au coût moyen).

⁴ Voir à ce sujet D.Abell et J.Hammond [1979] « Costs dynamics : scale and experience effects », *in* Strategic planning : problems and analytical approaches, Prentice Hall, Englewood Cliffs.

Dans le cas des photopiles solaires la découverte de l'effet PV a été réalisée par A.-E. BECQUEREL en 1839, mais ce n'est qu'au milieu du XX^{ème} siècle (en 1954) que la première cellule solaire a été fabriquée aux Etats-Unis par la société Bell Telephone Laboratories. En 1958 le satellite américain Vanguard I a été lancé, équipé de six panneaux recouverts de cellules au silicium ayant un rendement⁵ moyen de 6%. Depuis, les modules PV, choisis pour minimiser le rapport poids/puissance électrique délivrée, équipent tous les satellites. C'est au début des années 1980 que le PV et les autres énergies renouvelables vont connaître leur premier essor "terrestre" avant le redémarrage observé au cours des années 1990. Les applications spatiales ont donc permis initialement un apprentissage et une maîtrise graduelle, mais relativement rapide, de l'utilisation des cellules PV au silicium cristallin, même si la découverte scientifique principale est elle ancienne.

Les effets d'apprentissage sont observables à travers les courbes d'expérience qui mettent en relation l'évolution du coût de production unitaire d'un bien et l'évolution de sa production cumulée dans le temps. L'allure générale d'une courbe d'expérience est de la forme d'une exponentielle en échelle décimale ou d'une droite en échelle log-log.

On peut la représenter par (PONSSARD [1988]) :
$$C_t = C_0 \left(\frac{V_t}{V_0} \right)^{-TE}$$

ou par la forme logarithmique qui présente l'intérêt d'être représentée par une droite du type : $LogC_t = A_0 - TE LogV_t$ où :

V_0 = volume cumulé de la production à la période de base

C_0 = coût unitaire de la production à la période de base

V_t = volume cumulé de la production en t

C_t = coût unitaire de production en t

TE = taux d'expérience

⁵ La performance d'une cellule PV va traduire sa capacité à transformer l'énergie solaire en électricité. Son rendement est égal au rapport entre la puissance électrique qu'elle fournit et la puissance lumineuse qu'elle reçoit. La puissance d'une photopile est définie par convention en watts crête (Wc) ou *watt peak (Wp)* : c'est la puissance maximale qu'elle peut fournir sous un ensoleillement de 1 000 W/m² à une température constante de 25°C.

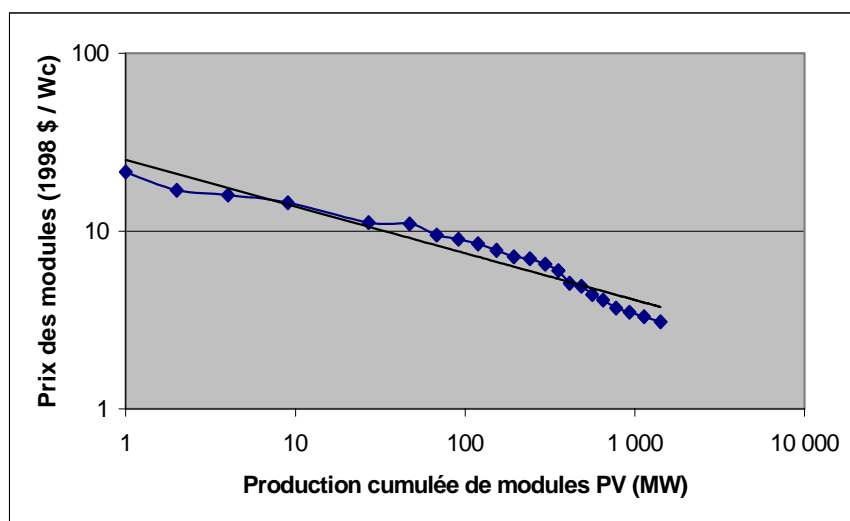
$$A_0 = \text{constante dépendant de la période de base : } A_0 = \text{Log}(C_0 V_0^{TE})$$

Le taux d'expérience TE est utilisé pour calculer la réduction de coût résultant d'un doublement de la production cumulée. Un TE de 25% signifiera que les coûts sont réduits de 25% à chaque doublement de la production cumulée. En cas d'augmentation des coûts le TE sera inférieur à zéro.

Comme le suggère L.NEIJ [1997] les courbes d'expérience ne doivent pas être considérées comme une théorie établie et fixe. Elles représentent plutôt une méthode ayant l'avantage de pouvoir s'adapter à différents types d'approches ou d'observations empiriques. Par exemple les différents types de coûts pris en compte pour le calcul du TE ne sont pas fixes, même si habituellement on se réfère aux coûts du capital, du travail, de la recherche et développement (R&D), du marketing, etc... Il en est de même pour les variables retenues pour calculer la baisse des coûts : on peut s'appuyer sur les changements intervenus dans le *process* de fabrication (les innovations de procédés, les effets d'apprentissage et les économies d'échelle), sur les caractéristiques du produit lui-même (innovations de produits, standardisation) et/ou sur la baisse du prix des inputs (matières premières).

Nous avons construit la courbe d'expérience (Schéma 1 ci-dessous) pour la période 1979 – 2000 à partir des chiffres concernant les prix de vente des modules au silicium cristallin et avec des données actualisées prenant en compte l'année 2000 (Voir les chiffres en Annexe I). Le TE calculé est de 26%.

Schéma 1. Courbe d'expérience (échelle log – log) des modules photovoltaïques (1979 – 2000).



Source : C.HARMON [2000], P. MENANTEAU [2000], Baromètres photovoltaïques 2000 et 2001 Systèmes Solaires n°136-2000 et n°142-2001, site Internet www.agores.org.

Tableau 1. Taux d'expérience (en %) pour trois catégories de technologies.

Type de technologie	Moyenne relevée dans la littérature	Ecart (mini-maxi) relevés dans la littérature
Usines	10	18 - 0
Grande échelle	< 0	
Petite échelle	13	
Production de masse d'unités identiques	20	37 - 11
Procédés de fabrication continus	22	36 - 10

Source : L.NEIJ [1997].

Le *Tableau 1* ci-dessus présente les *TE* moyens⁶ des courbes d'expérience pour trois catégories de technologies. **Les technologies sont différenciées en fonction du degré d'économies d'échelle qu'elles engendrent (NEIJ [1997]) :**

- les *TE* moyens des "usines" ("grande échelle") sont basés sur les coûts des centrales électriques nucléaires et des centrales au charbon. Les courbes d'expérience de ces unités montrent une hausse des coûts au fil des années, avec selon les cas un $TE < 0$. C'est le cas des centrales nucléaires pour lesquelles, malgré les effets d'expérience, les recherches constantes pour améliorer la sécurité afin de réduire les risques d'accident et les risques environnementaux, n'ont pas entraîné (ou peu) de baisse des coûts. Par contre les usines "petite échelle" présentent un *TE* moyen de 13% calculé par rapport aux coûts des turbines à gaz à cycles combinés.

- les *TE* moyens (20%) des unités permettant une "production de masse de produits identiques" sont calculés à partir des coûts de l'industrie électronique et des biens de consommation durable. Les économies d'échelle réalisées entraînent en moyenne une baisse des prix de 20% à chaque doublement de la production.

- les *TE* (22 % en moyenne) des courbes d'expérience de la troisième catégorie ("unités de production en continu de produits de raffinerie, de produits chimiques") traduisent

⁶ Les *TE* sont issus de L.NEIJ [1997] et calculés à partir d'une revue de la littérature : C.KOMANOFF [1981], P.JOSKOW et N.ROSE [1985], R.CANTOR et J.HEWLETT [1988] pour les prix des centrales au charbon et des centrales nucléaires ; P.MAC GREGOR *et alii* [1991], D.CLAIR [1983] pour les centrales à gaz à cycles combinés ; Bonneville Power Administration [1980], F.KRAWIEC *et alii* [1980], D.CLAIR [1983], F.BASS [1980] pour les composants électroniques et les biens de consommation durables ; J.FISHER [1974], F.KRAWIEC *et alii* [1980], D.CLAIR [1983], J.GOLDEMBERG [1996] pour les produits de raffinerie et les produits chimiques.

les réductions de coûts les plus significatives au cours de l'augmentation de la production de produits standardisés. Les effets d'échelle des deux premières catégories se combinent dans ce type de procédé de production.

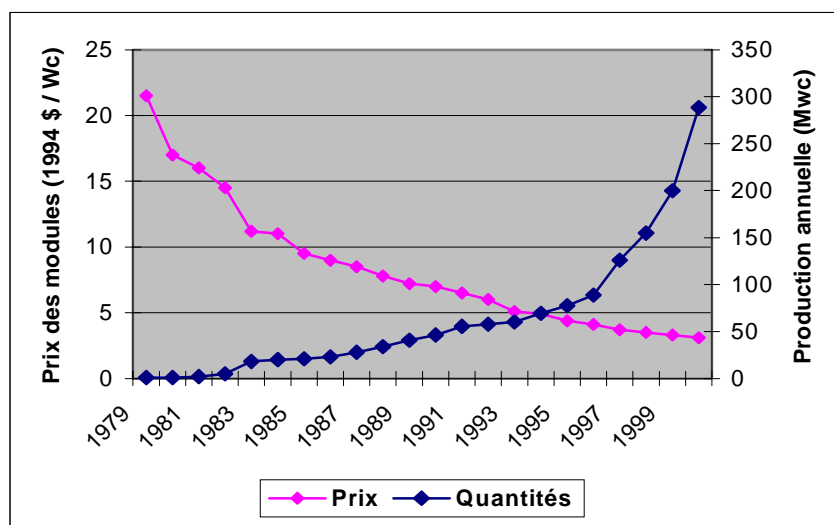
Il reste à situer maintenant l'énergie solaire PV (silicium cristallin) en tant que technologie à partir des ordres de grandeur fournis par ces *TE* moyens. On peut immédiatement exclure la comparaison avec les centrales nucléaires ou même les grandes installations hydroélectriques. Par contre il est possible de positionner la courbe d'expérience du solaire PV entre celles que nous avons appelées dans le *Tableau 1* "usines petite échelle" et "production de masse d'unités identiques". D'après ces catégories la technologie PV posséderait un *TE* compris entre 13 et 20%, ce qui est conforme aux taux moyens (20 – 22%) généralement relevés dans les récentes publications (GRITSEVSKYI et NAKICENOVIC [2000], HARMON [2000], MC DONALD et SCHRATTENHOLZER [2001]). **Cependant ces taux sont quelque peu inférieurs à celui que nous avons calculé (26%), ce qui signifierait que les chiffres actualisés (prix et quantités vendues) que nous avons utilisés montrent une accentuation récente des effets d'expérience.**

Si l'on interprète strictement la courbe d'expérience construite à partir des niveaux actuels de croissance de la production et des prix, il est possible d'établir une tendance de l'évolution future du prix des modules. Ce scénario, assez optimiste, s'appuie sur un *TE* constant de 26% (voir également l'évolution des prix pour un *TE* de 20%), sur une croissance moyenne de la production de 40% par an et sur les prix des modules en 2000 (3,1 \$/Wc). D'après les *Annexes 2* et *3* le prix des modules pourrait franchir le seuil de 1 \$/Wc lorsque la production mondiale cumulée atteindra un niveau dépassant les 22 000 MWc, soit dans dix ans au rythme de croissance actuel, et 0,5 \$/Wc, pour une production cumulée supérieure à 90 000 MWc, soit dans quinze ans. Cette évaluation est bien évidemment restrictive puisqu'elle ne concerne que le prix des modules au silicium cristallin⁷. Elle ne tient donc pas compte des progrès techniques et des baisses de coûts dont sont porteuses les autres filières de matériaux en couches minces.

Si l'on s'intéresse à présent à l'évolution annuelle des prix et des quantités de modules fabriquées (*Schéma 2* page suivante), nous voyons que la production annuelle de modules a

connu une accélération des quantités produites depuis 1996 (croissance moyenne annuelle supérieure à 40% ces dernières années), alors que le rythme de la baisse du prix des modules, soutenu jusqu'au milieu des années 1980, s'est ralenti depuis 1995. Cela se traduit par un début "d'aplatissement" de la courbe signifiant une stabilisation à un niveau moyen proche des 3 \$/Wc. Cette appréciation vient modérer l'interprétation faite à partir de la courbe d'expérience. Il semble que le ralentissement de la décroissance des prix intervienne alors que la technologie PV n'a pas encore atteint le stade de la maturité. Cette tendance pourrait être due à un début d'épuisement des effets d'apprentissage de la filière silicium cristallin.

Schéma 2. Quantités produites et prix de vente annuels des modules PV (1979 – 2000).



Source : C.HARMON [2000], P.MENANTEAU [2000], Baromètres photovoltaïques 2000 et 2001 Systèmes Solaires n°136-2000 et n°142-2001, site Internet www.agores.org.

On peut compléter cette analyse en s'appuyant sur la notion de cycle de vie des technologies, qui s'inspire elle-même directement de la théorie du cycle de vie des produits (VERNON [1966]). Celle-ci se place dans une perspective dynamique et propose une conception⁸ "biologique" du cycle du produit en découpant sa période d'existence en quatre phases : (i) la naissance (l'introduction ou le lancement), (ii) la croissance (le décollage), (iii) la maturité et (iv) le déclin (en fait saturation et déclin). Au cours du cycle les conditions de

⁷ Pour lesquels les séries les plus longues de prix sont disponibles. Les autres technologies étant trop "jeunes" en termes de développement commercial.

⁸ Nous laissons ici volontairement de côté la dimension internationale de la théorie du cycle de vie du produit dans laquelle le produit naît dans un pays leader. Il se développe d'abord dans son marché interne, avant de se diffuser progressivement dans les autres pays industrialisés, puis dans les pays en développement lorsque les besoins en R&D et en main d'œuvre qualifiée diminuent.

production du produit se modifient (mais également la consommation et la structure de son marché). Celles-ci sont représentées dans le *Schéma 4* ci-après.

Schéma 4. Caractéristiques de la production dans le cycle de vie du produit.

Cycle du produit	<i>Naissance</i>	<i>Croissance</i>	<i>Maturité</i>	<i>Déclin</i>
Production	Technologie instable Forte intensité de R&D Séries courtes Coûts unitaires élevés	Technologie stabilisée Plus forte intensité du capital et du travail Séries longues Baisse des coûts unitaires	Banalisation de la technologie Forte intensité du travail peu qualifié Séries longues	Technologie obsolète Forte intensité du travail non qualifié

Source : Adapté à partir de C. AUBIN et P. NOREL [2000].

D'après la grille de lecture proposée par ce schéma⁹, la technologie des cellules PV dans son ensemble a engagé sa sortie de la phase "naissance" et n'est pas encore entièrement entrée dans la phase de "croissance".

Les applications du PV pour la production d'électricité sont plus nombreuses depuis les années 1980, notamment grâce à l'élargissement progressif des marchés¹⁰. Cependant les contraintes techniques demeurent importantes et les méthodes de production des différentes filières, encore lentes et coûteuses, peinent à passer d'une fabrication en séries courtes avec des coûts unitaires élevés, à une fabrication industrielle automatisée en séries longues. Les dix principaux fabricants de cellules PV (représentant 85% des cellules PV produites en 2000 – Voir Annexe 5) possèdent depuis peu ou sont en train d'investir dans des chaînes automatisées. Un *TE* de 26% sur la période 1979 – 2000 révèle que les effets d'apprentissage, sont soutenus par un effet "volume" dû à l'automatisation récente mais croissante de la production des principaux acteurs du marché.

⁹ L'analyse du cycle de vie d'une technologie est très souvent associée à un modèle de diffusion à partir d'une courbe logistique ou courbe en S.

¹⁰ RICAUD [1997] distingue six segments principaux dans le marché des applications PV : (i) les produits grand public à usage intérieur, (ii) à usage extérieur, (iii) les applications professionnelles isolées, (iv) les habitations isolées, (v) les toitures et façades connectées au réseau et (vi) les grandes centrales solaires.

ii. Les externalités de réseau

Les externalités de réseau (KATZ et SHAPIRO [1985]) en tant que sources de RCA peuvent résulter de la dimension géographique ou physique d'un réseau, comme pour le transport et la distribution d'énergie, du réseau de distribution d'un produit ou d'un service, ou d'un effet de réseau découlant de la compatibilité de différents matériels entre eux (PERROT [1995]). Nous porterons notre attention sur la distinction entre les effets de réseau directs et indirects. Les effets de réseau directs sont liés aux effets de clubs : un utilisateur verra son utilité augmenter à chaque accroissement du nombre d'utilisateurs du même bien (cas du téléphone ou d'Internet). Ce type d'effet apparaît comme une externalité de demande entre les utilisateurs d'un même bien. Cette externalité n'existe pas dans le secteur des cellules solaires PV. En effet, dans le cas de systèmes connectés comme les "toits solaires", l'électricité produite sera soit consommée sur place, soit injectée sur le réseau où elle circulera de manière indifférenciée ne créant aucune externalité de demande. Le principe est le même pour le système d'un habitat isolé car celui-ci ne relève pas d'une approche résiliaire.

La situation est différente en ce qui concerne les effets de réseau indirects sans effets de clubs (CHOU et SHY [1990]). Chaque consommateur va bénéficier d'externalités d'offre générées par le nombre croissant d'utilisateurs présents sur le réseau. L'offre de services s'y rattachant va de ce fait s'élargir. Dans le cadre de notre analyse, plus l'utilisation du solaire PV sera étendue, par exemple les toits PV installés sur les habitations individuelles, plus le nombre d'installateurs/réparateurs susceptibles d'effectuer les travaux d'installation, de réparation et de maintenance sera élevé. La proximité géographique avec les consommateurs sera aussi améliorée. On voit bien ici que ces externalités d'offre sont conditionnées par la présence et le développement d'une "base installée" (PERROT [1995]). Celle-ci correspond au nombre de consommateurs déjà reliés (directement ou indirectement) au réseau d'installateurs. Ainsi un effet "boule de neige" alimenté par les RCA peut s'enclencher : plus les consommateurs initiaux seront nombreux, plus la demande augmentera dans la période suivante et plus l'offre pourra se diversifier.

iii. Les rendements croissants informationnels

Le principe des rendements croissants informationnels est qu'une technologie sera d'autant plus utilisée qu'elle sera connue. Lorsque sur un marché plusieurs technologies

fournissant le même service sont en compétition, ce qui est le cas des cellules PV l'aversion au risque des producteurs et des consommateurs va avoir pour effet de venir renforcer la technologie déjà dominante. L'incertitude liée à la coexistence de technologies différentes conduit le plus souvent les décideurs privés (les industriels, mais également les apporteurs de capitaux) et publics à engager des dépenses de R&D sur la technologie la plus expérimentée afin de réaliser des innovations incrémentales pour la faire encore progresser, au détriment des filières plus "jeunes" (d'un point de vue historique et technologique) nécessitant des soutiens financiers importants.

iv. Les interrelations technologiques

Les interrelations technologiques sont les derniers types de RCA distingués par B.ARTHUR. Une technologie établie va connaître des prolongements dans la mise au point de produits voisins et de technologies affluentes qui vont venir structurer la filière elle-même et son environnement technique, renforçant d'autant plus son attractivité.

Les progrès réalisés tout au long de l'évolution technique des cellules au silicium cristallin massif illustrent bien ces types de RCA. Les recherches pour réduire les coûts de production des cellules PV ont très vite conduit les fabricants à utiliser des rebuts de silicium (têtes et queues de lingots) provenant de l'industrie électronique¹¹. Ils ont ainsi trouvé une matière première abondante, de bonne qualité et à un coût avantageux. En 1975 une nouvelle méthode de moulage de lingots de silicium multicristallin a été développée¹². Ce procédé a le grand avantage d'être moins consommateur en énergie, le silicium devant être moins purifié. De ce fait le coût de production du matériau de base a été pratiquement divisé par deux : 39 euros/Kg pour le silicium multicristallin et 73 euros/Kg pour le silicium monocristallin (MENANTEAU [2000]). De plus il permet le tirage de plaquettes rectangulaires à partir de lingots parallélépipédiques garantissant un meilleur remplissage géométrique des modules. Les rendements de conversion moyens pour des modules PV commerciaux qui étaient de 8 à 10% avant 1980 sont actuellement de 12 à 15% pour les plaquettes les plus grandes (voir le *Tableau 3* à la page suivante). L'utilisation de la scie à fil au cours des années 1980 a

¹¹ L'industrie électronique en plein essor à partir des années 1970 a ainsi pu fournir des rebuts de silicium électronique appelés ensuite silicium "de qualité solaire ou PV".

¹² Les déchets de silicium électronique sont fondus dans un creuset pour donner, après solidification des lingots de poids variable (de 30 à 150 Kg).

également constitué une innovation importante en limitant les pertes liées au "trait" de scie, tout en améliorant la productivité du sciage : désormais 24 plaquettes "ultra-minces" peuvent être tirées sur un centimètre de lingot, contre 16 auparavant (RICAUD [1997]).

Tableau 3. Rendements moyens et maxima observés pour les modules et les cellules PV (%).

Technologies	Rendement moyen d'un module (%)	Rendement maximum d'un module (%)	Rendement maximum d'une cellule en laboratoire (%)
Silicium monocristallin	12 à 15	22,7	24,7
Silicium multicristallin	11 à 14	15,3	19,8
Silicium amorphe	5 à 7	/	12,7
Tellure de Cadmium	/	10,5	16,0
Séléniure de cuivre	/	12,1	18,2

Source : IEA [2000].

L'étude des rendements croissants d'adoption tels qu'ils ont été définis par B.ARTHUR permet, à partir de données technico-économiques, de mettre en évidence certaines caractéristiques du processus d'adoption et de diffusion d'une technologie (SAHAL [1981] parle de « *learning via diffusion* »). De ce point de vue celle-ci apparaît comme le résultat de l'expérience accumulée par les entreprises dans la production d'un bien, depuis les activités de R&D jusqu'aux activités de marketing et de vente (GAFFARD [1990]).

La technologie issue de l'activité innovatrice des firmes repose sur une trajectoire¹³, qui elle même s'insère dans un paradigme technologique. G.DOSI [1982] précise qu'un paradigme technologique est « *une approche qui définit conceptuellement des problèmes à affronter et des exigences à satisfaire, des principes scientifiques auxquels recourir et des technologies spécifiques à utiliser concrètement* ». Un paradigme technologique est créé par une innovation radicale : c'est un programme de recherche qui détermine les problèmes à résoudre tout en apportant des schémas de résolution. Il encadre et modèle l'activité innovatrice en privilégiant ou en délaissant l'exploration des options possibles par l'ouverture de trajectoires qui vont venir « cristalliser » des apprentissages localisés et des innovations incrémentales. Cela signifie qu'à un moment du temps les trajectoires technologiques sont en nombre limité parce qu'elles ne permettent l'exploration que d'un espace restreint du paradigme lui même (GAFFARD [1990]). Néanmoins le chemin parcouru l'a été de manière

¹³ R.NELSON et S.WINTER [1982] proposent le terme similaire de « trajectoire naturelle » (« *general natural trajectories* ») regroupant l'ensemble des principes de développement technologique communs à une majorité de trajectoires particulières.

endogène et irréversible, et seul un changement de paradigme peut entraîner un changement de trajectoire.

Nous avons vu dans cette première section, à travers quelques éléments factuels, comment les RCA ont contribué à faire progresser la trajectoire technologique des cellules fabriquées à partir du silicium mono et polycristallin. La méthodologie basée sur les RCA a la particularité d'expliquer la domination d'une technologie non pas seulement à partir d'une comparaison stricte des performances physiques des filières concurrentes (notamment les rendements de conversion), mais à partir des choix initiaux effectués par les agents économiques.

2. Compétition technologique entre filières et lock-in

Dans le cadre d'une compétition technologique entre deux filières l'existence de RCA va avoir pour principal effet d'altérer les conditions de la concurrence, et donc l'issue elle-même de la compétition qui peut déboucher sur une situation de *lock-in* en faveur de l'une des technologies. Il s'agit de montrer maintenant à travers la portée explicative du modèle de B.ARTHUR [1989] de quelle manière les RCA peuvent introduire un biais dans l'équilibre du marché des cellules PV.

Le cadre général du modèle de B.ARTHUR

B.ARTHUR a élaboré un cadre analytique général applicable aux situations de compétition technologique à partir des modèles de type "urne de POLYA" (« *POLYA process* »). Ce cadre repose sur deux propriétés : (i) les choix des agents entre deux technologies sont influencés par la distribution des choix antérieurs ; (ii) des "petits événements"¹⁴ externes peuvent influencer le processus de manière aléatoire. B.ARTHUR appelle alors un système dynamique qui intègre ces propriétés un « processus d'allocation¹⁵ ».

¹⁴ « *Small unknown events* » ou « *chance* » chez B.ARTHUR, « *historical accidents* » chez P.DAVID.

¹⁵ Un processus d'allocation correspond « à chaque moment de choix, à l'allocation d'une unité effectuée à une des K catégories, avec les probabilités respectives $p_1(x)$, $p_2(x)$... $p_k(x)$, où le vecteur des probabilités p est une fonction de x , lequel donne la proportion présente des unités dans les K catégories » (FORAY [1989]).

Le principe de l'urne de POLYA est le suivant : on place une balle noire et une balle blanche dans une urne de capacité infinie en se fixant comme objectif de la remplir de balles de l'une ou l'autre couleur. A chaque tour on tire une balle au hasard et on rajoute dans l'urne une balle de la même couleur. Ce processus sera dépendant à l'égard du sentier (*path-dependent*), c'est à dire qu'il présente un caractère stochastique doté d'une certaine forme de mémoire.

On peut le représenter à partir d'une séquence de choix binomiaux entre deux événements (A, B) dont les probabilités d'apparition au $n^{ième}$ tirage sont respectivement P_n et $(1 - P_n)$. Si E_i représente l'événement se produisant au $i^{ème}$ coup sa probabilité d'apparition s'écrit (LIEBOWITZ et MARGOLIS [1992]) :

$$P_{n+1} = F(P_n; E_n, E_{n-1}, E_{n-2}, \dots, E_1)$$

La propriété dite dépendante à l'égard du sentier sera constituée par les d derniers tirages quand la fonction F de probabilité prendra la forme suivante :

$$P_{n+1} = F(P_n; E_n, E_{n-1}, E_{n-2}, \dots, E_{n-d}) , \text{ si } d = 0 \text{ le processus est purement aléatoire.}$$

A chaque période la probabilité que la prochaine balle ajoutée soit noire est égale à la proportion de balles noires déjà dans l'urne. Le problème qui se pose est ensuite de savoir si ces proportions varient indéfiniment entre 0 et 1 ou si elles tendent vers une limite, ce qui déterminerait ainsi l'émergence d'une structure (*lock-in*). G.DOSI et *alii* [1994] reprennent la démonstration de POLYA vérifiant que la proportion de balles noires tend vers une limite X avec une probabilité 1, X étant une variable aléatoire uniformément distribuée entre 0 et 1. Ils considèrent ensuite le cas général dans lequel la probabilité est une fonction arbitraire des proportions de tous les types de balles et montrent également que le processus converge vers un des points fixes de la correspondance entre les proportions et la probabilité d'adoption.

Application du modèle général de B.ARTHUR à la compétition entre technologies de cellules PV

L'intérêt de l'application du modèle de B.ARTHUR [1989] à la compétition entre technologies est de permettre d'abord la formulation des conditions à partir desquelles une situation de verrouillage technologique peut apparaître à l'issue d'une compétition entre deux technologies à partir des choix réalisés par deux types d'agents économiques. Plus précisément, comme le souligne D.FORAY [1989], ce type de modèle, en s'appuyant sur la notion de RCA, aborde la compétition technologique comme un problème de localisation du progrès technique et de comportement d'adoption des utilisateurs potentiels.

Ainsi, pour le secteur des cellules solaires PV, lieu de la compétition entre les filières "silicium mono et polycristallin" (*Si*), et les filières "silicium amorphe/couches minces" (*Cm*), il sera possible d'apporter un éclairage sur le processus qui a conduit au niveau actuel de parts de marché de chacune des technologies, soit 79,9% pour le *Si* et 20,1% pour les *Cm* en 2000 (voir *Annexe 4*), et d'identifier l'évolution possible du secteur à moyen terme.

Les hypothèses de base du modèle concernent l'utilité que chaque type d'agent va retirer de chaque technologie :

- le choix d'une technologie est toujours possible ;
- les agents ont des comportements hétérogènes¹⁶, en ce sens qu'ils ont une préférence naturelle pour une des deux technologies ;
- chaque type d'agent considère que l'utilité de chaque technologie est proportionnelle au nombre d'adoptions déjà réalisé de cette technologie.

¹⁶ L'hétérogénéité des agents occupe une place centrale dans la méthodologie de l'approche évolutionniste. Contrairement à l'approche traditionnelle néoclassique la variété des comportements (des agents, des firmes) participent ici de manière endogène à la dynamique du système et à son changement par le biais de la notion d'apprentissage qui est considérée comme spécifique à chaque agent économique.

Soit la fonction de rendement (d'adoption) : $R_I^J = I_J + if(n_J)$

avec R_I^J le rendement de la technologie J , pour le prochain agent de type I , compte tenu de sa préférence naturelle I_J et des comportements d'adoption passés $f(n_J)$ corrigés des rendements d'adoption croissants i ($i > 0$).

Soit deux types d'agents A et B distingués par leurs préférences naturelles respectives pour les technologies S_i (silicium cristallin) et C_m (silicium amorphe et autres couches minces).

Les fonctions de rendement associées à l'utilisation de S_i et de C_m , compte tenu des préférences naturelles des agents A et B et des niveaux antérieurs d'adoption, peuvent être écrites (ARTHUR [1989]) :

- pour les agents A : $R_A^{S_i} = A_{S_i} + af(n_{S_i})$ et $R_A^{C_m} = A_{C_m} + af(n_{C_m})$
- pour les agents B : $R_B^{S_i} = B_{S_i} + bf(n_{S_i})$ et $R_B^{C_m} = B_{C_m} + bf(n_{C_m})$

avec $A_{S_i} > A_{C_m}$, préférence naturelle des agents A pour S_i , et $B_{C_m} > B_{S_i}$, préférence naturelle des agents B pour C_m , $a > 0$ et $b > 0$ les rendements d'adoption croissants.

Chaque agent nouvel arrivant devant choisir une des deux technologies va, selon l'hypothèse des rendements croissants, voir son choix influencé par l'état du marché (du secteur technologique). **Les conditions selon lesquelles l'une des technologies, par exemple S_i , sera choisie en fonction du type d'agent sont :**

- $\Delta n > \frac{(A_{C_m} - A_{S_i})}{a}$ pour les agents A (1)

$$- \Delta n > \frac{(B_{C_m} - B_{S_i})}{b} \text{ pour les agents } B \quad (2)$$

Avec :

- $f(n_{S_i})$ et $f(n_{C_m})$ le nombre de choix qui se sont portés respectivement sur S_i et C_m après un nombre total d'entrées n ,

- $\Delta n = f(n_{S_i}) - f(n_{C_m})$ la différence entre les parts de marché occupées par chacune des technologies,

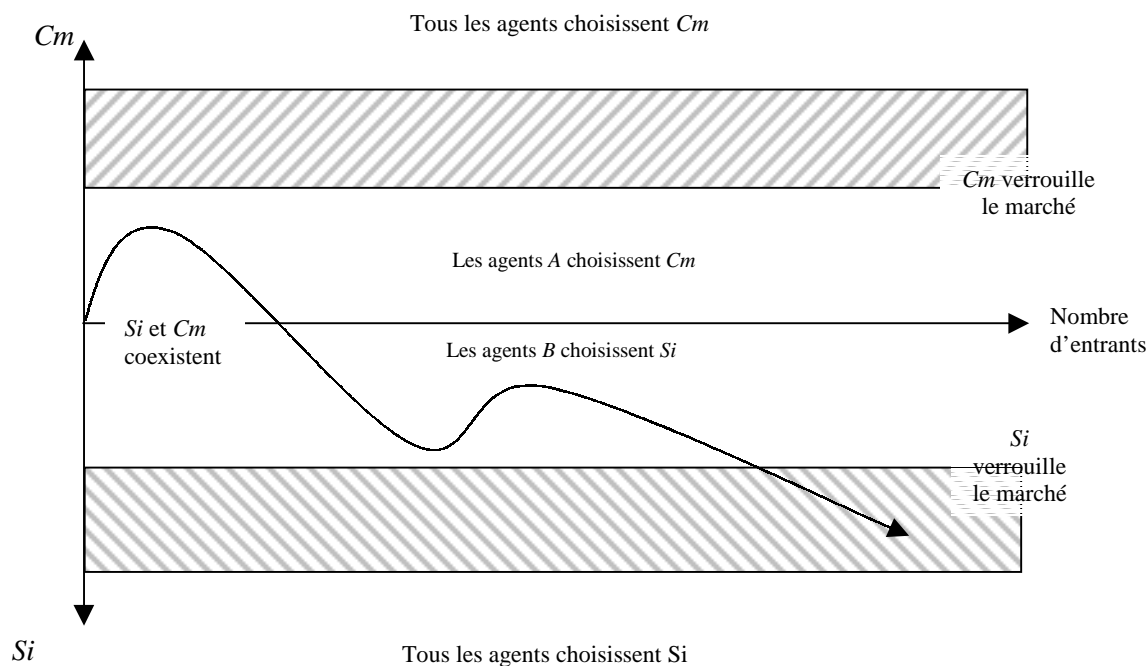
$$- \Lambda_a = \frac{(A_{C_m} - A_{S_i})}{a} \text{ et } \Lambda_b = \frac{(B_{C_m} - B_{S_i})}{b}$$

Dans l'inégalité (1) les agents A vont choisir la technologie S_i , les choix effectués antérieurement par les autres agents venant « conforter » leur préférence naturelle pour cette technologie. Par contre dans l'inégalité (2) les agents B , en présence de RCA, préféreront la technologie S_i quand le nombre d'utilisateurs de cette technologie sera suffisamment élevé par rapport au nombre d'utilisateurs de la technologie C_m , ce qui va à l'encontre de leur tendance naturelle. Dans ce cas le marché tendra bien vers une situation de *lock-in* en faveur de la technologie S_i (sa part de marché tendra vers 100%).

Ainsi les variables explicatives du modèle sont Δn , Λ_a , Λ_b et son comportement général s'articulera autour de trois cas de figure :

- si $\Delta n \geq \Lambda_b$ alors S_i sera toujours choisie ;
- si $\Lambda_a < \Delta n < \Lambda_b$ on se trouve dans une zone d'indétermination, chaque agent choisissant la technologie pour laquelle il a une préférence naturelle. Les deux technologies se partagent le marché ;
- si $\Lambda_a \geq \Delta n$ alors C_m sera toujours choisie.

Schéma 3. Représentation de la situation de verrouillage technologique pour les cellules PV.



Source : Adapté à partir de B.Arthur [1989].

Commentaire

Le graphique ci-dessus schématise une situation de *lock-in* comme résultat de la compétition entre les deux filières de cellules PV que nous avons différenciées (Si et Cm). L'oscillation observée en début de période (sur la gauche du graphique) correspond à une situation (temporaire) pendant laquelle les deux technologies concurrentes se partagent le marché. Une seule technologie (Si) emporte ensuite la plus grande part et verrouille le marché, ce qui compromet une certaine diversité technologique. La tendance asymptotique de la courbe est liée à l'ordre d'entrée aléatoire des utilisateurs potentiels d'une technologie caractérisés par leurs préférences naturelles. Selon B.ARTHUR l'ordre d'arrivée des utilisateurs est régi par des « événements inconnus ». P.DAVID [1985] les appelle des « accidents historiques¹⁷ ». Ces événements ont pour conséquence de produire un effet de localisation du progrès technique sur une technologie dès le début de la compétition. Ils peuvent être représentés par exemple par des décisions étatiques (une commande publique), par l'expérience technologique, les stratégies des firmes ou par l'apparition simultanée d'un grand nombre d'utilisateurs ayant les mêmes préférences naturelles. Comme dans le cas des

¹⁷ Historiques dans le sens d'un processus dynamique, non dans le sens de l'Histoire.

commandes publiques des réacteurs nucléaires aux Etats-Unis étudié par R.COWAN [1988], les premières commandes publiques de cellules PV effectuées par la NASA à la fin des années 1950 illustre bien ce type d'événement. Elles ont contribué très tôt à développer les cellules au silicium cristallin créant ainsi une sorte « d'orbite gravitationnelle » (FORAY [1989]) de laquelle les autres applications du PV ont depuis des difficultés à sortir. Cependant, dans le contexte de déréglementation des marchés susceptible d'inciter le développement d'une production d'électricité décentralisée, les stratégies actuelles des firmes déjà présentes ou entrantes dans le secteur des cellules PV, pourraient à moyen terme aboutir à une contestation de la domination technologique du silicium cristallin. L'observation des chiffres concernant les brevets déposés par type de technologie PV par les principaux fabricants au Japon et aux Etats-Unis de 1990 à 1998 révèle que la majorité d'entre eux concerne les cellules à base de silicium amorphe (*Voir annexe 6*). On peut relever que parmi ces groupes figurent la plupart des fabricants japonais d'électronique, dont Canon, qui en tant que nouvel acteur dans ce domaine s'est montré particulièrement actif¹⁸.

3. Conclusion : propriétés du modèle d'Arthur et rôle des politiques publiques

Le but de ce cahier était d'aborder le secteur industriel des cellules PV sous l'angle de la compétition technologique. Nous nous sommes servi pour cela du modèle évolutionniste proposé par B.ARTHUR pour expliquer comment une technologie, en dehors du strict attrait de ses performances physiques, était conduite à supplanter les technologies concurrentes.

La technologie utilisée par les cellules PV à base de silicium cristallin constitue désormais un *dominant design*, c'est à dire une forme de standard technologique. Elle a atteint depuis les années 1990 la phase de croissance qui est marquée par l'allongement des séries de production et la baisse des coûts, même si ces derniers semblent toucher un niveau plancher ces dernières années, signe d'un essoufflement des effets d'apprentissage. Ces derniers associés aux économies d'échelle correspondent au premier type de rendements croissants d'adoption servant de fondement au modèle de B.ARTHUR. Il distingue également les externalités de réseau, les rendements croissants informationnels et les interrelations

¹⁸ Canon a déposé 139 brevets concernant le silicium amorphe au Japon, 31 aux Etats-Unis à travers United Solar Technologies, sa filiale commune avec Energy Conversion Devices.

technologiques. La présentation simplifiée du modèle et de ses hypothèses a ensuite montré comment une compétition pouvait aboutir à un état de verrouillage technologique. **Il nous semble opportun de rappeler maintenant les quatre grandes propriétés de ce type de processus de compétition basé sur les RCA :**

- **le processus est *path-dependent* :** c'est à dire que l'issue finale de la compétition est conditionnée par les choix des agents et les événements intervenus à son commencement ;
- **le résultat de la compétition est non prédictible :** il ne peut pas être prédit au début du processus à partir des seules connaissances acquises sur les deux technologies ;
- **la possible inefficience de la technologie dominante :** au commencement de la compétition les "petits événements" orientent le progrès technique sur une technologie avant que ses véritables capacités de développement ne soient réellement connues. P.DAVID [1985] a montré que le clavier de type QWERTY, pourtant moins efficient que les autres, avait été sélectionné comme standard.
- **le processus est inflexible :** à partir d'une certaine période le *lock-in* sur l'une des deux technologies est irréversible. Par la suite, quelles que soient les préférences naturelles d'un utilisateur il ne choisira pas la technologie évincée. D.FORAY [1989] rajoute à cette propriété une hypothèse qui nous paraît importante, concernant la stabilité des prix relatifs. On peut en effet penser qu'une modification des prix relatifs des deux technologies serait de nature à remettre en question l'inflexibilité du *lock-in*.

Cette dernière propriété nous conduit à nous poser la question de la gestion, au travers des politiques publiques technologiques et industrielles, des conditions permettant d'éviter ou de sortir d'un *lock-in*. Ces conditions sont étroitement liées au type de RCA qui ont conduit à la sélection d'une technologie. D.FORAY [1989] distingue dans la progression d'une technologie les améliorations qui portent sur sa matérialité, c'est à dire sur ses conditions de production et d'utilisation, pour lesquelles le *lock-in* est quasi-irréversible, des externalités de réseau. Dans ce cas le verrouillage est lié à un problème de masse critique (le nombre d'utilisateurs) entraînant une sorte d'effet d'inertie, et la prédominance d'une technologie est réversible par l'adoption progressive d'un nouveau standard, même si des problèmes de coûts de conversion et de compatibilité peuvent retarder le changement.

Le problème des *policy makers* consiste à gérer optimalement l'incertitude liée aux avantages immédiats et aux rendements futurs de plusieurs technologies : dans quel sens vont évoluer leurs courbes d'expérience ? La politique technologique¹⁹ est ici confrontée au paradoxe de la "fenêtre étroite" (DAVID [1996]) : son action sera plus efficace au début du processus, avant le déclenchement des RCA, pendant une courte période où très peu d'informations sur les technologies concurrentes sont disponibles.

Malgré les difficultés rencontrées par les différentes méthodologies pour évaluer les externalités, il est reconnu que la production d'électricité solaire PV engendre des coûts externes faibles. Cet avantage par rapport aux énergies fossiles traditionnelles n'est pas reflété dans son prix et son coût privé (plus élevé) observé sur le marché est éloigné de son coût social. Dans la théorie économique des externalités le rapprochement du coût privé et du coût social des énergies fossiles s'opère par la réglementation (interdictions ou fixation de seuils d'émission), par l'application d'une taxe pigovienne (principe "pollueur-payeur") ou par l'établissement d'un marché de droits à polluer. Le coût privé du PV et des autres énergies renouvelables peut être diminué par l'octroi d'une subvention (de type PIGOU/COASE), dans un système de soutien direct ou indirect des prix payés aux producteurs. Celle-ci sera versée dans le but de peser sur la compétition entre les filières en favorisant la sélection d'une trajectoire technologique (en créant des "niches" et en soutenant ensuite la commercialisation). Le montant de la subvention devra être proportionnel au degré de verrouillage technologique.

Emanant de ces fondements théoriques, les différentes politiques publiques européennes de soutien aux énergies renouvelables reposent sur une gamme d'instruments plus ou moins incitatifs. On peut distinguer : les systèmes de quotas (les appels d'offre ou les enchères concurrentielles, et les certificats verts), les systèmes de prix garantis (*fixed feed-in tariff*) et primes fixes (*fixed premium scheme*) à l'achat établis par les Pouvoirs Publics et enfin diverses mesures d'exemptions fiscales (crédits d'impôts).

L'analyse des budgets publics alloués au secteur PV de 1994 à 1999 pour les vingt pays de l'IEA participant au "Photovoltaic Power Systems Programme", montre une nette

¹⁹ D. DUFOUR [1991] définit la politique technologique « *comme l'ensemble des procédures publiques de régulation des changements institutionnels induits par la compétition technologique.* »

augmentation des aides ces dernières années (480 millions de dollars en 1999), notamment celles destinées à stimuler le développement industriel commercial (systèmes de rachat de l'électricité produite à prix garantis) (IEA [2000]). Par contre la part consacrée à la R&D (200 millions de dollars) est relativement stable depuis 1994.

Pour conclure, on peut souligner que ces budgets sont affectés particulièrement au soutien des technologies les plus matures (silicium cristallin) afin d'essayer de réduire encore les coûts de production et franchir le cap de la phase industrielle et commerciale, tout en maintenant une veille technologique active sur les autres procédés prometteurs comme les couches minces.

Annexes

Annexe 1

Courbe d'expérience : Evolution 1979-2000 du prix de vente, de la production annuelle et de la production cumulée de modules photovoltaïques.

Années	Prix des modules 1998 \$/Wc	Production annuelle de modules (MWc)	Production cumulée (MWc)
1979	21,5	1,00	1,00
1980	17,0	1,00	2,00
1981	16,0	2,00	4,00
1982	14,5	5,00	9,00
1983	11,2	18,00	27,00
1984	11,0	20,00	47,00
1985	9,5	21,00	68,00
1986	9,0	23,00	91,00
1987	8,5	27,90	118,90
1988	7,8	33,90	152,80
1989	7,2	40,90	193,70
1990	7,0	46,50	240,20
1991	6,5	55,40	295,60
1992	6,0	57,90	353,50
1993	5,1	60,00	413,50
1994	4,9	69,40	482,90
1995	4,4	77,50	560,40
1996	4,1	88,65	649,05
1997	3,7	125,80	774,85
1998	3,5	154,90	929,75
1999	3,3	199,90	1 129,65
2000	3,1	288,55	1 418,20

*Source C.HARMON [2000], P.MENANTEAU [2000], Baromètres PV 2000 et 2001
Systèmes Solaires n°136-2000 et n°142-2001, site Internet www.agores.org.*

Annexe 2

Projection du taux de croissance actuel (40%) de production de cellules PV

Années	Production	Production cumulée
2000	288,55	1 418,20
2001	403,97	1 822,17
2002	565,56	2 110,72
2003	791,78	2 514,69
2004	1 108,49	3 080,25
2005	1 551,89	3 872,03
2006	2 172,65	4 980,52
2007	3 041,71	6 532,41
2008	4 258,39	8 705,06
2009	5 961,75	11 746,77
2010	8 346,44	16 005,16
2011	11 685,02	21 966,90
2012	16 359,03	30 313,35
2013	22 902,64	41 998,37
2014	32 063,70	58 357,39
2015	44 889,17	81 260,03
2016	62 844,84	113 323,73

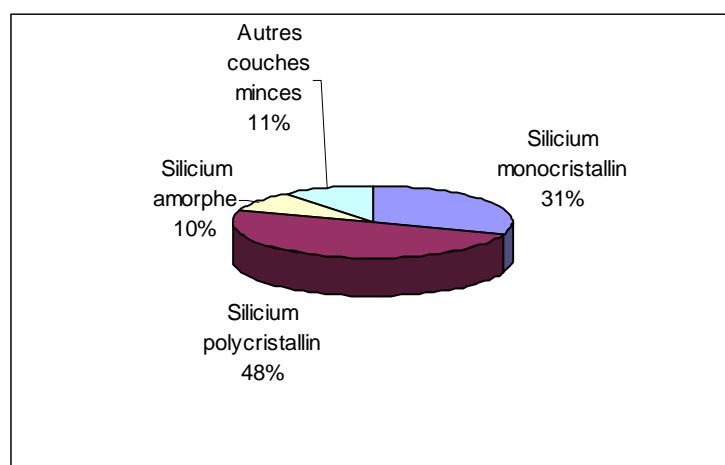
Annexe 3

Projection de la courbe d'expérience sur l'évolution du prix des modules PV

Doublements de la production	Production (MWc)	Prix \$ / Wc TE 26%	Prix \$ / Wc TE 20%
0	1 418,20	3,10	3,10
1	2 836,40	2,29	2,48
2	5 672,80	1,70	1,98
3	11 345,60	1,26	1,59
4	22 691,20	0,93	1,27
5	45 382,40	0,69	1,02
6	90 764,80	0,51	0,81
7	181 529,60	0,38	0,65
8	363 059,20	0,28	0,52
9	726 118,40	0,21	0,42

Annexe 4

Production de cellules PV par technologie en 2000



Source : Le baromètre photovoltaïque – Systèmes Solaires n°142-2001.

Annexe 5

Production des dix principales firmes PV par technologie en 2000 (MWc)

Firmes	Lieux de production	Si Mono	Si Multi	Si amorphe	Couches minces	Total
Sharp	Japon		50,40			50,40
Kyocera	Japon		42,00			42,00
BP Solar	Total	18,60	19,29	3,96		41,85
	Etats-Unis	0,94	15,57	3,96		20,47
	Espagne	9,16				9,16
	Australie	2,04	3,72			5,76
	Inde	6,46				6,46
Siemens Solar	Etats-Unis	28,00				28,00
Astropower	Etats-Unis	18,00				18,00
Sanyo	Japon	17,00				17,00
ASE	Total				13,85	13,85
	Allemagne				9,85	9,85
	Etats-Unis				4,00	4,00
Photowatt	France		12,70			12,70
Mitsubishi	Japon	11,10				11,10
Isophoton	Espagne	9,50				9,50

Source : Le baromètre photovoltaïque – Systèmes Solaires N°142 – 2001.

Annexe 6

Brevets concernant les cellules PV déposés par les principaux fabricants entre 1990 et 1998 aux Etats-Unis et au Japon.

Firmes	Pays	Nbre de brevets déposés	Technologies concernées
Canon	Japon	139	Silicium amorphe
Siemens	Allemagne et Etats-Unis	46	Silicium cristallin, Couches minces
Sanyo	Japon	39	Silicium amorphe, Silicium cristallin
Mitsubishi	Japon	38	Silicium cristallin, Couches minces
United Solar Technologies	Etats-Unis	31	Silicium amorphe
Sharp	Japon	24	Silicium amorphe
ASE	Etats-Unis	22	Silicium en rubans
BP Solar	Etats-Unis	19	Silicium amorphe
Matsushita	Japon	17	Couches minces
Fuji	Japon	16	Silicium amorphe
Semiconductor	Japon	16	Silicium amorphe
Energy Lab.			
Texas Instruments	Etats-Unis	15	Silicium en sphères
Kanegafuchi	Japon	12	Silicium amorphe

Source : United State Patent and Trademark Office, extrait du site Internet : www.uspto.gov

Bibliographie

- ANDERSON B., JACOBSON S. [2000], « Monitoring and assessing technology choice : the case of solar cells », *Energy Policy* n°28, pp. 1037-1049.
- ARROW K. [1962], « The economic implications of learning by doing », *Review of Economics Studies*, vol. 29, pp. 155-173.
- ARTHUR B. [1988], « Competing technologies : an overview », in DOSI, FREEMAN, NELSON, SILVERBERG, SOETE (Eds), *Technical change and economic theory*, Londres et New York, Pinter Publishers, pp. 590-607.
- ARTHUR B. [1989], « Competing technologies, increasing returns and lock-in », *Economic Journal* n°99, pp. 116-131.
- AUBIN C., NOREL P. [2000], « Economie internationale. Faits, théories et politiques. », Editions du Seuil.
- BOSTON CONSULTING GROUP [1980], « Les mécanismes fondamentaux de la compétitivité », Hommes et Techniques, Suresnes.
- BOURGEOIS B., FINON D., MARTIN J.-M. [2000], « Energie et changement technologique », *Economica*.
- CHOU C., SHY O. [1990], « Network effects without network externalities », *International Journal of Industrial Organization*, vol. 8, pp. 259-270.
- CLAVERIE A. [2001], « Electricité solaire photovoltaïque – Etat de l’art », Agence de l’Environnement et de la Maîtrise de l’Energie (ADEME), Edition 2001-03.
- COWAN R. [1988], « Nuclear power reactors : a study in technological lock-in », New York University.
- COWAN R. [1991], « Rendements croissants d’adoption et politique technologique », in L’évaluation économique de la recherche et du changement technique, sous la direction de J. BANDT, D. FORAY, Editions du CNRS, pp. 381-398.
- DAVID P. [1985], « Clio and the economics of QWERTY », *American Economic Review* n°75, pp. 332-337.
- DAVID P. [1996], « Standardization, diversity and learning : strategies for the coevolution of technology and industrial capacity », *International Journal of Industrial Organization* n°14, pp. 181-201.
- DOSI G. [1982], « Technological paradigms and technological trajectories », *Research Policy* n°11, pp. 147-162.
- DOSI G. [1988], « Sources, procedures, and microeconomic effects of innovation », *Journal of Economic Literature*, Vol. XXVI September, pp. 1120-1171.
- DOSI G., ERMOLIEV Y., KANIOVSKI Y. [1994], « Generalized urn schemes and technological dynamics », *Journal of Mathematical Economics* n°23, pp. 1-23.

- DUFOUR D. [1991], « Les politiques technologiques : une nouvelle rationalité de l'intervention publique dans le système productif », *in* L'évaluation économique de la recherche et du changement technique, sous la direction de J. BANDT, D. FORAY, Editions du CNRS, pp. 355-379.
- EQUER B., PERCEBOIS J. [1993], « Energie solaire photovoltaïque », Volume 2 Aspects socio-économiques, Editions Ellipses/UNESCO.
- FORAY D. [1989], « Les modèles de compétition technologique. Une revue de littérature. », *Revue d'Economie Industrielle* n°48, 2^{ème} trimestre, pp. 16-34.
- FORAY D. [1996], « Diversité, sélection et standardisation : les nouveaux modes de gestion du changement technique », *Revue d'Economie Industrielle* n°75, pp. 257-274.
- GAFFARD J.L. [1990], « Economie industrielle et de l'innovation », Dalloz.
- GAFFARD J.-L. [1990], « Innovations et changements structurels », *Revue d'Economie Politique* N°3, pp. 325-382.
- GRITSEVSKYI A., NAKICENOVIC N. [2000], « Modeling uncertainty of induced technological change », *Energy Policy* n°28, pp. 907-921.
- HARMON C. [2000], « Experience curves of photovoltaic technology », IIASA Interim report.
- IEA [1991], «Energy policies and programmes of IEA countries », International Energy Agency, OECD, Paris.
- IEA [2000], « Trends in photovoltaic applications in selected IEA countries », Photovoltaic Power System Program.
- IEA [2000], « Experience curves for energy technology policy », IEA/OCDE, Paris.
- KATZ M., SHAPIRO C. [1985], « Network externalities, competition and compatibility », *American Economic Review* n°75, pp. 424-440.
- LIEBOWITZ S., MARGOLIS E. [1992], « Path-dependence, lock-in and history », *Journal of Law, Economics and Organisation*, 11(1), april, pp. 205-226.
- MC DONALD A., SCHRATTENHOLZER L. [2001], « Learning rates for energy technologies », *Energy Policy* n°29, pp. 255-261.
- MENANTEAU P. [2000], « Learning from variety and competition between technological options for generating photovoltaic electricity », *Technological forecasting and social change*, vol.63, n°1.
- MULLER J.C., DESSERRIERES R. [2001], « Conversion photovoltaïque », *la Lettre des Clubs CRIN* n°43.
- NEIJ L. [1997], « Use of experience curves to analyse the prospects for diffusion and adoption of renewable energy technology », *Energy Policy* vol.23, n°13, pp.1099-1107.
- NELSON R., WINTER S.[1982], « An evolutionary theory of technical change », Cambridge Harvard University Press.

- PERROT A. [1995], « L'ouverture à la concurrence dans les réseaux. L'approche stratégique de l'économie des réseaux. », *Economie et Prévision* n°119, pp. 59-70.
- PONSSARD J.P. [1988], « Stratégie d'entreprise et économie industrielle », Broché.
- RICAUD A. [1997], « Photopiles solaires », Presses polytechniques et universitaires romandes.
- ROSENBERG N. [1982], « Inside the black box : technology and economics », Cambridge University Press.
- VERNON R. [1966], « International investment and international trade in the product cycle », *Quarterly Journal of Economics* n°80, pp.190-207.
- WRIGHT T. [1936], « Factors affecting the costs of airplanes », *Journal of the Aeronautical Sciences* n°3, pp. 122-128.

LISTE DES CAHIERS DE RECHERCHE CREDEN*

- 95.01.01** *Eastern Europe Energy and Environment : the Cost-Reward Structure as an Analytical Framework in Policy Analysis*
Corazón M. SIDDAYAO
- 96.01.02** *Insécurité des Approvisionnements Pétroliers, Effet Externe et Stockage Stratégique :l'Aspect International*
Bernard SANCHEZ
- 96.02.03** *R&D et Innovations Technologiques au sein d'un Marché Monopolistique d'une Ressource Non Renouvelable*
Jean-Christophe POUDOU
- 96.03.04** *Un Siècle d'Histoire Nucléaire de la France*
Henri PIATIER
- 97.01.05** *Is the Netback Value of Gas Economically Efficient ?*
Corazón M. SIDDAYAO
- 97.02.06** *Répartitions Modales Urbaines, Externalités et Instauration de Péages : le cas des Externalités de Congestion et des «Externalités Modales Croisées»*
François MIRABEL
- 97.03.07** *Pricing Transmission in a Reformed Power Sector : Can U.S. Issues Be Generalized for Developing Countries*
Corazón M. SIDDAYAO
- 97.04.08** *La Dérégulation de l'Industrie Electrique en Europe et aux Etats-Unis : un Processus de Décomposition-Recomposition*
Jacques PERCEBOIS
- 97.05.09** *Externalité Informationnelle d'Exploration et Efficacité Informationnelle de l'Exploration Pétrolière*
Evariste NYOUKI
- 97.06.10** *Concept et Mesure d'Equité Améliorée : Tentative d'Application à l'Option Tarifaire "Bleu-Blanc-Rouge" d'EDF*
Jérôme BEZZINA
- 98.01.11** *Substitution entre Capital, Travail et Produits Energétiques : Tentative d'application dans un cadre international*
Bachir EL MURR

* L'année de parution est signalée par les deux premiers chiffres du numéro du cahier.

- 98.02.12** *L'Interface entre Secteur Agricole et Secteur Pétrolier : Quelques Questions au Sujet des Biocarburants*
Alain MATHIEU
- 98.03.13** *Les Effets de l'Intégration et de l'Unification Économique Européenne sur la Marge de Manœuvre de l'État Régulateur*
Agnès d'ARTIGUES
- 99.09.14** *La Réglementation par Price Cap : le Cas du Transport de Gaz Naturel au Royaume Uni*
Laurent DAVID
- 99.11.15** *L'Apport de la Théorie Économique aux Débats Énergétiques*
Jacques PERCEBOIS
- 99.12.16** *Les biocombustibles : des énergies entre déclin et renouveau*
Alain MATHIEU
- 00.05.17** *Structure du marché gazier américain, réglementation et tarification de l'accès des tiers au réseau*
Laurent DAVID et François MIRABEL
- 00.09.18** *Corporate Realignments in the Natural Gas Industry : Does the North American Experience Foretell the Future for the European Union ?*
Ian RUTLEDGE et Philip WRIGHT
- 00.10.19** *La décision d'investissement nucléaire : l'influence de la structure industrielle*
Marie-Laure GUILLERMINET
- 01.01.20** *The industrialization of knowledge in life sciences Convergence between public research policies and industrial strategies*
Jean Pierre MIGNOT et Christian PONCET
- 01.02.21** *Les enjeux du transport pour le gaz et l'électricité : la fixation des charges d'accès*
Jacques PERCEBOIS et Laurent DAVID
- 01.06.22** *Les comportements de fraude fiscale : le face-à-face contribuables – Administration fiscale*
Cécile BAZART
- 01.06.23** *La complexité du processus institutionnel de décision fiscale : causes et conséquences*
Cécile BAZART
- 01.09.24** *Droits de l'homme et justice sociale. Une mise en perspective des apports de John Rawls et d'Amartya Sen.*
David KOLACINSKI
- 01.10.25** *Compétition technologique, rendements croissants et lock-in dans la production d'électricité d'origine solaire photovoltaïque.*
Pierre TAILLANT