

## Arnaud de la Tour, Matthieu Glachant, Yann Ménière

Les trois auteurs sont chercheurs au Cerna, MINES ParisTech, 60 boulevard Saint Michel, 75006 Paris, FRANCE

E-mails: [adelatou@mines-paristech.fr](mailto:adelatou@mines-paristech.fr); [matthieu.glachant@mines-paristech.fr](mailto:matthieu.glachant@mines-paristech.fr);  
[yann.meniere@mines-paristech.fr](mailto:yann.meniere@mines-paristech.fr)

Tel.: +33 (0)1 40 51 92 98

Fax: +33 (0)1 40 51 92 98

### Résumé

La Chine est devenue en quelques années le premier producteur mondial de panneaux solaires. Elle a produit plus d'un tiers des panneaux fabriqués dans le monde en 2008, et en a exporté 95%. Le but de cet article est de comprendre les facteurs ayant permis ce développement spectaculaire, mais aussi d'en éclairer les limites, en accordant une attention particulière à l'innovation et aux transferts de technologie. L'analyse proposée s'appuie d'une part sur une base de données de 79.642 brevets liés à l'industrie photovoltaïque, d'autre part sur une enquête de terrain réalisée auprès de professionnels de cette filière en Chine. Nous montrons que les entreprises chinoises ont acquis la technologie nécessaire pour entrer dans l'industrie solaire photovoltaïque par deux moyens principaux : l'achat de lignes de production clef en main sur un marché concurrentiel de fournisseurs d'équipements dans les pays industrialisés, et la disponibilité de cadres qualifiés au sein de la Diaspora chinoise, lesquels ont fondé les premières entreprises du pays. A contrario, les principaux verrous technologiques auxquels sont encore confrontés les industriels chinois concernent des procédés protégés par le secret, pour lesquels il n'existe pas de marchés d'équipements concurrentiels. Dans ce contexte, l'effort d'innovation

chinois est principalement mené par l'Etat, et vise à rattraper les pays développés dans les segments technologiques où l'industrie chinoise est encore peu présente.

Mots clefs: Transferts de technologie; Chine; Solaire; photovoltaïque

---

Nous remercions L'agence Française de Développement qui a financé cette étude ainsi que toutes les personnes interviewées qui y ont contribué.

## Introduction

Il est désormais établi au sein de la communauté internationale que la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) nécessite une large diffusion des technologies faiblement émettrices en GES<sup>1</sup>. La notion de diffusion de technologie reste toutefois ambiguë dans les négociations, comme le prouve la création d'un groupe de travail spécialement consacré à cette question<sup>2</sup>. Elle peut en effet évoquer aussi bien le déploiement de produits à contenu technologique – tels que des panneaux solaires ou des turbines d'éoliennes – que le transfert des connaissances techniques nécessaire à la fabrication de ces produits. La première interprétation est la plus immédiate dès lors qu'il s'agit de réduire les émissions de GES. La seconde a toutefois la faveur de pays en voie de développement soucieux de promouvoir leurs propres industries vertes. Elle explique notamment leur hostilité vis à vis du droit de la propriété intellectuelle, dans lequel ils voient un obstacle au transfert de connaissances.

Le développement de l'industrie photovoltaïque chinoise est particulièrement intéressant à étudier dans ce contexte, car à rebours des idées reçues. En 2009, la Chine avait en effet tout juste commencé à déployer des panneaux solaires sur son territoire. La même année, elle produisait néanmoins plus d'un tiers des cellules et modules photovoltaïques fabriqués dans le monde, alors

---

<sup>1</sup> L'article 4.5 de la Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique (CCNUCC) stipule par exemple que: "The developed country Parties and other developed Parties included in Annex II shall take all practicable steps to promote, facilitate and finance, as appropriate, the transfer of, or access to, environmentally sound technologies and know-how to other Parties, particularly developing country Parties, to enable them to implement the provisions of the Convention. In this process, the developed country Parties shall support the development and enhancement of endogenous capacities and technologies of developing country Parties. Other Parties and organizations in a position to do so may also assist in facilitating the transfer of such technologies." (c.f. [http://unfccc.int/essential\\_background/convention/background/items/1362.php](http://unfccc.int/essential_background/convention/background/items/1362.php))

<sup>2</sup> Comme le "groupe d'experts sur les transferts de technologie" (c.f. [http://unfccc.int/essential\\_background/convention/convention\\_bodies/constituted\\_bodies/items/2581.php](http://unfccc.int/essential_background/convention/convention_bodies/constituted_bodies/items/2581.php))

qu'elle n'était encore qu'un acteur marginal en 2003. Ainsi les deux interprétations de la diffusion des technologies peuvent être découplées. Le transfert de connaissances n'implique pas nécessairement le déploiement des technologies sobres en carbone dans les pays du Sud ; et il dépend de facteurs qui lui sont propres.

L'objectif de cette étude est de comprendre comment l'industrie chinoise est parvenue en quelques années à acquérir et maîtriser des technologies (c'est-à-dire des connaissances et des savoir-faires) initialement développées par ses concurrents occidentaux et japonais, jusqu'à s'imposer comme l'un des acteurs majeurs de l'industrie solaire photovoltaïque. Les questions auxquelles cette étude cherche à répondre sont les suivantes. Comment les entreprises chinoises ont-elles acquis le savoir faire technologique pour produire dans cette industrie ? La protection de la propriété intellectuelle a-t-elle été un frein dans ce développement ? La Chine est-elle capable d'innover ? A travers ces questions, l'objectif est d'éclairer les mécanismes économiques présidant à la circulation internationale des technologies, et ainsi de contribuer à mieux concevoir les politiques visant à favoriser la diffusion de technologies propres dans les pays en voie de développement.

Nous nous appuyons sur des analyses aussi bien qualitatives que quantitatives. Les éléments quantitatifs consistent en une base de données que nous avons construite à partir de 79.642 brevets portant sur l'industrie photovoltaïque, permettant d'analyser l'innovation et les transferts de technologie entre les différents pays, pour chaque segment de cette industrie. Cette analyse quantitative est éclairée par des interviews d'acteurs de l'industrie photovoltaïque Chinoise<sup>3</sup>, qui nous ont permis de comprendre les spécificités du cas chinois, ainsi que d'appréhender la complexité de l'innovation et des transferts de technologie dans ce secteur.

L'étude s'appuie également sur la littérature portant sur l'industrie photovoltaïque. Cela inclut des rapports publiés par des organismes publiques (comme European Commission PV status report 2003, 2005, 2008, and 2009 ; IEA, 2009 ; REDP, 2008), des associations d'industrie (EPIA, 2009 ; REN21, 2008), ou des cabinets de conseil (McKinsey, 2008), ainsi qu'une littérature académique comme Yanga et al. (2003) et Marigo (2007).

L'article est organisé en quatre parties. La première partie présente la position de la Chine dans la chaîne de valeur de l'industrie photovoltaïque. La seconde partie propose une analyse détaillée des différents canaux par lesquels la technologie circule depuis les pays développés vers la Chine.

---

<sup>3</sup> La liste des acteurs interviewés est indiquée est dans l'Annexe 1.

La troisième partie est consacrée à l'innovation dans les entreprises photovoltaïques Chinoise. Les conclusions de l'étude sont présentées dans la quatrième partie.

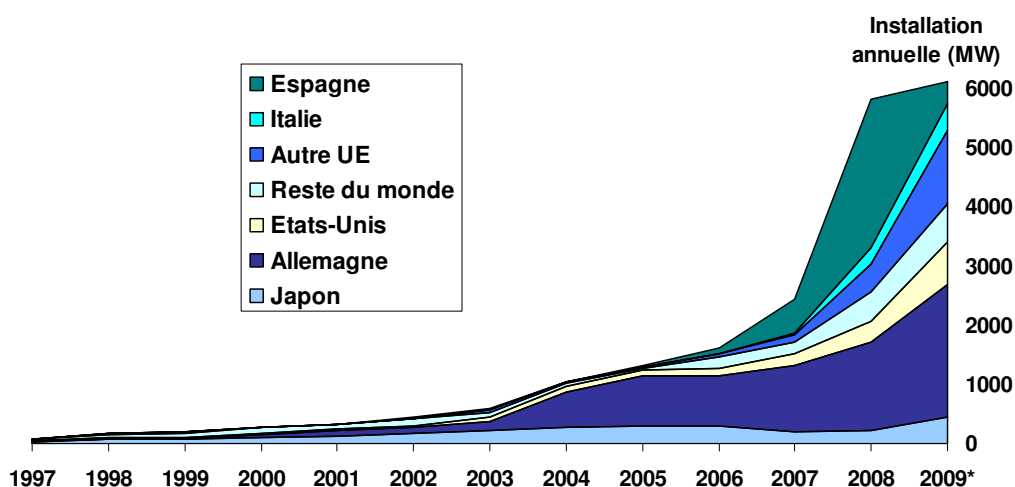
## **1 L'industrie photovoltaïque**

Cette partie présente l'organisation industrielle de l'industrie solaire photovoltaïque. Elle vise à positionner l'industrie chinoise à l'échelle mondiale et à mettre en perspective son développement rapide.

### **1.1 La demande**

L'installation massive de systèmes photovoltaïques reliés au réseau électrique est un phénomène récent. Avant la fin des années 90, les panneaux solaires étaient installés pour alimenter des appareils non connectés au réseau tels les appareils de communication, ou les habitations isolées, pour lesquels l'électricité photovoltaïque était compétitive par rapport aux autres sources d'électricité décentralisée. Comme le montre la figure 1, le marché photovoltaïque a dépassé les 100 MW en 1997 et a connu une croissance exponentielle depuis 2003, avec un taux de croissance annuelle de 45% sur la période 2003-2009. Cette accélération est principalement due à l'installation de systèmes photovoltaïques reliés au réseau dans les pays développés. Si en 1996, seulement 7.9% de ces systèmes étaient connectés au réseau, ce chiffre atteint 80% en 2007 (REN21, 2008)

**Figure 1 Installation annuelle de panneaux solaires de 1997 à 2009**



Source IEA, 2009 and EPIA, 2009. \* Pr evision.

Cette augmentation spectaculaire de l'installation de panneaux solaires a été possible grâce à la subvention de la demande par des politiques incitatives, initialement mises en place dans un petit nombre de pays développés (Japon, Allemagne, Espagne, et Etats-Unis). En effet, l'électricité d'origine photovoltaïque ne peut pas concurrencer les autres sources sur le réseau électrique car son coût de production reste élevé. Elle n'est donc pas utilisée en l'absence d'incitation économique.

Outre différents types de réductions d'impôts, les principales politiques visant à stimuler l'utilisation d'énergies renouvelables sont les tarifs de rachat et les *Renewable Portfolio Standards* (RPS). Les tarifs de rachat obligent les distributeurs d'électricité à acheter une énergie d'origine renouvelable à un prix fixe défini par le gouvernement. Ils sont utilisés pour promouvoir l'électricité d'origine photovoltaïque depuis 1994 au Japon et depuis 2000 en Allemagne, ce qui explique le développement précoce et durable du marché dans ces deux pays (figure 1). L'Espagne a également mis en place un tarif de rachat en 2006. Mais celui-ci, trop généreux,   entrainé le développement d'un nombre excessif de projets, conduisant le gouvernement Espagnol à fixer en 2008 un plafond de 500MW par ans pour l'installation de systèmes photovoltaïques.

Ces tarifs de rachat ont été utilisés dans la majorité des pays développés. Les Etats-Unis ont toutefois opté pour une politique de RPS. Celle-ci oblige les distributeurs d'électricité à se fournir en électricité d'origine renouvelable à hauteur d'un certain pourcentage, les types d'énergies

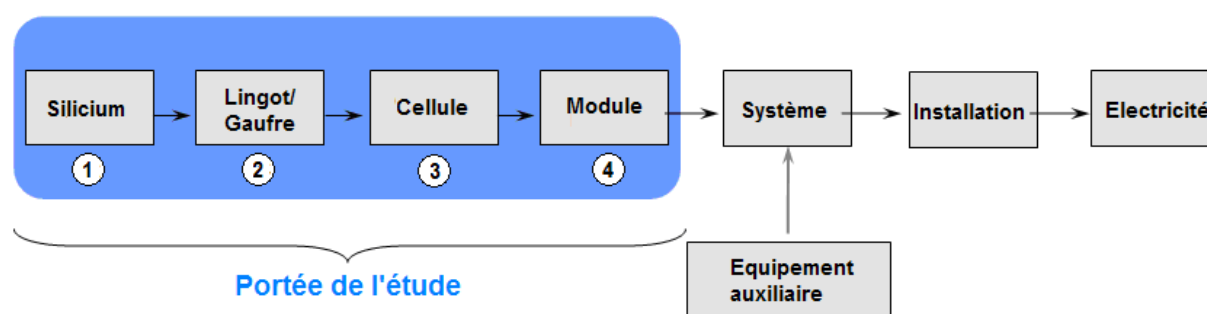
renouvelables pouvant être spécifiés. Dans cette approche *top-down*, c'est donc une quantité plutôt qu'un prix qui est fixée.

En revanche, il n'existe presque pas de politique incitative visant à promouvoir l'électricité photovoltaïque dans les pays émergents. La priorité de ces pays est en effet d'obtenir l'électricité la moins chère possible pour soutenir leur développement rapide. En particulier, la Chine ne représentait que 2.2% de la capacité de production d'électricité photovoltaïque en 2009 (EPIA 2010).

## 1.2 La chaîne de valeur de l'industrie photovoltaïque

La figure 2 représente la chaîne de valeur de l'industrie photovoltaïque. Dans cette étude, nous nous concentrons sur la production industrielle de panneaux solaires, impliquant 4 étapes brièvement décrites dans l'encadré 1 (purification du silicium, fabrication de gaufres de silicium, de cellules, puis de panneaux photovoltaïques). Cette partie amont représente 60% du coût global d'un système photovoltaïque. Le reste de coût est dû aux équipements auxiliaires comme les batteries, onduleurs etc., nécessaire pour produire de l'électricité directement utilisable une fois le système installé, ainsi qu'à l'installation des systèmes photovoltaïques, qui nécessite une main d'œuvre importante.

Figure 2 Chaîne de valeur de l'industrie photovoltaïque



Source: Auteurs

### **Encadré 1: Etapes de la fabrication de panneaux photovoltaïques**

La production de panneaux solaires implique cinq étapes, regroupées ici en quatre, les deuxième et troisième étapes étant rassemblées dans cette étude<sup>4</sup>. En voici une brève description, de nombreux procédés secondaires ne nécessitant pas d'être précisés pour cette étude.

1. Purification du silicium : Le silicium est obtenu à partir du quartz trouvé dans le sable. Le degré de pureté très élevé requis pour l'industrie photovoltaïque (>99.999%, cependant 10 fois moindre que pour l'industrie des semi-conducteurs) est obtenu grâce à des processus chimiques lourds et difficiles à maîtriser, qui consomment beaucoup d'énergie.

2. Production de lingots et gaufres de silicium cristallin : A partir du silicium purifié, des lingots de silicium monocristallins (un seul cristal) ou polycristallins (une multitude de cristaux plus petits) sont obtenus<sup>5</sup>. Les lingots sont ensuite découpés en de fines tranches de silicium, ou gaufres. Des impuretés sont ajoutées pour les doper positivement ou négativement.

3. Fabrication d'une cellule : Deux gaufres de silicium dopées de manière opposée sont assemblées pour former une « jonction p-n », à l'origine de l'effet photovoltaïque. Les contacts métalliques sont ensuite ajoutés, et des traitements de surface sont effectués pour augmenter l'efficacité des cellules.

4. Assemblage des panneaux : Des cellules sont assemblées, la jonction électrique étant effectuée à la main ou automatiquement. Ces cellules sont ensuite encapsulées entre deux plaques de verre pour former le module, qui sera cuit dans une machine à laminer.

Le tableau 1 présente les parts de marché de la Chine dans les différents segments de l'industrie. En 2008, la Chine était déjà au premier rang mondial dans la fabrication de cellules et de

---

<sup>4</sup> Ce regroupement est fréquent dans les études portant sur l'industrie photovoltaïque. La fabrication de lingot de silicium cristallin et leur découpage en gaufres sont en effet des activités très proches, tant au niveau des acteurs impliqués que des caractéristiques technico-économiques.

<sup>5</sup> Le silicium monocristallin permet de fabriquer des cellules photovoltaïques plus performantes, mais son procédé de fabrication consomme plus d'énergie et est donc plus onéreux que pour la technologie polycristalline. La technologie monocristalline étant plus ancienne, ses équipements sont donc moins chers et la technologie plus largement diffusée.

panneaux photovoltaïques (35%). Elle était suivie de l'UE (29%), du Japon (18%), et de Taïwan (12%). Cette domination de la Chine est récente : en 2003, sa part de marché n'était que de 1,6% (REDP, 2008).

A l'inverse, la Chine est quasiment absente des segments les plus en amont de l'industrie. Elle ne représentait que 2.5% de la production mondiale de silicium ultra pur en 2007 (Winegamer, 2009), alors que les Etats-Unis, l'Allemagne, et le Japon pesaient ensemble 80% de ce segment. Grâce à la création de nouvelles entreprises ou à des augmentations de capacité, la Chine prévoit toutefois une importante augmentation de sa production de silicium, avec un objectif de 15% de la production mondiale en 2010 (REDP, 2008). Cet effort est impulsé par le gouvernement, comme nous le montrerons par la suite. L'industrie chinoise suit un développement similaire dans la production de lingots et gaufres de silicium. Elle ne représente qu'une faible part de la production mondiale sur ces segments, mais sa production augmente rapidement, avec un taux de croissance moyen de 116% pour les lingots de silicium sur la période 2004-2007 (REDP, 2008).

**Tableau 1 Parts de marché de la Chine dans les différents segments de l'industrie photovoltaïque en 2007**

Segment	Part de marché de la Chine
Silicium	2.5%
Lingot et gaufre	< 5%
Cellule	27%
Panneau	

Source: Ruoss, 2007 ; REDP, 2008 ; Auteurs

Il est utile de faire un parallèle entre la position de la Chine dans les différents segments de la chaîne de valeur et les caractéristiques économiques de ces segments, en terme de concurrence, de barrière à l'entrée, de coûts, et de profits. Ces informations sont résumées dans le tableau 2. Il en ressort notamment que les segments en aval de la filière (fabrication de cellules et de modules photovoltaïques) dans lesquels l'industrie chinoise est particulièrement présente sont également les segments les plus concurrentiels. C'est en effet dans ces segments que le niveau de concentration de l'industrie est le plus faible (comme le montre l'indice HHI<sup>6</sup>), et les profits y sont plus faibles que dans les autres segments.

---

<sup>6</sup> Le HHI est la somme des carrés des parts de marché des entreprises les plus importantes de l'industrie. Cela représente donc la part de marché moyenne, pondérée par les parts de marché. Cet indice varie de 0 à



La forte présence chinoise dans les segments les plus concurrentiels s'explique principalement par la faiblesse des barrières technologiques à la fabrication de cellules et surtout de modules. Des lignes de production complètes (clé en main) sont en effet disponibles pour la production de cellules et modules – ce qui n'est pas le cas dans les segments plus en amont – permettant de démarrer la production sans savoir-faire particulier. Dans ces conditions, les entreprises chinoises ont pu profiter de leurs avantages comparatifs, principalement une énergie bon marché pour la fabrication de cellules<sup>7</sup>, et une main d'œuvre à faible coût pour l'assemblage des panneaux, pour pénétrer le marché. On peut noter que l'importance des investissements nécessaires pour produire des cellules n'a pas empêché les entreprises chinoises de se lancer dans cette activité.

En amont, le cas du silicium est très différent. La production de silicium purifié à un coût compétitif nécessite un important savoir faire lié à la maîtrise des paramètres des réactions chimiques. A l'heure actuelle les industriels chinois ne disposent pas d'un tel savoir-faire, et ne sont donc pas réellement compétitives sur ce marché. De telles barrières technologiques existent aussi dans une moindre mesure s'agissant de la production de lingots et gaufres de silicium.

**Tableau 2 Caractéristiques économiques des segments de l'industrie photovoltaïque en 2007**

Segment	% du coût d'un panneau <sup>a</sup>	Concentration du marché (HHI)	Investissement <sup>b</sup> (millions/USD)	Force de la barrière technologique	% du profit <sup>c</sup>
Silicium	13%	0.19	140	Forte	41%
Lingot et gaufre	27%	0.24	95	Moyenne/Forte	41%
Cellule	27%	0.04	125	Moyenne	11%
Module	33%	<0.04	25	Faible	7%

<sup>a</sup> Hors équipements auxiliaire et coût d'installation.

<sup>b</sup> Coût d'investissement pour une capacité de production annuelle de 1000 tonnes de silicium pour la purification, ou de 100MW pour les autres segments

<sup>c</sup> % des profits effectués sur la chaîne de valeur considérée

Sources: Ruoss, 2007, REDP 2008, adapté par les auteurs.

---

1. Un chiffre proche de zéro correspond à un marché très atomistique avec un grand nombre d'entreprises ayant de faibles parts de marché. Un chiffre égal à 1 correspond à une situation de monopole pur.

<sup>7</sup> Selon les cadres d'entreprises chinoises interviewées, la main d'œuvre représente 1-2% des coûts de fabrication d'un panneau solaire en Chine, alors que cette proportion est de 5-10% pour les pays développés.

## 2 Transferts de technologie vers la Chine

Nous avons vu dans la partie précédente que la Chine est le leader mondial dans la partie aval de l'industrie (fabrication de cellules et panneaux photovoltaïques), et qu'elle s'est donné pour objectif de gagner une part de marché importante dans les segments plus en amont et plus intensifs en technologie (purification du silicium, et production de lingots et gaufres de silicium cristallin). Nous montrons dans cette partie que ce développement spectaculaire a été possible grâce au transfert de technologies depuis les pays développés vers la Chine au cours des quinze dernières années. Nous présentons ici les principaux canaux par lesquels ces technologies ont été transférées, par ordre décroissant d'importance.

### 2.1 Le commerce d'équipements de production

L'industrie solaire photovoltaïque est caractérisée par un degré élevé de standardisation de la qualité des produits à toutes les étapes de la chaîne de valeur. La compétitivité des firmes tient donc principalement à leur capacité à produire à bas coût des biens qui soient conformes aux standards usuels de qualités. Dans ces conditions, la standardisation des produits et la priorité accordée à la réduction des coûts de production ont favorisé le développement d'un marché important d'équipements de production.

Pour analyser la concurrence au sein de ce marché, nous utilisons comme indicateur de concentration le nombre d'équipementiers enregistrés sur le site ENF<sup>8</sup>. Le tableau 3 présente ce nombre pour chaque segment de l'industrie en 2009. La première ligne recense le nombre de fournisseurs de tout type d'équipement de production, lesquels sont nombreux sur chaque segment de la chaîne de valeur. La seconde ligne indique le nombre d'entreprises vendant des lignes de production complètes, « clé en main ». Nettement moins nombreuses, celles-ci sont surtout présentes dans les segments en aval de la chaîne de valeur.

---

<sup>8</sup> <http://www.enf.cn/> est une base de données en ligne recensant les entreprises de la filière photovoltaïque.

Ainsi les segments en aval de la filière solaire photovoltaïque disposent d'un marché concurrentiel de lignes de production « clé en main », alors que les producteurs en amont de la chaîne ne bénéficient pas d'une offre d'équipements équivalente. Ce marché des lignes de production « clé en main » a joué un rôle clé dans l'émergence d'une industrie chinoise de production de cellules et modules photovoltaïques. Il a en effet permis aux entreprises chinoises d'acquérir la technologie de production dans ces segments, à coût faible du fait de la concurrence entre équipementiers. En revanche la moindre disponibilité de ces équipements de production « clé en main » pour les segments amont est une des raisons expliquant la moindre pénétration des entreprises chinoises dans ces marchés.

**Tableau 3 Nombre d'entreprises fournissant des équipements de production dans la supply chain de l'industrie photovoltaïque en 2009**

	<b>Lingot</b>	<b>Gaufre</b>	<b>Cellule</b>	<b>Module</b>
Toutes les entreprises	70	178	335	234
Entreprises vendant des lignes complètes	1	9	15	26

Source: Base de données du site ENF

Outre le transfert de la technologie incorporée dans les équipements, le commerce d'équipements de production implique fréquemment un transfert de savoir-faire lié à leur fonctionnement. Les vendeurs d'équipement transfèrent ce savoir-faire dans le cadre de formations destinées aux ingénieurs, techniciens et opérateurs qui feront fonctionner ces équipements. La maîtrise de la ligne de production donne ensuite au client la possibilité de l'adapter aux conditions locales, en substituant par exemple de la main d'œuvre bon marché à certains équipements.

Le transfert de technologie peut aussi se produire dans le sens inverse, lorsque des entreprises consommatrices d'équipements de production partagent leur savoir-faire avec des fournisseurs d'équipement. Ce type de partenariat concerne plus particulièrement les grandes entreprises du secteur, qui cherchent par ce moyen à obtenir de nouveaux équipements correspondant mieux à leurs pratiques et à leurs besoins. Des clauses d'exclusivité temporaires sont souvent contractées au bénéfice de l'industriel utilisateur de l'équipement, mais leur durée n'excède généralement pas 6 mois<sup>9</sup>. Ainsi le jeu de la concurrence permet aux autres producteurs d'accéder à leur tour aux

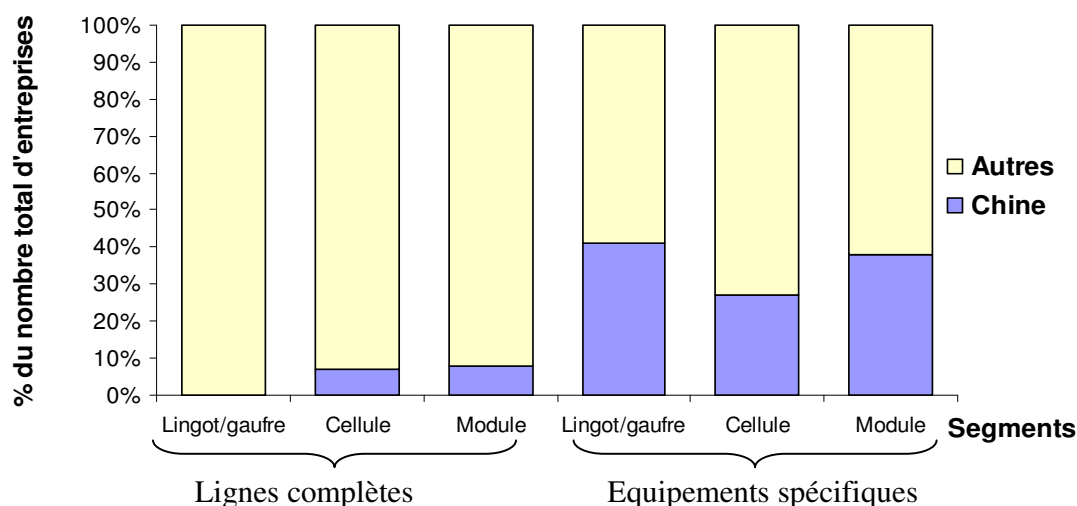
---

<sup>9</sup> Selon les acteurs interviewés en Chine.

nouveaux biens d'équipement – les savoir-faire échangés entre client et fournisseur d'équipement étant *in fine* largement diffusés dans l'industrie.

Le transfert de technologie par l'intermédiaire du commerce d'équipements de production a progressivement permis la création d'équipementiers purement chinois. Ce phénomène peut être observé sur la figure 3, qui indique la nationalité des fabricants d'équipements destinés à chaque segment de l'industrie photovoltaïque. Il apparaît que si presque aucune entreprise chinoise n'est encore capable de fournir des lignes de production complète<sup>10</sup>, elles sont néanmoins nombreuses à vendre des équipements spécifiques. Ce phénomène bénéficie plus généralement à l'ensemble de l'industrie solaire photovoltaïque chinoise, car il permet aux producteurs de remplacer des équipements importés par des versions chinoises moins coûteuses.

**Figure 3 Proportion d'entreprises chinoises dans les différents marchés d'équipement de production de l'industrie photovoltaïque en 2009**



Source: Auteurs, utilisant les données disponibles sur le site ENF

<sup>10</sup> Un indice montrant le manque d'expertise des équipementiers chinois sur certaines étapes du processus de production est la réticence des entreprises photovoltaïques chinoises à faire appel à des équipementiers nationaux pour certaines étapes critiques, préférant alors faire appel aux équipementiers étrangers malgré un coût plus important.

## 2.2 Circulation des employés

La circulation d'employés qualifiés a un second facteur clé de l'émergence de l'industrie solaire photovoltaïque chinoise, et reste aujourd'hui un canal significatif de transfert de technologie. Dans la mesure où les enjeux liés à la technologie sont centrés sur le processus de production, les connaissances associées à la technologie prennent principalement la forme de savoir-faire. Dans ces conditions, l'expérience des ouvriers et des ingénieurs est une ressource importante.

Les entreprises photovoltaïques chinoises ont grandement bénéficié du capital, des réseaux professionnels, et du savoir-faire apportés par des cadres qualifiés ayant travaillé ou effectué leurs études à l'étranger. Ainsi, le fondateur et PDG de Suntech, le plus gros producteur chinois de cellules et panneaux solaires, a étudié à l'Université de New South Wales en Australie, puis travaillé dans une entreprise photovoltaïque chinoise, Pacific Solar. De plus, parmi les six membres du comité de direction de Suntech, quatre ont étudié ou travaillé aux Etats-Unis ou au Royaume-Uni. Le PDG de Yingli, le second producteur chinois derrière Suntech, a aussi étudié à l'étranger. Chez Trina Solar, la moitié des douze membres de l'équipe de direction ont étudié ou travaillé à l'étranger : quatre aux Etats-Unis et deux à Singapour. En moyenne, 61% des membres des comités de direction des trois plus grosses entreprises photovoltaïques chinoises ont ainsi étudié ou travaillé hors de Chine. Cela montre l'importance de la Diaspora chinoise, forte de huit millions de citoyens chinois vivant dans des pays développés (source: Overseas Compatriot Affairs Commission, R.O.C).

Cette prédominance de cadres ayant été formé à l'étranger résulte en grande partie de stratégies de recrutement des entreprises chinoises orientées vers ce type de profils. Ainsi, Suntech a mis au point un programme spécial pour recruter des Chinois issus de la Diaspora, et Trina Solar a créé des équipes dédiées au recrutement à l'étranger. Ces efforts prennent tout leur sens dans un contexte où la main d'œuvre qualifiée tant au niveau de la technique que du management est rare.

La mobilité des employés a également stimulé la diffusion de la technologie (sous forme de savoir-faire) entre les entreprises chinoises, favorisant notamment une vague de création d'entreprises spécialisées dans la production de modules ou de cellules dans la seconde moitié des années 2000. Ce phénomène est difficile à quantifier, mais des cadres de trois des neuf entreprises interviewées se sont plaintes de voir leurs employés être débauchés par des concurrents ou créer leur propre entreprise. Pour maîtriser cette circulation de main d'œuvre, les entreprises chinoises développent des programmes spécifiques pour attirer les employés

moyennement qualifiés, et les neuf plus grandes entreprises photovoltaïques chinoises ont mis au point des accords prohibant la débauche de salariés entre elles.

### 2.3 Investissement direct à l'étranger

Il est établi dans la littérature économique que l'investissement d'une entreprise multinationale dans un outil de production à l'étranger, comme une usine, est un canal important de transfert de technologie. Dans ce cas le bien technologique est en effet produit localement à partir de techniques et de savoir-faire développées par l'investisseur dans son pays d'origine.

En 2009, la Chine a accueilli environ un tiers des investissements directs à l'étranger (IDE) dans l'industrie photovoltaïque. Toutefois ce phénomène est récent et n'a pas joué au moment de l'émergence de l'industrie chinoise. Le tableau 4 indique ainsi la date de création et les propriétaires des neuf plus grandes entreprises photovoltaïques chinoises. Seules trois d'entre elles sont issues d'un IDE ; il s'agit de plus d'entreprises qui ont été créées tardivement (après 2001) et donc après l'apparition d'une première vague d'entreprises strictement chinoises.

Même si les IDE ne sont pas à l'origine de l'émergence de l'industrie solaire photovoltaïque chinoise, ils ont probablement pour effet d'accélérer les transferts de technologie vers la Chine. La figure 4 montre qu'en plus d'un volume d'investissements important, la proportion de *Joint Ventures* par rapport aux filiales est plus importante en Chine que dans le reste du monde. Il s'agit là d'un phénomène typiquement chinois, qui reflète la pression exercée par le gouvernement chinois sur les entreprises étrangères pour accepter de partager la propriété des usines avec une entreprise chinoise. Dans la mesure où elles associent un acteur local à l'investissement, les *Joint Ventures* entraînent un transfert de technologie plus important que les filiales détenues à 100% par une entreprise étrangère.

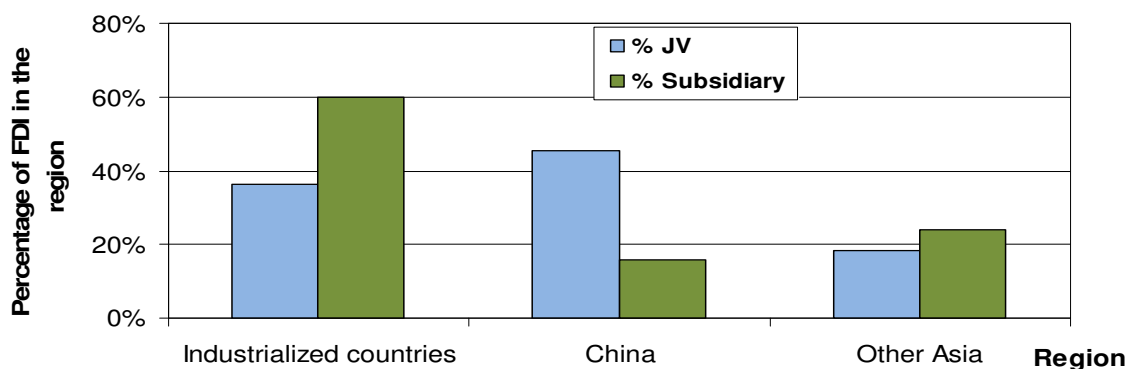
**Tableau 4 Possession des 9 plus importantes entreprises photovoltaïques en Chine**

	Capacité (MWp)	Création	Liens d'IDE
Suntech	327	2001	Aucun
Yingli	142	1998	Aucun
JingAo	113	2005	Australie
Solarfun	88	2004	Aucun
Sunenergy	78	2004	Australie
Canadian Solar	55	2001	Canada

Ningbo Solar	45	2003	Aucun
Trina Solar	37	1997	Aucun
Jiangsu Junxin	35	-	Aucun

Source European Commission (2008 and 2009)

**Figure 4 Répartition régionale des deux types d'IDE**



Source: Auteurs

## 2.4 Contrats de licence

La session de licence est un autre canal possible de transfert de technologie, visant directement au transfert de la connaissance dissociée de tout support physique. De ce fait il est étroitement associé au droit de la propriété intellectuelle, qui transforme la connaissance en un actif cessible. Cependant, c'est une pratique marginale dans l'industrie solaire photovoltaïque. Ainsi nos recherches ne nous ont permis d'identifier qu'un seul contrat de licence dans cette industrie en Chine – portant sur une technologie de l'entreprise Allemande Johanna Solar vendue à l'entreprise chinoise Shandong Solar Technology en 2008 pour monter une ligne de production.

Comme l'a remarqué Barton (2007), ce faible rôle de la propriété intellectuelle dans le transfert de technologies peut être expliqué par le fait que les principaux brevets associés à la technologie solaire photovoltaïque sont désormais passés dans le domaine public. Les principes fondamentaux de cette technologie ont en effet été développés il y a plus de vingt ans – durée maximale de validité des brevets. Les nouveaux brevets correspondent donc à des innovations incrémentales relativement faciles à contourner, qui ne bloquent pas le développement de l'industrie. Dans ce contexte, la technologie circule principalement sous forme de savoir-faire

associé aux biens d'équipements et aux salariés. Les véritables verrous technologiques sont alors liés au secret maintenu sur des savoir-faire, comme en témoigne la difficulté des industriels chinois à entrer dans le segment de la purification du silicium.

### **3 L'innovation brevetée en Chine**

Nous venons de voir que les entreprises chinoises ont réussi à acquérir la technologie leur permettant de produire des cellules et modules photovoltaïques grâce au commerce international d'équipements de production, et à la présence d'entrepreneurs et de cadres formés dans des pays développés. Dans cette partie, nous nous intéressons à l'innovation dans l'industrie solaire photovoltaïque chinoise. Nous cherchons notamment à déterminer dans quelle mesure l'industrie chinoise est parvenue à développer des capacités d'innovation qui lui sont propres, et si les performances chinoises en matière d'innovation reflètent son succès dans la production.

#### **3.1 Etude des brevets dans l'industrie photovoltaïque**

Pour avoir des informations quantitatives sur l'innovation, nous étudions le nombre de brevets, regroupés en familles de brevets selon une méthode développée par Dechezleprêtre et al. (2010)<sup>11</sup>. Bien que les brevets ne couvrent pas toutes les inventions, ils fournissent un indicateur intéressant pour étudier l'évolution de l'innovation et effectuer des comparaisons entre différents pays. Les données sont tirées du site [epacenet](http://ep.espacenet.com)<sup>12</sup>, la base de données mondiale administrée par l'Office européen des brevets (OEB). En combinant la Classification Internationale des Brevets (CIB) et une recherche par mots clés, nous avons créé un indicateur pour chaque segment de l'industrie photovoltaïque. Des informations plus détaillées sur les données utilisées sont disponibles dans l'annexe 2.

La figure 5 représente la répartition de l'innovation brevetée par pays pour chaque segment de l'industrie, sur la période 2006-2007. La performance de la Chine correspond à celles des autres acteurs majeurs de l'industrie – Etats-Unis, Japon, Corée du Sud, et Allemagne, tous des pays développés. La Chine est même le premier pays en termes d'innovations brevetées dans la purification du silicium, avec une contribution de 37%.

---

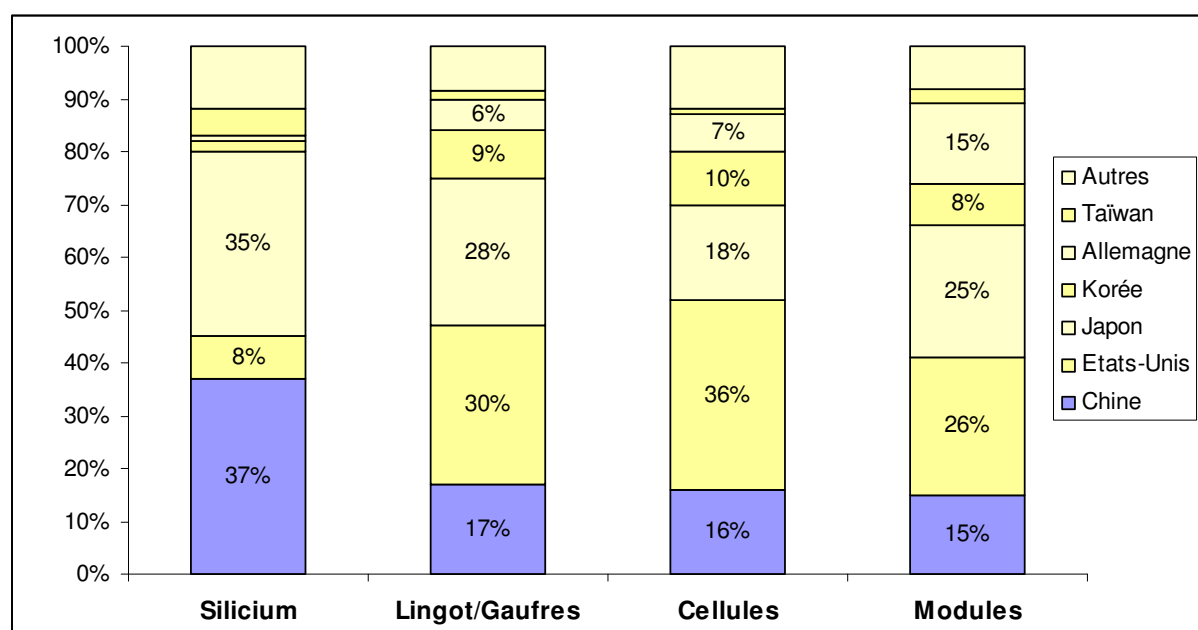
<sup>11</sup> Se reporter à l'annex 2 pour plus d'informations sur la méthodologie utilisée.

<sup>12</sup> Disponible à <http://ep.espacenet.com>



La comparaison de ces chiffres avec ceux de la part de marché de la Chine dans les différents segments conduit encore une fois à distinguer la partie amont de l'industrie (purification du silicium et production de lingot/gaufres), et la partie aval (fabrication de cellules et panneaux). Dans les segments amont, la contribution de la Chine à l'innovation brevetée mondiale (37% et 17%) est très supérieure à sa part de marché en termes de production (2.5 et 5% en 2007). C'est l'inverse dans les segments aval, où sa contribution à l'innovation brevetée (16 et 15%) est inférieure à sa part de marché (27% en 2007). Cela suggère que les brevets n'ont pas la même fonction selon les segments considérés. Il convient donc d'analyser ces chiffres séparément pour les parties aval et amont de l'industrie.

**Figure 5 Répartition de l'innovation brevetée par pays, pour chaque segment de l'industrie, sur la période 2006-2007**



Source: Auteurs

### 3.2 L'innovation en aval : cellules et modules

Pour mettre les chiffres de l'innovation brevetée chinoise en perspective, il est instructif d'étudier la part de ces innovations qui sont également brevetées à l'étranger. En effet, les inventions faisant l'objet d'une protection internationale sont généralement les plus intéressantes sur le plan

commercial<sup>13</sup>. Or il apparaît que seulement 1% des inventions chinoises brevetées le sont aussi dans un autre pays, alors que ce chiffre est de 15% pour l'Allemagne, 26% pour le Japon, et 7% pour les Etats-Unis. Il est peu vraisemblable que cela soit dû à une destination nationale de l'industrie Chinoise, dans la mesure où plus de 95% de la production nationale est exportée. Cela suggère plutôt que les innovations brevetées chinoises sont de moindre intérêt que celles des pays développés. Cette explication est étayée par le faible effort de R&D fourni par les entreprises chinoises comparé à celles des pays développés, comme l'illustre le tableau 5. Celui-ci présente la part du chiffre d'affaire (CA) consacré à la R&D par les plus grandes entreprises produisant des cellules ou panneaux, en Chine et dans les pays développés.

**Tableau 4 Dépenses de R&D dans les grandes entreprises produisant des cellules ou panneaux photovoltaïques**

<b>Entreprises</b>	<b>Nationalité</b>	<b>Dépense de R&amp;D (% du CA 2008)</b>	<b>Segments</b>
Schott Solar	DE+US	5.0%	Cellules
Q-cells	DE	2.0%	Cellules
SunPower	US + PH	1.7%	Cellules + modules
Solar World	DE	1.4%	Cellules
Suntech	CN	0.8%	Cellules + modules
China Sunergy	CN	0.5%	Cellules + modules
Solarfun	CN	0.4%	Cellules + modules +lingots + gaufres
Trina Solar	CN	0.4%	Cellules + modules +lingots + gaufres

Source : Rapport annuel des entreprises

Les entreprises chinoises brevètent ainsi des inventions de moindre qualité que leurs concurrentes des pays développés. Notre étude de terrain confirme que les employés des entreprises chinoises déposent des brevets pour des innovations mineures n'ayant que très peu ou aucune valeur commerciale. Le principal motif déclaré n'est pas de protéger l'innovation, mais d'envoyer un signal au gouvernement. Ainsi, les subventions de la *National Development and Reform Commission* (NDRC) sont attribuées en fonction du caractère innovant des entreprises, mesuré au nombre de brevets.

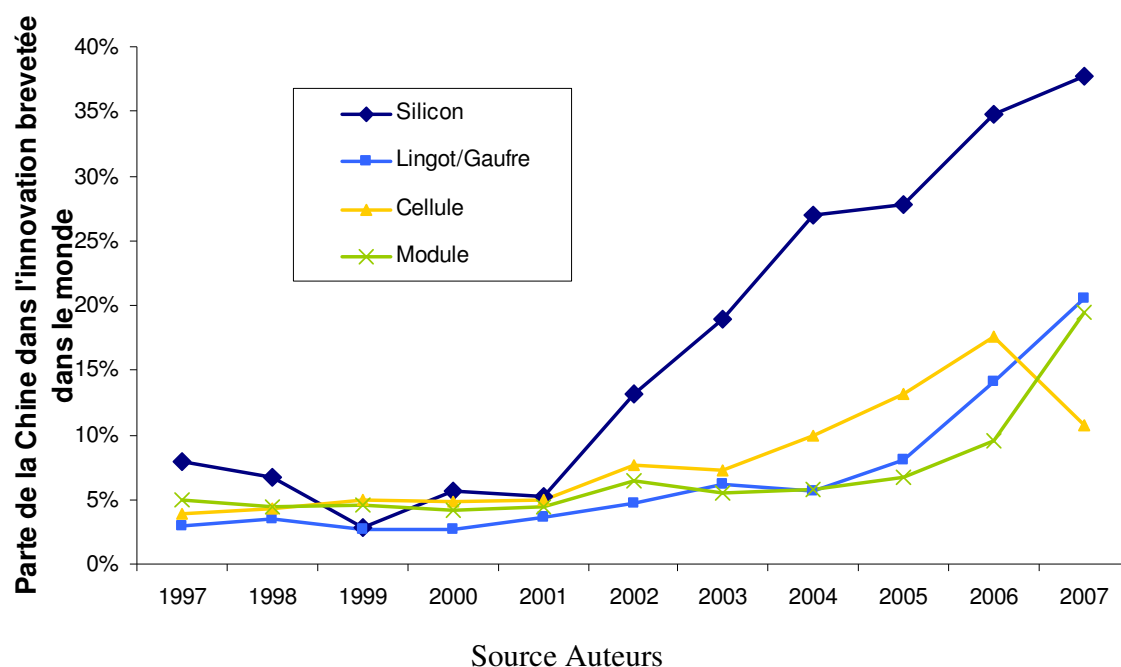
<sup>13</sup> Un brevet peut être une simple option pour une utilisation future, un délai de deux ans existant pour déposer des brevets dans d'autres pays. Il y a donc un saut qualitatif entre une innovation brevetée dans un seul pays, et une brevetée dans deux pays où plus, pour laquelle il y a un intérêt commercial direct.

Cependant, il serait abusif d'en conclure que les entreprises chinoises n'innovent pas. Il est nettement ressorti des interviews que l'innovation dans l'industrie photovoltaïque chinoise est concentrée sur les procédés de production plutôt que sur les produits. Cette innovation largement incrémentale trouve son origine au niveau des processus de production (*learning by doing*) plutôt que dans des centres de R&D. Cela explique les faibles chiffres de R&D, et le recours à la protection par le secret plus que par le brevet.

### 3.2 L'innovation en amont de la filière

Les performances de la Chine en matière d'innovation sont remarquables en amont de l'industrie, en particulier pour la purification du silicium, où la Chine pèse 37% des innovations brevetées dans le monde. La figure 6 montrant l'évolution de la répartition des brevets pour chacun des segments entre 1997 et 2007. Elle révèle que le dynamisme chinois dans le domaine du silicium remonte à 2002, date à laquelle la part chinoise des brevets liés au silicium commence à diverger par rapport aux autres segments de l'industrie.

**Figure 6 Contribution de la Chine dans l'innovation brevetée dans le monde dans chaque segment de l'industrie photovoltaïque**



Comment expliquer ce comportement ? Si la Chine a produit seulement 2.5% du silicium ultra pur nécessaire à l'industrie photovoltaïque en 2007, son gouvernement affiche l'ambition

d'augmenter très fortement cette part de marché dans les années à venir. De fait, la production chinoise a déjà été multipliée par 16.5 entre 2007 et 2008 (de 1100 à 18000T, REDP 2008). Jusqu'à présent, l'action volontariste du gouvernement se traduit toutefois principalement par une grande proportion de brevets déposés par des instituts ou entreprises publics, leur part étant de 60% contre 15% en moyenne dans le pays développés.

Le nombre important d'innovations brevetées en Chine dans le domaine de la purification du silicium est donc principalement lié à une politique de recherche publique. Celle-ci est motivée par l'existence de barrières technologiques à l'entrée dans ce segment<sup>14</sup>. La purification du silicium de qualité métallurgique en silicium ultra pur requis pour l'industrie photovoltaïque est basée sur le procédé par purification gazeuse Siemens. Les réactions chimique et la technologie de purification sont depuis longtemps connus et dans le domaine public, mais cela ne suffit pas à produire du silicium pur à un coût satisfaisant pour rentrer dans le marché. En effet la maîtrise des coûts nécessite de contrôler parfaitement tous les paramètres des réactions chimiques, un savoir faire que les grandes entreprises occidentales et Japonaises ont développé, mais qui est secret. Cet effort domestique chinois dans l'innovation dans cette activité vise donc à développer un savoir faire national pour rattraper les pays développés.

Dans la purification du silicium, le poids de la chine dans l'innovation brevetée dans le monde, loin de traduire une position dominante dans la technologie (**leadership technologique** ?), est donc le signe d'efforts massifs pour passer une barrière technologique. En effet, les entreprises chinoises étant encore dépendantes d'un petit nombre de fournisseurs de silicium des pays développés, la production domestique est un objectif stratégique important pour le développement de la filière photovoltaïque chinoise.

### 3 Conclusion

En quelques années, la Chine a rattrapé et dépassé les pays développés en termes de production de cellules et panneaux solaire. L'objectif de cette étude était de comprendre comment un tel développement à été possible, et en particulier comment les entreprises chinoises ont eu accès à la

---

<sup>14</sup> Il a été vu dans la première partie que la purification du silicium implique également des investissements productifs très importants. Ce type de barrières à l'entrée capitalistiques ne semble toutefois pas être un obstacle majeur pour les entreprises chinoises, comme en témoigne leur présence dans la production de cellules photovoltaïques, également très intensive en capital.

technologie nécessaire pour produire des biens satisfaisant les standards de qualité du secteur à un coût satisfaisant.

Une analyse détaillée de la structure de l'industrie révèle tout d'abord que les entreprises chinoises ne dominent en fait que la partie aval de la filière : la fabrication de cellules et de panneaux photovoltaïques. Ces segments d'activité sont caractérisés par des barrières à l'entrée sont relativement faibles, une concurrence sévère, et de faibles marges. Les entreprises des pays développés restent en revanche dominantes dans les segments situés en amont de la chaîne de valeur – purification du silicium et production de lingots et gaufres de silicium – où la technologie est plus cruciale. Cette division de la production entre la Chine et les pays développés suit un schéma classique observé dans de nombreux autres secteurs industriels. Le gouvernement chinois a toutefois prévu d'ambitieuses augmentations de la production de silicium ultra pur pour les prochaines années.

Les industriels chinois ont bénéficié de transferts de technologies mises au point dans les pays développés à travers deux principaux canaux : le commerce international d'équipements de production, en particulier de lignes complètes, et la circulation de main d'œuvre qualifiée recrutée dans la diaspora chinoise. Le faible coût de la main d'œuvre et de l'énergie en Chine a donné aux entreprises locales des avantages comparatifs leur permettant de tirer profit de ces technologies pour dominer le marché des cellules et panneaux photovoltaïques. A l'inverse, l'absence d'un marché concurrentiel d'équipements de production pour la purification du silicium explique la faiblesse de l'industrie chinoise dans ce segment.

Les investissements directs à l'étranger, nombreux dans l'industrie photovoltaïque chinoise, participent également aux transferts de technologies. Toutefois, ils sont relativement récents et ne sont donc pas à l'origine de l'émergence de l'industrie locale. Le commerce de propriété intellectuelle n'a joué qu'un rôle très marginal dans la diffusion de la technologie. La propriété intellectuelle n'a pas non plus entravé les transferts de technologies et le développement de l'industrie chinoise. Les brevets fondamentaux de cette industrie, vieux de plus de vingt ans, sont en effet désormais dans le domaine public. Les brevets en vigueur concernent des innovations mineures, et ne constituent donc pas une barrière à l'entrée dans l'industrie.

Comme le montre l'analyse des données de brevets, l'innovation dans l'industrie solaire photovoltaïque chinoise est motivée par une volonté du gouvernement de rattraper les pays développés dans des secteurs stratégiques plus que par un réel dynamisme des entreprises privées. Les producteurs de cellules et modules allouent une moindre part de leur chiffre d'affaire

à la R&D, et par conséquent ont des brevets de moins bonne qualité qui servent plus à envoyer un signal au gouvernement qu'à protéger des inventions à fort potentiel commercial. La volonté du gouvernement chinois de rattraper les pays développés est particulièrement visible en amont de l'industrie, dans la purification du silicium ou la production de lingots et gaufres de silicium, où les barrières technologiques sont les plus fortes. La proportion de brevets déposés par des organismes publics y est ainsi quatre fois plus importante que dans les pays développés. Cela montre la volonté et la capacité du gouvernement chinois à intervenir massivement pour stimuler l'innovation locale lorsque le marché ne suffit pas à entraîner le transfert de technologies.

Ces résultats suggèrent que la clé de la réussite d'une politique internationale visant à accélérer le transfert de technologies propres vers les pays en voie de développement est la création d'un environnement attractif pour le commerce de bien d'équipements et les investissements internationaux, ainsi que la disponibilité d'un capital humain local qualifié. A contrario, les controverses sur les effets de la propriété intellectuelle semblent déconnectées de la réalité du secteur. Il faut bien sûr rester prudent quant à la généralisation de ces résultats à d'autres industries, mais ces conclusions recourent celles de Barton (2007) et Kirkegaard (2009) à propos de l'industrie photovoltaïque, mais aussi des biocarburants et de l'industrie éolienne. La raison principale de cette conclusion générale – les brevets ne sont pas un frein à la diffusion des technologies – réside dans la concurrence. Celle-ci est en effet suffisamment intense dans l'industrie photovoltaïque pour empêcher des entreprises de bénéficier d'un pouvoir de marché important et de bloquer l'entrée de nouveaux acteurs.

L'absence de lien entre performance industrielle et utilisation locale de la technologie pour réduire les émissions de GES pose la question plus générale de l'intérêt de la diffusion des technologies propres vers les pays émergents. Si l'on laisse de côté les considérations d'équité pour se concentrer sur les aspects économiques, cette diffusion a pour conséquence positive l'augmentation de la concurrence dans l'industrie. Elle stimule la réduction du coût de la technologie, qui est le frein principal à son déploiement dans les cas des énergies renouvelables. La diffusion des technologies vers les pays émergents finit ainsi par réduire le coût de la lutte contre le changement climatique.

Du point de vue des pays développés, cette conclusion est inconfortable. Ces pays ont certes bénéficié de réduction de coûts, comme l'illustre le succès commercial des panneaux solaires chinois en Espagne ou en Allemagne. Mais alors même que la demande pour ces matériels est tirée par les subventions versées par ces Etats, ceux-ci voient leurs industriels perdre des parts de marché face à des concurrents chinois plus compétitifs.



## Bibliographie

Barton, J., 2007. Intellectual Property and Access to Clean Energy Technologies in Developing Countries. An Analysis of Solar Photovoltaic, Biofuel and Wind Technologies. ICTSD Programme on Trade and Environment, Issue Paper No. 2

Cohen, W.M., Nelson, R.R., Walsh, J.P., 2000. Protecting their Intellectual Assets: Appropriability Conditions and Why U.S. Manufacturing Firms Patent (or Not). NBER Working Paper no. 7552

Dechezleprêtre, A., Glachant, M., and Ménière, Y., 2010. What Drives the International Transfer of Climate Change Mitigation Technologies? Empirical Evidence from Patent Data. CERNA Working Paper

EPIA (European Photovoltaic Industry Association), 2009. Global market outlook for photovoltaics until 2013

EPIA (European Photovoltaic Industry Association), 2010. Global market outlook for photovoltaics until 2014

European Commission, DG Joint Research Center, PV status report 2005, 2008 and 2009

IEA (International Energy Agency), 2009. Trends in photovoltaic applications, Survey report of selected IEA countries between 1992 and 2008

Kirkegaard, J.F., Hanemann, T., and Weischer, L., 2009. It Should Be a Breeze: Harnessing the Potential of Open Trade and Investment Flows in the Wind Energy Industry. Working Paper

Marigo, N., 2007. The Chinese Silicon Photovoltaic Industry and Market: A Critical Review of Trends and Outlook, *Progress in Photovoltaic: Research and application*, 2007; 15:143–162  
10.1002/pip.716

McKinsey, 2008. The economics of solar power



REDP (China Renewable Energy Development Project), 2008. Report on the development of the photovoltaic industry in China (2008)

REN21 (Renewable Energy Policy Network for the 21st Century), 2008. Renewables 2007 Global Status Report

Ruoss, D., 2007. Global Photovoltaics Business and PV in Malaysia, Envision report

Yanga, H., He Wang, Huacong Yub, Jianping Xib, Rongqiang Cui, Guangde Chen, 2003. Status of photovoltaic industry in China, *Energy Policy* 31 (2003) 703–707

Winegarner, R. M., 2009. Report 1 Silicon Industry 2008, A comprehensive report on the use of silicon wafers, silicon ingot, and polysilicon in the semiconductor industry on a fab by fab basis, Sage Concepts

## Annexes

## Annexe 1: Liste des entreprises dans lesquelles des interviews ont été effectués

**Tableau 5 Liste des entreprises dans lesquelles des interviews ont été effectués**

Nom	Nb Employés	Activité	Date de création	Chiffre d'affaire (Millions USD)	Production en 2008 (MW)	Rang mondial
Suntech	8000	Cellules+modules	2001	278	1000	3
TRINA Solar	5200	lingot+gaufre+cellule+module	1997	150	450	11
Solarfun Power	1500	lingot+gaufre+cellule+module	2004	576	200	12
China Sunergy (CEEG)	5000	lingot+gaufre+cellule+module	1990	149.5	111	20
Topsolar	800	Cellules+modules	2002	175	48	38
ST Solar	125	modules	2003	n.a.	25	>50
Universal Solar	120	modules	2003	53	25	>50
Chaoi Solar	1100	lingot+gaufre+cellule+module	2001	n.a.	22.5	>50
Solar Energy (SSEC)	560	lingot+gaufre+cellule+module	2000	n.a.	20	>50

Université

Shiaotong University, Institute of Solar Energy

Source: Interviews, ENF website, firms' websites, and PV report 2009

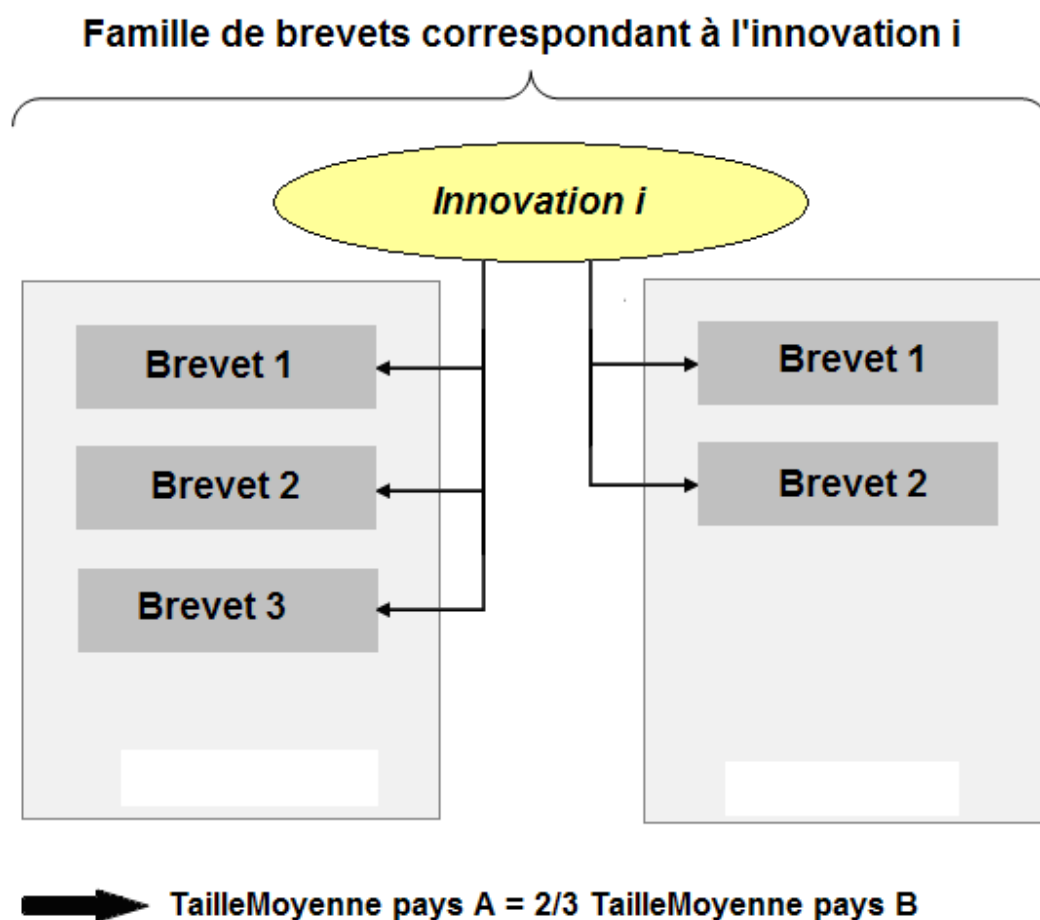
## Annexe 2 Méthodologie: Les brevets comme indicateur de l'innovation et des transferts de technologie

Il existe plusieurs indicateurs visant à quantifier l'innovation. Une première série d'indicateurs d'appuient sur des mesures d'intrants (*inputs*), tels que les budgets de R&D ou le nombre d'employés des départements de R&D. Cette information est difficile à trouver à un niveau désagrégé, et ne donne pas d'indications sur les résultats (*outputs*) de la R&D. Les données de brevets permettent d'échapper à ces difficultés. Elles peuvent être désagrégés à un niveau très fin, et quantifient les résultats de la R&D. Dans la mesure où la protection par le brevet peut être

étendues à l'échelle internationale, elles fournissent de plus les indications géographiques nécessaires à la mesure des transferts de technologies.

Comme illustré sur la figure 7, un innovateur peut choisir de breveter son invention dans un ou plusieurs pays, afin d'obtenir le droit exclusif de l'exploiter commercialement dans ce(s) pays. Dans chaque pays, un nombre variable de brevets peut être nécessaire pour protéger une innovation, en fonction de sa complexité et des caractéristiques de l'office des brevets du pays. Cette hétérogénéité entre pays crée un biais dans les comparaisons basées sur le nombre de brevets. Pour remédier à ce problème, nous utilisons le nombre de familles de brevets comme mesure de l'innovation. Une famille de brevets est composée de tous les brevets déposés pour une innovation, à partir d'un même dépôt prioritaire. Dans cette perspective, une famille correspond donc à une innovation.

**Figure 7 Schéma d'une famille de brevets**



La comparaison des brevets à l'échelle internationale suppose alors de s'accorder sur une métrique commune. Dans l'exemple de la figure 7, la même invention  $i$  a été brevetée par trois brevets dans le pays A, et deux dans le pays B. Dans cet exemple, la taille des brevets dans le pays A correspond à deux tiers de leur taille dans le pays B. Dans l'étude, la référence est la taille des brevets aux Etats-Unis : pour chaque pays «  $p$  », la taille moyenne des brevets est mesurée en ne gardant que les familles comprenant des brevets déposés aux Etats-Unis et dans le pays «  $p$  » et en effectuant l'opération suivante :

$$TailleMoyenne_p = \frac{Nbbrevets_{US}}{Nbbrevets_p} \quad (1)$$

Une fois ces valeurs obtenues pour tous les pays, la taille d'une innovation  $i$  est mesurée par:

$$Taille_i = NbBrevets_{i,p} * TailleMoyenne_p \quad (2)$$

Où  $NbBrevets_{i,p}$  est le nombre de brevets protégeant l'innovation  $i$  dans le pays  $p$

Si l'innovation a été brevetée dans plusieurs pays, sa taille est mesurée par la moyenne de (1) sur tous les pays:

$$Taille_i = \frac{1}{n} \sum_p NbBrevets_{i,p} * TailleMoyenne_p \quad (3)$$

Avec cette information, on peut mesurer l'innovation effectuée par un pays  $p$  dans une année  $a$  en sommant les tailles des innovations correspondantes (  $i \in (p, a)$  ) :

$$Innovation_{p,a} = \sum_{i \in (p,a)} Size_i \quad (4)$$

Le transfert de technologie peut être mesuré en ne gardant que les innovations brevetées dans un pays particulier.

### Limites de cet indicateur

Les innovations n'ont pas toutes la même valeur commerciale, mais celle-ci peut être approchée en observant la part des familles internationales (famille comprenant des brevets déposés dans au moins deux pays). En effet un brevet peut être une simple option pour une utilisation future, un délai de deux ans existant pour déposer des brevets dans d'autres pays. Il y a donc un saut qualitatif entre une innovation brevetée dans un seul pays, et une innovation brevetée dans deux pays où plus, laquelle signale un intérêt commercial plus élevé.

Un second problème, moins évident à résoudre, est lié au fait que toutes les innovations ne sont pas brevetées. Les inventeurs peuvent en effet avoir recours à des moyens de protection alternatifs, tels que le secret. C'est notamment le cas pour les innovations de procédés, pour lesquelles le secret est plus fréquemment utilisé (Cohen et al., 2000). Dans la mesure où une partie importante des innovations dans l'industrie photovoltaïque concernent les processus de production, l'indicateur ne prend donc en compte qu'une partie de l'innovation.

### Base de données utilisée

La base de données a été construite grâce aux données de brevets disponibles sur le site Espacenet. Des critères de recherche ont été déterminés pour cibler les brevets correspondant à l'industrie photovoltaïque. La nature du système de classification empêche d'obtenir la totalité des brevets, mais cela n'est pas un problème dès lors que l'échantillon est représentatif. Il existe en revanche un risque, plus problématique, de prendre en compte des brevets qui ne correspondent pas à l'industrie visée. Cela peut être évité dans une certaine mesure en utilisant des critères de recherche adéquats, de manière à suivre une approche conservatrice de la sélection des brevets. Les critères qui ont été utilisés pour cette étude sont présentés dans le tableau 6. Nous avons obtenu 79642 brevets validés avant 2010, tous segments compris.

**Tableau 6: Critères de recherche**

Mots clefs dans le titre ou l'abstract:	Code « International Patent Classification » (IPC) :
Purification du silicium	
Silicon	C01B33 not C01B33/02
Lingot	
Silicon	C01B33/02 OR C30B
Gaufre	
silicon wafer not semiconductor ?	H01L21

Wafer	B24 OR B28
Cellule	
(solar cell?) or photovoltaic not module	H01L
Module	
PV or solar or photovoltaic and module	H01L