

## **ANNEXE**

### **Le développement de la filière photovoltaïque française**

## SOMMAIRE

<b>1. LE PHOTOVOLTAÏQUE : UNE OPPORTUNITE DE MARCHE FORTE AU NIVEAU MONDIAL, MAIS UN SECTEUR INDUSTRIEL DEJA TRES CONCURRENTIEL.....</b>	<b>2</b>
1.1. Le marché du photovoltaïque a connu un développement rapide grâce aux aides publiques, qui devrait s'accélérer avec l'approche progressive de la parité réseau dans les deux décennies à venir .....	2
1.2. La croissance de la demande a entraîné une multiplication des investissements industriels, qui sont de plus en plus localisés en Asie .....	4
1.3. Le secteur photovoltaïque présente des perspectives de marché intéressantes au niveau mondial à moyen terme, qui constituent une opportunité pour les entreprises françaises .....	7
<b>2. LA POLITIQUE DE RECHERCHE ET DEVELOPPEMENT DOIT ETRE POURSUIVIE ET CIBLEE SUR LES PRINCIPALES OPPORTUNITES DE MARCHE IDENTIFIEES.....</b>	<b>8</b>
2.1. Le secteur photovoltaïque est caractérisé par la coexistence de plusieurs technologies, à divers stades de développement, dont aucune ne semble à court terme devoir évincer les autres .....	8
2.2. La R&D française se positionne sur l'ensemble des technologies du photovoltaïque et vise aussi bien les avancées théoriques que la pré-industrialisation, avec des moyens inférieurs à ceux des leaders du secteur.....	11
2.2.1. <i>Les principaux financeurs dans le domaine du photovoltaïque traitent des projets allant de la recherche au développement préindustriel.....</i>	<i>11</i>
2.2.2. <i>La structuration de la recherche autour de deux principaux instituts, l'INES et l'IRDEP, doit être renforcée et leur articulation améliorée.....</i>	<i>13</i>
2.2.3. <i>Les pôles de compétitivité, qui recensent un nombre important de projets innovants dans le domaine du photovoltaïque, constatent que peu d'entre eux parviennent à passer au stade de l'industrialisation .....</i>	<i>18</i>
2.2.4. <i>Le montant total de l'effort de R&amp;D français reste inférieur à celui des principaux acteurs du domaine et sans commune mesure avec les moyens anticipés pour le développement du parc .....</i>	<i>19</i>

2.3. Conclusion sur la R&D dans le secteur photovoltaïque .....	22
<b>3. L'AMONT DE LA FILIERE FRANÇAISE RESTE EMBRYONNAIRE .....</b>	<b>23</b>
3.1. Le seul acteur français intégré dans le domaine du photovoltaïque, Photowatt, doit réduire fortement ses coûts et proposer des progrès technologiques pour être compétitif .....	23
3.2. La production de modules (assemblage de cellules) en France a connu un développement rapide en 2009-2010 .....	25
3.3. Les retours de la prime d'intégration au bâti en termes d'innovation et de développement des produits de niche ne sont pas à la hauteur des ambitions qui avaient conduit à la mettre en place .....	28
3.4. Quelques entreprises françaises innovantes se positionnent sur le marché mondial des matériaux solaires ou des équipements industriels.....	30
3.5. Le secteur français des couches minces en est au stade de la R&D.....	31
3.6. Les capacités industrielles françaises aboutissent à un déficit de la balance commerciale.....	33
<b>4. L'AVAL DE LA FILIERE, QUI BENEFICIE DIRECTEMENT DES POLITIQUES DE SOUTIEN AU MARCHE, CAPTE UNE PART IMPORTANTE DES MARGES DE LA FILIERE ET CONCENTRE LA MAJORITE DES EMPLOIS.....</b>	<b>34</b>
4.1. L'aval de la filière constitue un marché local assez peu structuré qui capte une part importante des subventions au photovoltaïque.....	34
4.2. Les créations d'emploi de la filière sont concentrées sur l'aval, du fait d'une rémunération excessive qui va à l'encontre de la recherche de compétitivité pour le secteur photovoltaïque .....	35
<b>5. DEVELOPPER ET METTRE EN ŒUVRE UNE STRATEGIE DE POSITIONNEMENT DES ENTREPRISES FRANÇAISES SUR L'UN DES SECTEURS CLES DE LA « CROISSANCE VERTE » ET DES ENERGIES RENOUVELABLES .....</b>	<b>38</b>
<b>6. RECAPITULATIF DES PROPOSITIONS .....</b>	<b>40</b>

### Encadré 1 : Filières et technologies photovoltaïques

Il existe aujourd'hui deux principales filières industrielles pour la conversion photovoltaïque, qui font appel à différents types de matériaux semi-conducteurs :

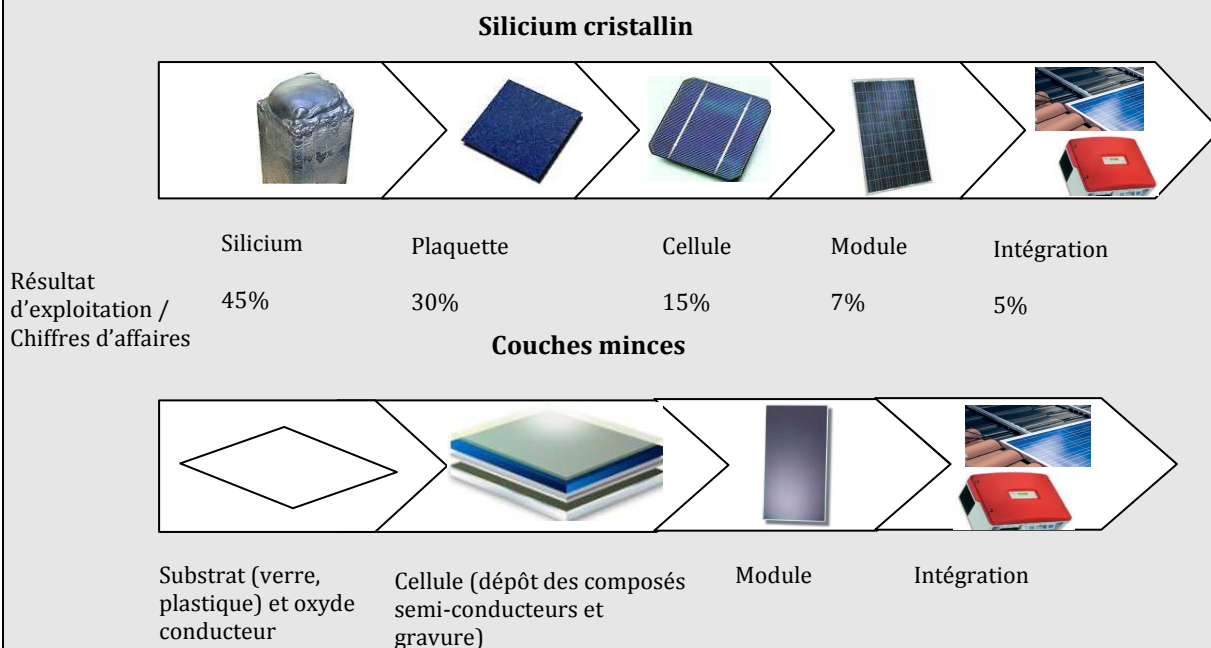
- le silicium cristallin, qui constitue la filière historique du photovoltaïque ;
- les couches minces, qui se sont développées plus récemment.

Par ailleurs, d'autres technologies dites de « troisième génération » sont au stade de la recherche ou du développement (cf. 2.1 ci-dessous).

L'amont de la filière photovoltaïque va de la production des charges des panneaux (silicium cristallin, ou autres semi-conducteurs pour les couches minces) à la production des panneaux mêmes. Il passe par :

- la production du silicium cristallin puis le moulage des lingots ;
- pour le silicium cristallin, la découpe du lingot en tranches minces appelées plaquettes ou wafers ;
- la fabrication des cellules, par traitement des plaquettes de silicium cristallin (dopage par injection de phosphore et de bore et ajout d'une grille conductrice), ou directement par dépôt du semi-conducteur sur un substrat pour les couches minces ;
- la fabrication des modules (ou panneaux), par connexion des cellules entre elles et encapsulation (verre ou polymère) ;
- la fabrication des systèmes photovoltaïques, par intégration autour du module du « balance of system » (BOS : éléments de montage et de support des panneaux, câbles, onduleurs et éléments de sécurité).

**Graphique 1 : Filière amont (silicium cristallin et couches minces)**



*Source : Mission et étude PricewaterhouseCoopers « L'État de la filière photovoltaïque en France – 2010 ».*

L'aval de la filière couvre les métiers de développement de projet, d'installation et d'exploitation des installations photovoltaïques.

Au-delà des objectifs énergétiques retenus dans le cadre du Grenelle de l'environnement pour 2020, qui semblent en passe d'être atteints rapidement, il apparaît que le véritable défi à relever en matière d'énergie photovoltaïque est d'ordre économique. En effet, les perspectives à moyen terme permettent d'anticiper un développement massif de cette forme d'énergie d'ici quelques années, qui devrait aboutir à un essor très rapide de la filière industrielle au niveau mondial :

- ◆ l'énergie photovoltaïque repose sur une ressource illimitée, bien qu'intermittente ;
- ◆ si cette forme d'énergie est encore coûteuse en Europe et nécessite des dispositifs publics de soutien, selon les études des professionnels<sup>1</sup>, la parité réseau<sup>2</sup> pourrait progressivement être atteinte dans différents pays du monde entre 2010 et 2020 pour les installations résidentielles et commerciales, en fonction du prix de détail de l'électricité et du taux d'ensoleillement des pays concernés ;
- ◆ une fois la parité réseau atteinte, le secteur connaîtra une phase de déploiement à grande échelle. En effet, tous les consommateurs d'électricité auront progressivement intérêt économiquement à investir ;
- ◆ les spécificités françaises (coût faible de l'électricité, taux d'ensoleillement moyen) impliquent que le déploiement se produira d'abord dans d'autres pays du monde : les opportunités industrielles se situent au niveau mondial.

Les perspectives de développement de cette énergie prometteuse, qui laissent entrevoir des besoins massifs en équipement d'ici une dizaine d'années, conjuguées aux échelles de temps relativement courtes des travaux de recherche et développement (par comparaison par exemple à la temporalité des développements dans le domaine du nucléaire) permettent de considérer que **le positionnement des entreprises françaises sur le marché international du photovoltaïque est un enjeu stratégique.**

## **1. Le photovoltaïque : une opportunité de marché forte au niveau mondial, mais un secteur industriel déjà très concurrentiel**

### **1.1. Le marché du photovoltaïque a connu un développement rapide grâce aux aides publiques, qui devrait s'accélérer avec l'approche progressive de la parité réseau dans les deux décennies à venir**

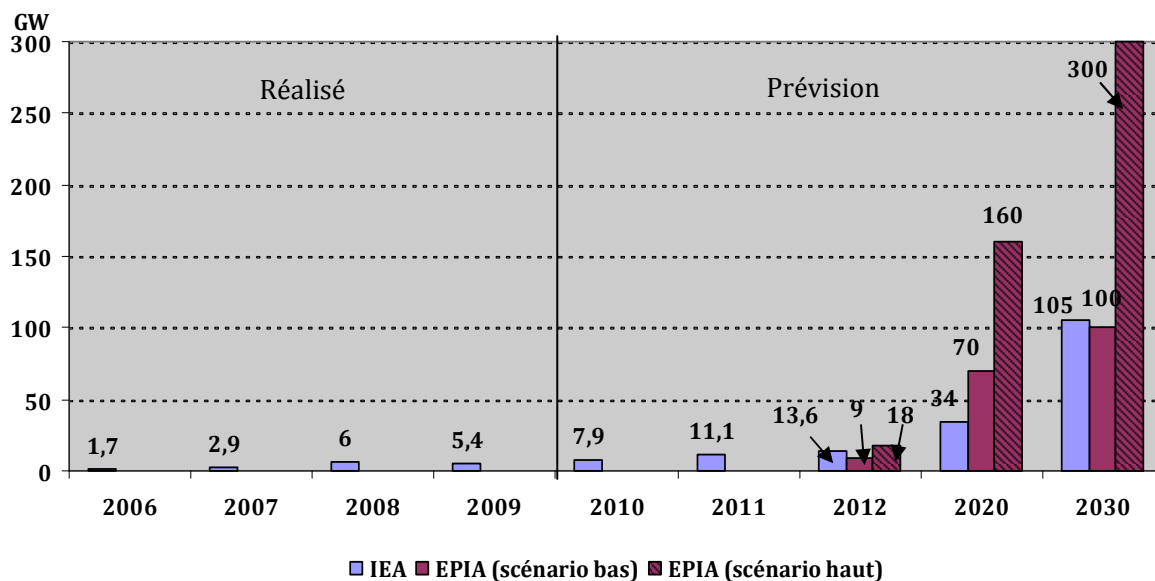
Le marché du photovoltaïque a fait l'objet d'une croissance rapide de 2006 à 2009 en raison du développement des différents systèmes de soutien. En 2009, la capacité annuelle installée est de 5,4 GW selon l'agence internationale de l'énergie (IEA). L'IEA anticipe un doublement de cette capacité annuelle installée en 2012 (13,6 GW). À partir de 2020, l'atteinte progressive de la parité entraîne une accélération des installations annuelles, qui s'élèverait à 34 GW en 2020 et 105 en 2030 selon l'IEA tandis que l'association européenne de l'industrie photovoltaïque (EPIA) propose une fourchette comprise entre 70 et 160 GW en 2020 et 100 et 300 GW en 2030.

---

<sup>1</sup> Sources : *European Photovoltaic Industry Association (EPIA), New Energy Finance, EDF Energies Nouvelles.*

<sup>2</sup> La notion de parité réseau correspond à une situation où le coût de production de l'électricité photovoltaïque est équivalent au coût évité, c'est-à-dire au prix d'achat de l'électricité sur le réseau ; il s'agit donc de la situation dans laquelle la production d'électricité photovoltaïque devient une solution économiquement rationnelle sans subvention publique.

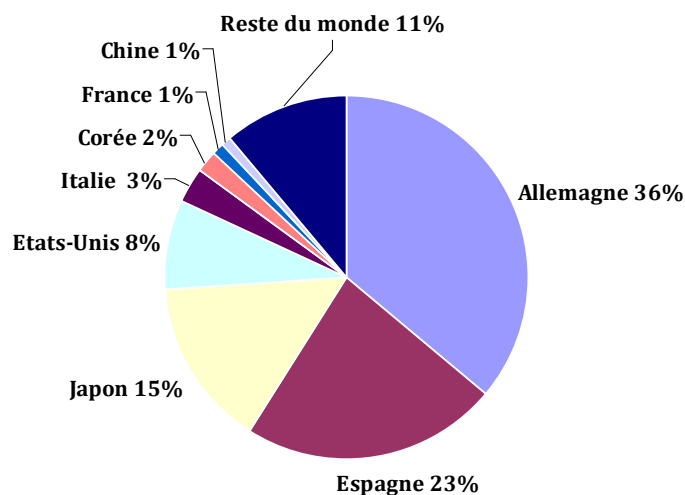
**Graphique 2 : Capacité photovoltaïque installée chaque année : constat 2006-2009 et prévisions jusqu'en 2030**



Source : Mission d'après IEA et EPIA.

**Le marché est, à la date de la mission, largement européen** : sur les 5,6 à 6 GW installées en 2008, 4,5 GW soit 80 % l'avaient été en Europe (2,5 GW soit 45 % en Espagne, 1,5 GW soit 27 % en Allemagne), le reste correspondant en grande partie aux États-Unis, à la Corée et au Japon (15 %). En termes de capacité totale installée, ces cinq pays concentrent 83 % de la puissance d'après l'IEA (Graphique 3).

**Graphique 3 : Répartition de la capacité totale installée en 2008 (14,5 GW) entre les pays**



Source : IEA – Technology roadmap solar photovoltaic energy - 2010

La parité réseau devrait être atteinte sur les segments distribués (toitures) d'abord dans les pays où le prix de l'électricité est le plus cher et l'ensoleillement le plus fort ; les observateurs les plus optimistes (cabinet *New Energy Finance* notamment) considèrent qu'elle sera atteinte dès 2011 dans les premières régions du monde (Italie, Hawaï) puis qu'elle se généralisera progressivement dans les pays d'Europe et les États-Unis à partir de la deuxième moitié de la décennie. L'IEA estime, de manière plus prudente, que le photovoltaïque commencera à être compétitif dans les pays les plus ensoleillés et présentant les plus forts prix de l'électricité de détail autour de 2015, et à une plus grande échelle entre 2020 et 2030.

En termes de perspectives, il est intéressant de souligner qu'au regard des critères déterminants pour la parité réseau (ensoleillement, prix de détail de l'électricité) :

- ◆ la France devrait connaître une compétitivité de l'énergie solaire plus tardivement que dans beaucoup d'autres pays (notamment Italie, Turquie, Espagne, Allemagne, certains États des États-Unis) ;
- ◆ au-delà des pays ayant déjà entamé une politique de promotion des ENR (Europe, États-Unis, Japon, Corée), le photovoltaïque pourrait se développer une fois la compétitivité atteinte dans nombre de pays émergents, intéressés par cette forme d'électricité peu capitalistique, relativement peu technologique et distribuée. L'IEA rappelle ainsi le potentiel de croissance de pays comme la Chine, l'Inde, les pays d'Amérique latine (Brésil en particulier) ou d'Afrique.

## 1.2. La croissance de la demande a entraîné une multiplication des investissements industriels, qui sont de plus en plus localisés en Asie

**Pour répondre à cette demande en croissance, les capacités de production de cellules et de modules ont connu un développement rapide.** Elles seraient de 17 GW dans le monde en 2009 selon PricewaterhouseCoopers (PWC) et ont connu comme principales évolutions :

- ◆ le déplacement de leur centre de gravité de l'OCDE (Allemagne et Japon en particulier) vers les pays d'Asie hors OCDE, Chine en tête : la part de la production provenant des pays d'Asie hors OCDE est passée de moins de 15 % en 2005, à 30 % en 2006, 40 % en 2007 et 50 % en 2008 selon l'IEA ;
- ◆ une consolidation verticale, sur le modèle de la société chinoise Trina Solar, initialement spécialisée dans le développement de projets, qui a ensuite élargi son champ d'activité vers la fabrication de modules, celle de lingots, puis celle de plaquettes ;
- ◆ une tendance à l'augmentation des capacités en vue de réaliser des économies d'échelle : ainsi par exemple l'usine de fabrication de modules de Yingli à Baoding (Chine) devrait-elle passer en 2010 de 600 à 900 MW.

La fabrication est très concentrée sur le segment de la production de silicium (une vingtaine environ) ; les fabricants de cellules sont environ une centaine, les dix premiers concentrant plus de la moitié du marché (60 %) ; enfin le marché des modules, qui recoupe pour partie celui des cellules, est plus éclaté. Ceci est à mettre en relation avec le coût de l'investissement unitaire, qui est d'autant plus important que l'on remonte la chaîne de production. Quant au marché des composants du BOS, il repose essentiellement sur les grands acteurs des équipements électriques, l'allemand SMA en tête.

Le segment de la fabrication de modules est dominé par l'américain First Solar, suivi par des entreprises chinoises, allemandes et japonaises. Au sein des sept premiers (Tableau 1), First Solar est présent exclusivement sur le marché des couches minces (technologie tellurure de cadmium - CdTe) ; tous les autres interviennent sur le segment du silicium cristallin, qui représentait en 2008 85 % de la production de modules, ainsi que pour Sharp sur le silicium amorphe et pour Q-Cells sur le CIGS.

ANNEXE

**Tableau 1 : Principaux acteurs sur le segment de la fabrication de modules**

Entreprise	Pays	Part de marché 2009
First Solar	États-Unis	13 %
Suntech	Chine	7 %
Sharp	Japon	7 %
Q-Cells	Allemagne	6 %
Yingli	Chine	5 %
JA Solar	Chine	5 %
Sunpower	États-Unis	5 %

*Source : PricewaterhouseCoopers (État de la filière photovoltaïque en France – janvier 2010),*

Les progrès industriels, le développement des capacités de production asiatiques et les économies d'échelle ont conduit à une baisse importante du prix des modules. Le prix du module de silicium cristallin à fin 2009 était compris entre 2,3 et 2,7 \$/Wc pour les produits occidentaux et entre 1,9 et 2,3 \$/Wc pour les produits chinois. D'après le magazine Photon International (édition de février 2010), la baisse du prix des modules entre fin 2009 et fin 2010 serait comprise entre 12 et 27 %.

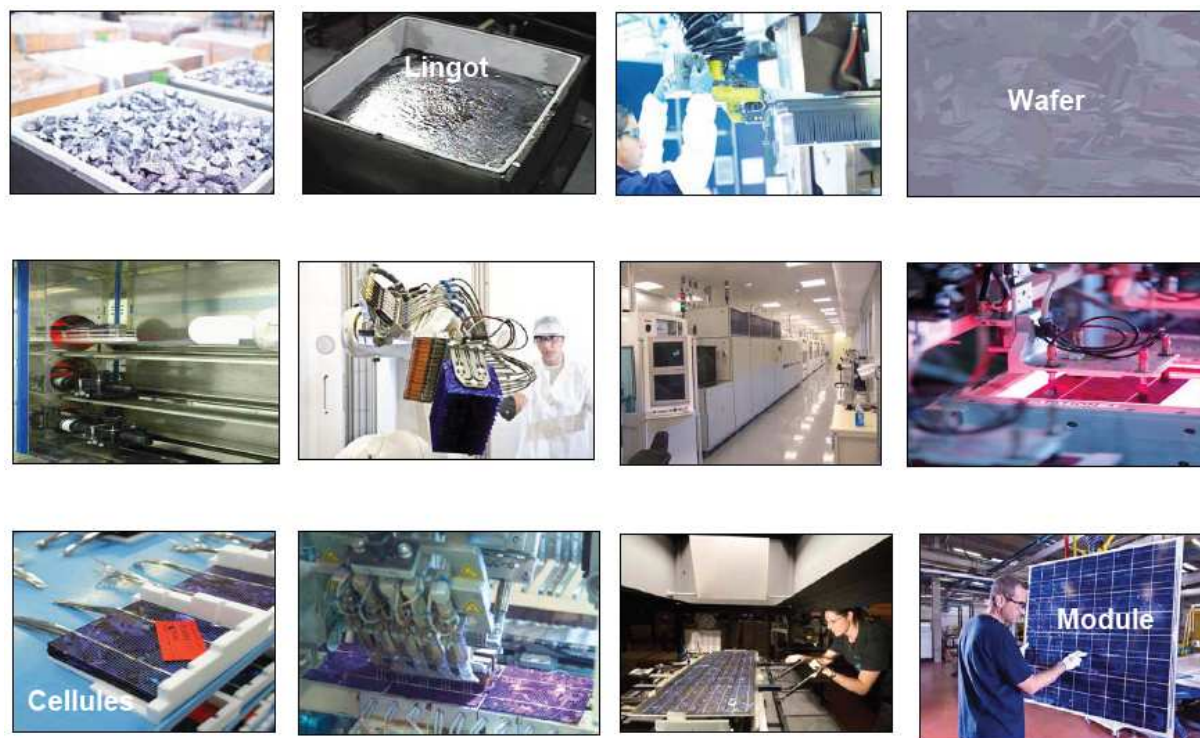
**L'analyse de la fonction de production des modules démontre la difficulté à dégager un avantage compétitif français.** En effet, le coût du capital est élevé en France par rapport aux pays émergents et à la Chine en particulier. En termes de maîtrise technologique, Photowatt ne présente plus d'avantage par rapport à ses concurrents ; seul un effort important de R&D permettrait de combler ce retard. Enfin, l'argument de proximité au marché, avancé par plusieurs interlocuteurs de la mission pour expliquer le développement récent d'unité d'assemblage en France, semble fragile et relève sans doute plus d'un argument marketing que d'un critère technique.

**Tableau 2 : Qualification de la fonction de production**

	Lingots/substrats	Plaquettes - Cellules	Modules et intégration
Principaux déterminants du coût	Accès au capital Coût de l'énergie Coût des matières premières (silicium)	Maîtrise technologique/ procédés de fabrication Taille unitaire (économies d'échelle) Accès au capital	Prix d'achat des cellules et des composants Proximité marché ?
Intensité concurrentielle	Faible	Forte Situation de surproduction temporaire Consolidation en cours	Forte
Segment capitalistique (Ordre de grandeur du coût d'un investissement industriel)	+++ 500 M€ à 1,3 Mds€	++ <100 M€	+ < 10 M€
Compétence clé	Métallurgie	Électronique	Assemblage/ montage

*Source : Etude PWC et entretiens mission (Total, GDF Suez)*

Graphique 4 : Illustration de la chaîne de production des panneaux photovoltaïques



*Source : Photowatt*

**Au-delà des cellules et modules photovoltaïques mêmes, la croissance du marché du photovoltaïque tire celle des équipements pour l'amont et l'aval de la filière :** équipements industriels, intermédiaires de fabrication (verre, gaz de process), électronique et connectique, systèmes d'intégration et d'encapsulation, systèmes de stockage de l'électricité ou réseaux intelligents (smarts-grids). Le potentiel de croissance de ces segments apparaît au moins aussi fort que celui de la filière photovoltaïque elle-même, et potentiellement plus prometteur pour la France au vu :

- ◆ des déterminants de leur développement à une échelle industrielle (segments moins capitalistiques et moins intensifs en main-d'œuvre) ;
- ◆ de la présence d'acteurs français dans le domaine : par exemple, Air Liquide, Saint-Gobain, Schneider Electric, etc.

**Encadré 2 : Le développement de la filière industrielle chinoise, un modèle tourné vers l'export**

En 2009, quatre des dix premiers fabricants de panneaux solaires de la planète sont chinois et 40 % de la production mondiale de panneaux est localisée en Chine. Au-delà des panneaux, la Chine compte une part importante des leaders mondiaux du silicium, des lingots et plaquettes, et deux entreprises à forte croissance dans le domaine des couches minces : la Chine a donc réussi la mise en place d'une véritable filière photovoltaïque, leader au niveau mondial.

La production chinoise est tournée à 90 % vers l'export. La politique de développement de la production d'électricité photovoltaïque sur le territoire national reste d'ailleurs modeste, avec une capacité de 300 MW en 2009.

Le succès du développement de la filière chinoise s'explique par deux principaux facteurs :

- l'effort de R&D : la Chine a mené une politique de R&D sur le domaine du silicium depuis les années 50 et du photovoltaïque depuis les années 70 (applications spatiales) ;
- la capacité de financement : avec les fonds d'investissements occidentaux, les provinces chinoises côtières du Sud qui cherchaient à reconvertir leur industrie ont joué un rôle important d'incubateur pour le déploiement de la filière. Elles apportent les premiers fonds et des subventions pour la R&D dans le cadre des parcs technologiques qu'elles mettent en place.

Si certaines entreprises chinoises ont été durement touchées par l'effondrement de la demande en 2009, les principaux acteurs (en particulier Yingli, Suntech et Trina sur le segment des modules) ont démontré leur capacité à résister à la crise. L'État chinois a apporté un soutien financier aux entreprises en difficulté lors de la crise qu'a connue le secteur en 2009, alors que la demande de panneaux puis le prix du silicium se sont effondrés. Les banques publiques ont accordé aux entreprises des prêts à taux intérêts très bas. Le gouvernement a ensuite mis en place des mesures, encore timides, pour développer le marché intérieur, afin d'atténuer le ralentissement du marché mondial. Yingli a, par exemple, obtenu au plus fort de la crise un projet de ferme solaire développé sur fonds publics.

Ces entreprises présentent d'après les acteurs de l'aval rencontré par la mission des performances de qualité et des perspectives de stabilité égales à celles des acteurs occidentaux.

*Source : Service économique régional de Pékin.*

### **1.3. Le secteur photovoltaïque présente des perspectives de marché intéressantes au niveau mondial à moyen terme, qui constituent une opportunité pour les entreprises françaises**

Le secteur du photovoltaïque apparaît comme stratégique : le marché du photovoltaïque présente des perspectives de croissance importantes à l'échelle de la décennie, puisqu'il pourrait décupler en dix ans.

L'accélération du développement avec l'atteinte de la parité réseau se produira d'abord dans les pays à fort taux d'ensoleillement et à fort coût de l'électricité « traditionnelle ». **L'enjeu est donc le positionnement sur un marché mondial ; le marché national doit constituer une « base de développement » pour les acteurs économiques et non leur unique débouché.**

Par ailleurs, le marché de l'amont est aujourd'hui fortement concurrentiel et les avantages compétitifs français ne sont pas évidents au regard des caractéristiques du secteur ; les opportunités apparaissent au moins aussi fortes sur les équipements pour l'amont et l'aval de la filière. **Il apparaît donc nécessaire de développer une politique de recherche et développement et une stratégie industrielle ciblées vers les principales opportunités et s'appuyant sur les forces des entreprises françaises.** Si l'on peut espérer qu'avec l'automatisation croissante de la production, les coûts de main-d'œuvre ont vocation à jouer un rôle de moins en moins déterminant, la maîtrise technologique et la rapidité de valorisation des résultats de R&D sont des avantages concurrentiels clés pour un marché qui ne devrait pas être totalement mature avant une ou deux décennies.

Enfin, dans l'hypothèse d'un positionnement réussi sur ce secteur pour les entreprises françaises, les capacités de production n'ont pas nécessairement vocation à se développer sur le territoire national ni même européen. **Le photovoltaïque doit donc plus être vu comme une opportunité pour les entreprises françaises que pour l'emploi industriel français** : un modèle de développement où des équipes de recherche et développement et de petites entités production seraient localisées en France, tandis que les principales capacités seraient localisées dans les pays d'Asie est un scénario qui pourrait prendre place. Si le potentiel d'emploi industriel y compris en cas de réussite de la stratégie de développement ne doit pas être surestimé, **le potentiel d'emploi lié à l'aval ne doit pas être sous-estimé**, y compris pour le développement de projet à l'international, où les grandes entreprises françaises des « utilities » (eau, gaz, électricité, service aux collectivités) ont une bonne implantation.

**En conclusion, l'analyse du secteur du photovoltaïque et des atouts des entreprises françaises amène à retenir un objectif prioritaire : le positionnement à l'international des entreprises françaises sur ce secteur à fort potentiel de croissance au niveau mondial.**

## **2. La politique de recherche et développement doit être poursuivie et ciblée sur les principales opportunités de marché identifiées**

### **2.1. Le secteur photovoltaïque est caractérisé par la coexistence de plusieurs technologies, à divers stades de développement, dont aucune ne semble à court terme devoir évincer les autres**

Les travaux de R&D menés en France portent à la fois sur l'optimisation des technologies existantes, et sur les nouvelles technologies en matière de photovoltaïque.

La première génération de cellules photovoltaïques repose sur le silicium cristallin, obtenu à partir de galets de quartz d'abord convertis en silicium de qualité métallurgique puis traités pour obtenir une pureté de l'ordre de 99,99 %. L'épaisseur de silicium nécessaire à l'absorption du spectre solaire est de l'ordre de la centaine de microns ; le silicium peut-être monocristallin ou multicristallin (également appelé polycristallin).

Les technologies dites de « couches minces » reposent sur l'utilisation de matériaux pour lesquels une épaisseur de seulement quelques microns est suffisante à la conversion photovoltaïque, étant donnés leurs coefficients d'absorption des photons très supérieurs à ceux du silicium cristallin ; ces matériaux sont donc déposés en couche très mince sur un substrat (verre, céramiques, polymères). Plusieurs semi-conducteurs de ce type sont utilisés dans l'industrie :

- ◆ le silicium amorphe ;
- ◆ le tellure de cadmium (CdTe) ;
- ◆ le di-séléniure de cuivre-indium (CIS).

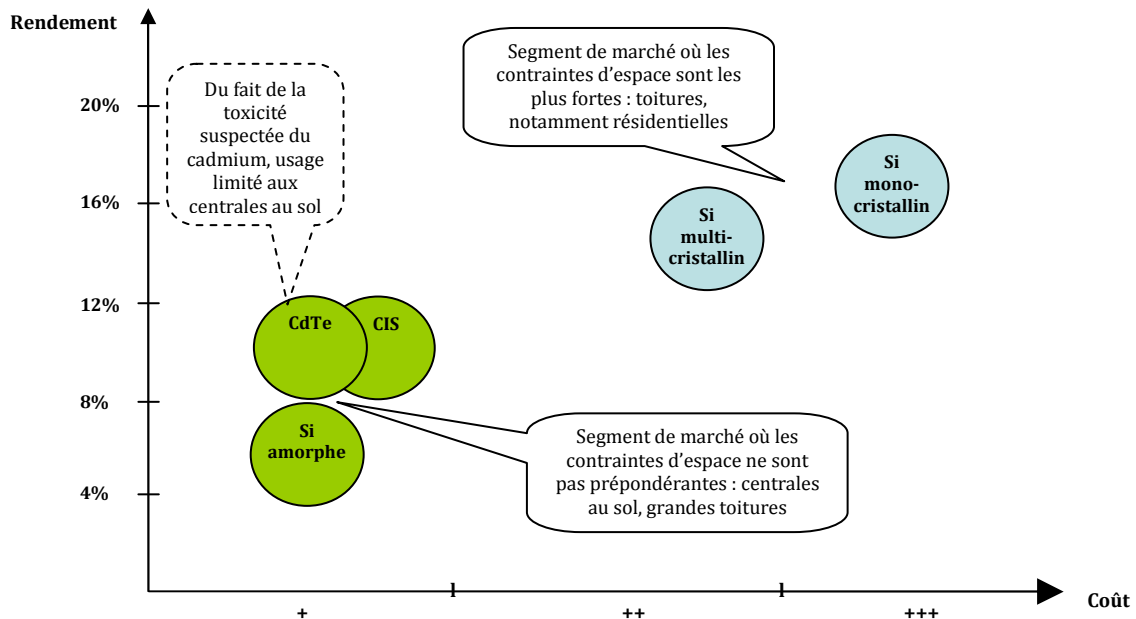
Les caractéristiques des différentes technologies de silicium cristallin et des couches minces (cf. Tableau 3), notamment en termes de couple coût / rendement (€/W combiné aux W/m<sup>2</sup>) les orientent vers différents segments de marché. En particulier les technologies à faible rendement et faible coût peuvent répondre au modèle économique des centrales au sol et des grandes toitures industrielles, tandis que les applications résidentielles et commerciales privilégieront le maximum de rendement pour optimiser leurs surfaces exploitables, comme l'illustre le Graphique 5.

**Tableau 3 : Avantages et inconvénient du silicium cristallin et des couches minces**

		Rendement		Coût (+++ = le plus cher)	Disponibilité matière première	Durabilité
		Industrie	Laboratoire			
Silicium cristallin (1 <sup>ère</sup> génération)	Monocristallin	15 à 20 %	25 %	+++	Forte	+++
	Multicristallin	12 à 16 %	20 %	++	Forte	+++
Couches minces (2 <sup>nde</sup> génération)	Silicium amorphe	7 %	13 %	+	Forte	+
	CdTe	11 %	17 %	+	Faible (tellurure) Toxicité cadmium	++
	CIS	12 %	20 %	+	Faible (indium, mais ressources mal connues et possibilité de substitution)	++

Source : Mission.

**Graphique 5 : Positionnement de marché des différentes technologies photovoltaïques**



Source : Mission. Axe des abscisses : du moins cher (+) au plus cher (+++).

Au-delà des caractéristiques des semi-conducteurs eux-mêmes, les matériaux d'encapsulation jouent un rôle en termes de positionnement sur le marché : en effet, si la plupart des modules sont aujourd'hui en verre, des substrats souples et légers pour des cellules actives en couche mince peuvent répondre aux contraintes de poids acceptable pour les grandes toitures : ce type de produit existe pour le silicium amorphe, et des développements sont en cours pour le CIS.

**La troisième génération de modules photovoltaïques**, aujourd'hui au stade de la recherche et développement (R&D), vise à dépasser la limite maximale de rendement des cellules actuelles, qui est d'environ 30 %. Plusieurs concepts sont envisagés pour atteindre cet objectif :

- ◆ la superposition de multiples cellules (multijonctions<sup>3</sup>) et les cellules à concentration : dans les cellules multijonctions, l'empilement de jonctions permet d'utiliser au mieux le spectre d'énergie des photons. Si les coûts de production des cellules à multijonction sont aujourd'hui très élevés, leur combinaison à des systèmes à concentration laisse entrevoir la possibilité de développement d'une filière à haut coût mais à très fort rendement ;
- ◆ l'utilisation des photons à basse énergie qui ne sont habituellement pas absorbés par la cellule ou la conversion des photons pour ajuster le spectre de la lumière solaire aux caractéristiques du semi-conducteur ;
- ◆ les cellules à électrons chauds produisant plus de paires électron/trou.

Enfin, l'utilisation de polymères organiques, dont le coût de revient est très faible, n'a pas dépassé à ce jour le stade de la recherche ou des applications de niche étant donné ses très faibles rendements (5 %) et surtout sa durée de vie courte (quelques années au mieux).

**En conclusion**, il apparaît que :

- ◆ aucune des trois générations ne peut être considérée comme totalement mature, dans la mesure où tant le produit que son processus de production peuvent être améliorés ;
- ◆ il n'est pas certain que l'une des technologies ait vocation à évincer toutes les autres : en effet, chacune offre un couple rendement / coût qui pourrait répondre à un besoin spécifique du marché.

En termes d'orientations de l'effort de R&D français, ceci signifie qu'il est pertinent de mener en parallèle des travaux sur les différentes technologies, dans la mesure où chacune d'entre elle offre des perspectives de retour sur investissement, à deux réserves près :

- ◆ dans la filière du silicium cristallin, où comme on le verra par la suite l'écart en matière de développement industriel est très fort par rapport à d'autres pays d'Europe ou d'Asie, les perspectives semblent moins intéressantes au regard des moyens nécessaires au rattrapage par rapport aux filières de deuxième et troisième génération ;
- ◆ la diversification des programmes de recherche ne doit pas entraîner de dispersion de moyens, d'autant plus que les budgets de la R&D française restent inférieurs à ceux des champions du secteur (cf. 2.2.4).

**Proposition n° 1 : Dans le domaine des cellules et modules photovoltaïques, l'effort de recherche et développement français doit se concentrer sur les technologies de deuxième et troisième génération, plutôt que sur le silicium cristallin à homojonction pour lequel les perspectives de développement industriel apparaissent limitées en France.**

Enfin, au-delà des cellules et modules photovoltaïques mêmes, des perspectives d'innovation existent dans le domaine des équipements industriels, des matériaux et des systèmes photovoltaïques ; l'exemple des matériaux d'encapsulation a été cité, comme aurait pu l'être celui des équipements électroniques et de la connectique, du stockage de l'électricité ou des réseaux intelligents (smarts-grids). Le potentiel de croissance de ces segments apparaît au moins aussi fort que celui de la filière photovoltaïque elle-même, et potentiellement plus prometteur pour la France au vu des déterminants de leur développement à une échelle industrielle (segments moins capitalistiques et moins intensifs en main-d'œuvre, présence d'acteurs français dans le domaine) ; or, l'effort de R&D pour ces segments est peu lisible.

---

<sup>3</sup> Pour permettre l'instauration d'un champ électrique, le matériau semi-conducteur doit faire l'objet d'un « dopage » en surface par l'ajout d'impuretés (homojonction), l'alternative étant l'utilisation de deux matériaux semi-conducteurs différents (hétérojonction).

**Proposition n° 2 :** La DGRI devrait cartographier les compétences et moyens de R&D dans le secteur photovoltaïque au sens large, incluant les équipements industriels, les matériaux et les systèmes photovoltaïques, de manière à pouvoir afficher une programmation globale qui ne soit pas limitée aux cellules et aux modules. Elle procédera également à un examen systématique avec les industriels des segments de marché offrant un fort potentiel de croissance et où le besoin de R&D n'est pas couvert.

## **2.2. La R&D française se positionne sur l'ensemble des technologies du photovoltaïque et vise aussi bien les avancées théoriques que la pré-industrialisation, avec des moyens inférieurs à ceux des leaders du secteur**

La R&D française en matière de photovoltaïque est structurée autour :

- ◆ des principaux financeurs que sont l'ANR, l'ADEME et OSEO, ainsi que les projets européens ;
- ◆ des organismes de recherche (CEA, CNRS) qui interviennent sur leurs budgets propres ou dans le cadre de financement de projets collaboratifs ;
- ◆ des deux instituts spécialisés dans le domaine du solaire que sont l'INES (Institut national de l'énergie solaire), spécialisé dans les technologies silicium et de 3<sup>ème</sup> génération, et l'IRDEP (institut de recherche et développement pour l'énergie photovoltaïque), spécialisé dans les couches minces. Les budgets de l'INES et de l'IRDEP sont constitués à la fois des budgets propres des organismes de recherche (essentiellement le CEA pour l'INES) ou des entreprises qui les constituent, des financements des projets collaboratifs auxquels ils contribuent ainsi que des aides des collectivités ;
- ◆ des pôles de compétitivité (Capénergies, Tenerrdis, Derbi et Sciences et Systèmes de l'Énergie Électrique).

### **2.2.1. Les principaux financeurs dans le domaine du photovoltaïque traitent des projets allant de la recherche au développement préindustriel**

L'Agence Nationale de la Recherche (ANR) a financé de 2005 à 2007 un programme de recherche « Solaire photovoltaïque ». La mise en œuvre des appels à projets, la conduite opérationnelle de l'évaluation et de la sélection ainsi que le suivi des projets ont été confiés au CEA. Dans le cadre de sa programmation 2008, l'ANR a décidé de lancer un nouveau programme intitulé « Habisol » regroupant des thèmes de recherche sur le bâtiment (anciennement « Briques technologiques ») et sur le solaire (anciennement « Solaire photovoltaïque ») ; ce programme en est à sa troisième édition (2008, 2009 et 2010).

De 2005 à 2007, le programme « Solaire photovoltaïque » a financé 32 projets, pour un budget total de 75,2 M€ dont 25,6 M€ de financement ANR. Les projets étaient répartis de manière à peu près équitable entre quatre thèmes : filière silicium cristallin, filière couches minces, nouveaux concepts et systèmes photovoltaïques. Dans le cadre de l'appel à projet 2008 du programme Habisol, 11 projets et 9,4 M€ d'aides ont été sélectionnés sur la filière photovoltaïque. **En 2009, l'ANR a retenu sept projets correspondant à 6,3 M€ sur le photovoltaïque** ; quatre projets portent sur le silicium cristallin (dont deux sur des technologies à haut rendement : conversion des photons, hétérojonctions) et les trois autres sur les couches minces ou les cellules organiques.

L'ADEME intervient à deux titres dans le domaine de la R&D :

- ♦ elle joue un rôle de coordination et de financement de la R&D à travers son fonds démonstrateur de recherche dont la feuille de route de recherche pour le photovoltaïque sera finalisée courant juin 2010. Le budget global de ce fonds est de 375 M€ ; son objectif est de mener des opérations en grandeur proche du réel et de démontrer leur efficacité technologique. Il est piloté par un comité de pilotage dont font partie le MEEDDM, le MEIE et le MESR, via des feuilles de route qui donnent lieu à appel à manifestation d'intérêt. **Le budget du fonds est amplifié avec le fonds d'investissement d'avenir, qui prévoit 1,35 Md€ sur les énergies renouvelables et la chimie verte, dont environ 10 % pourrait aller au secteur photovoltaïque ;**
- ♦ elle soutient l'émergence de start-up, notamment dans le domaine des couches minces : Solsia, et Nexcis dans le CIS.

Son **budget 2009 pour le photovoltaïque était de 4,8 M€**, dont 70 % correspondaient à un projet de développement de modules en couches minces.

**OSEO finance l'innovation dans la filière photovoltaïque à travers deux principaux leviers :**

- ♦ le programme innovation et stratégie industrielle (ISI, issu de Agence de l'innovation industrielle AII), destiné à financer des projets collaboratifs regroupant des entreprises et des laboratoires, qui finance le programme Solar Nano Crystal ;
- ♦ le fonds unique interministériel (FUI), qui finance les projets de recherche et développement collaboratifs des pôles de compétitivité.

OSEO soutient notamment quatre programmes importants visant chacun une des générations du photovoltaïque : silicium à homojonction et à hétérojonction, couches minces, cellules organiques (Tableau 4).

**Tableau 4 : Principaux programmes soutenus par OSEO dans le secteur photovoltaïque**

Programme	Budget ( M€)		Période	Acteurs	Objectifs
	Total	OSEO (dont subventions + avances remboursables)			
Solar Nano Crystal	190	46,5 (21,5 + 25)	2008 - 2012	<b>PV Alliance</b> (Photowatt International, EDF Energies Nouvelles Réparties, CEA-Valorisation), Emix, Photosil, Apollon Solar, INES	Abaisser les coûts des matériaux de base, en produisant directement du silicium de qualité photovoltaïque et améliorer rendement Développer des technologies à haut rendement grâce à l'usage des nanotechnologies dans la filière du silicium en couches minces
PV 20	25,9	9,8 (3,2 + 6,6)	2010- 2012	<b>MPO</b> , Emix, Semco, Tenesol, INES	Repenser toute la chaîne de production du module de silicium cristallin de manière à avoir un module 100 % à prix compétitif
SOLCIS	29,9	9,6 (5,4 + 4,2)	2010- 2012	<b>Nexcis</b> , Semco, Impika, Amplitude Systèmes, Komax, Solems, Rescoll, CNRS, Armines, Enthone, Arkema,	Faire émerger une filière industrielle basée sur la technologie CIS, avec : une première génération de modules CIS bi-verre, basée sur un procédé mixte

ANNEXE

Programme	Budget ( M€)		Période	Acteurs	Objectifs
	Total	OSEO (dont subventions + avances remboursa- bles)			
				(IBM et ST Microelectronics : partenaires non financés)	d'électrodéposition couplé à un recuit à pression atmosphérique (et non sous vide) ; une seconde génération de CIS à meilleurs rendements de conversion (de 8 % à 12 % puis 14 %), à coût de production réduit et à procédé d'encapsulation innovant (produits légers pour toitures).
OSCAR	15,7	6 (3,8+2,2)	2010- 2013	<b>Armor</b> , INES, LCPO (Laboratoire de Chimie des Polymères Organiques de Bordeaux), Plasto, Alca Packaging Les objectifs sont : coût < 0,70 €/Wc, rendement compris entre 8 et 10 %, durée de vie supérieure à 6 ans.	Produire des films de photovoltaïque organique (OPV) constitués de matériaux innovants tant au niveau des matériaux actifs qu'au niveau des matériaux supports ; la conception de ces films fera appel à des procédés de fabrication industrielle empruntés au secteur de l'impression. Triple objectif : coût < 0,70 €/Wc, rendement compris entre 8 et 10 %, durée de vie > 6 ans

*Source : Mission.*

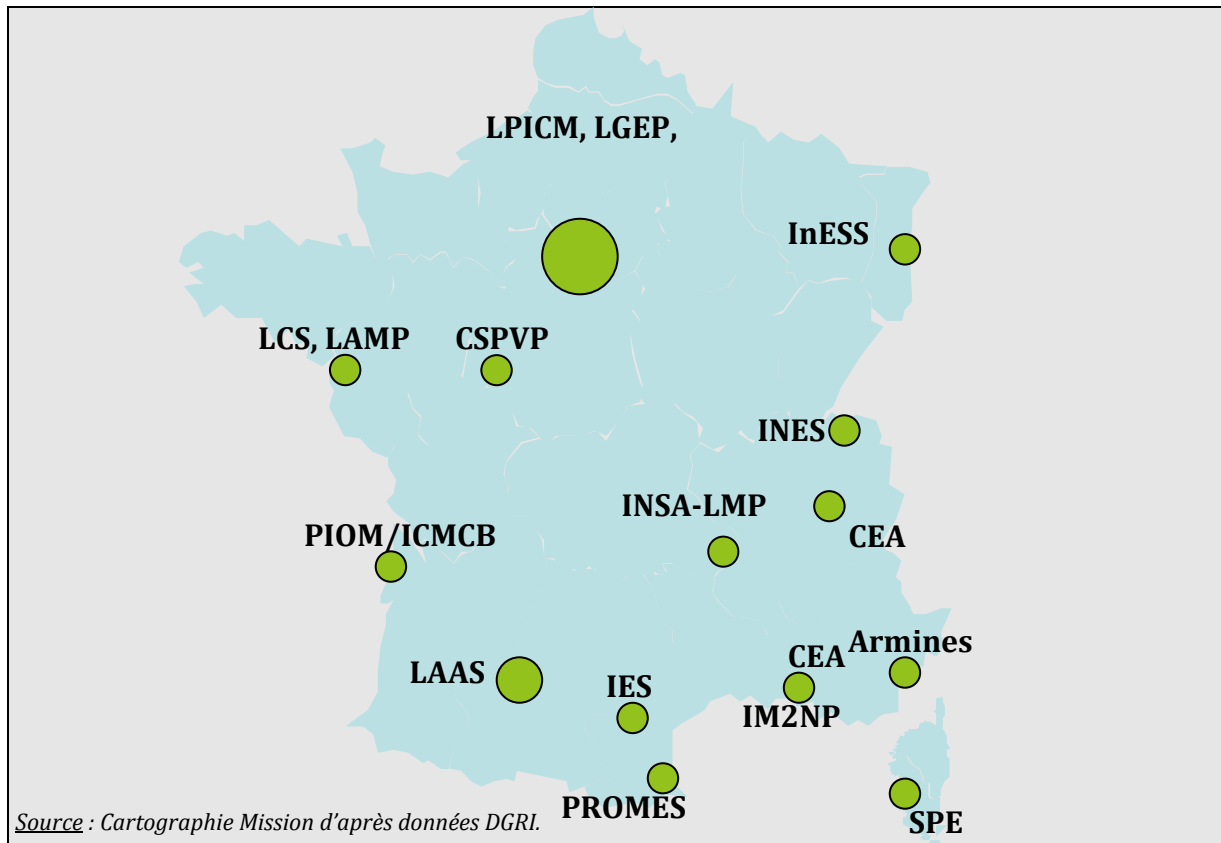
**Enfin, l'Europe** propose des aides européennes (réservées aux projets d'envergure). Dans le cadre du septième programme cadre de recherche et développement (7<sup>ème</sup> PCRD), l'Union Européenne émet régulièrement des appels à projets d'envergure dans le domaine de l'énergie. L'ADEME a été désignée comme point contact national (PCN) et à ce titre assure plusieurs tâches d'aide aux porteurs potentiels de projets, notamment de formation et d'information concernant ce programme, à la fois pour l'énergie et l'environnement. D'autres programmes, comme l'Énergie Intelligente Europe (EIE) peuvent également émettre des appels à projets touchant à l'énergie photovoltaïque.

### 2.2.2. La structuration de la recherche autour de deux principaux instituts, l'INES et l'IRDEP, doit être renforcée et leur articulation améliorée

Les travaux de recherche sur le secteur photovoltaïque sont conduits :

- ◆ à l'INES (Institut National de l'Énergie Solaire) ;
- ◆ à l'IRDEP (Institut de Recherche et Développement sur l'Énergie Photovoltaïque) ;
- ◆ ainsi que dans d'autres centres de recherche amont en France (cf. Encadré 3 : Panorama de la recherche française).

## Encadré 3 : Panorama de la recherche française

**Ile-de-France :**

- LPICM : Laboratoire de Physique des Interfaces et des Couches Minces, UMR7647 ;
- LGEP : Laboratoire de génie électrique de Paris, UMR8507 ;
- ICMPE : Institut de Chimie et des Matériaux Paris-Est ;
- IRDEP : Institut de Recherche et Développement sur l'Énergie Photovoltaïque, UMR7174, CNRS et EDF R&D ;
- ENSCP : École nationale supérieure de chimie de Paris ;
- CEA : Commissariat à l'Énergie Atomique et Alternative.

**Bourget du Lac :**

- INES : Institut National de l'Énergie Solaire, CEA- CNRS - Université de Savoie- CSTB ;

**Bordeaux :**

- ICMCB : Institut de Chimie de la Matière Condensée de Bordeaux, UPR9048(CNRS/Convention UB1) ;
- PION : laboratoire de Physique des Interactions Ondes-Matière est une UMR CNRS/ENSCP/UB1 ;
- LCPO : Laboratoire de Chimie des Polymères Organiques, CNRS, UB1.

**Toulouse :**

- LAAS : Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes, CNRS ;
- LAPLACE : Laboratoire Plasma et Conversion d'Énergie, Unité Mixte de Recherche UMR5213, Institut National Polytechnique de Toulouse (INPT) et l'Université Paul Sabatier (UPS).

**Perpignan :**

- PROMES : Procédés, Matériaux et Énergie Solaire UPR8521 du CNRS qui coopère étroitement avec l'Université de Perpignan.

**Montpellier :**

- IES : Institut d'Électronique du Sud, Unité Mixte de Recherche, UMR5214, UM2/CNRS.
- Marseille :
- CINaM : Centre Interdisciplinaire de Nanoscience de Marseille UPR3118.

**Cadarache :**

- CEA

**Toulon :**

- IM2NP : Institut Matériaux Microélectronique Nanosciences de Provence UMR6242.

**Lyon :**

- INL : Institut des Nanotechnologies de Lyon, UMR5270.

**Grenoble :**

- LPSC : Laboratoire de Physique Subatomique, UMR5821 ;
- CEA.

**Nantes :**

- LAMP : Laboratoire des Matériaux Photovoltaïques, université de Nantes.

**Strasbourg :**

- InESS : Institut d'Électronique du Solide et des Systèmes, UMR7163, Université de Strasbourg et du CNRS ;
- IPCMS : Institut de Physique et Chimie des Matériaux de Strasbourg, UMR7504, CNRS et Université de Strasbourg.

**Corse :**

- SPE : Sciences Pour l'Environnement, UMR6134.

*Source : DGRI.*

**L'INES (Institut National de l'Énergie Solaire)** a été créé le 3 juillet 2006 par convention entre le Conseil général de la Savoie, la Région Rhône-Alpes, le CEA (laboratoire LITEN), le CNRS, le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment), et l'Université de Savoie. Il est situé sur le site de Savoie Technolac à proximité de Chambéry. En 2010, il compte 250 chercheurs pour un budget de 25 M€, dont 18 M€ pour le solaire photovoltaïque, provenant à 30 % du budget du CEA et à 70 % de contrats industriels (dont OSEO).

Le programme de recherche de l'INES dans le domaine du photovoltaïque porte à la fois sur les cellules et modules, et sur les systèmes ainsi que le stockage. L'INES intervient notamment dans le cadre du programme Solar Nano Crystal en lien avec le consortium PV Alliance pour développer deux principaux axes d'innovation :

- ◆ améliorer le rendement des cellules à base de silicium polycristallin produites par Photowatt, dans le cadre d'une unité pilote ou « LabFab » de 25 MW, situé sur le site de Photowatt à Bourgoin-Jallieu, et qui devrait mobiliser des équipes de l'INES (investissement de 40 M€, démarrage en juillet 2010) ;
- ◆ développer des cellules à hétérojonction à haut rendement (silicium cristallin et silicium amorphe) : l'INES conduit des travaux de recherche sur son site en lien avec l'équipementier coréen Jusung, où il a déjà atteint des rendements de 20 %, et vise la mise en place d'un pilote industriel de 25 MW en 2012 sur le site du CEA à Grenoble ; les financements de ce LabFab 2 ne sont toutefois pas acquis et restent à consolider d'ici 2012.

Ces axes prioritaires illustrent le fait que **l'INES se situe, en 2010, plus dans une perspective de rattrapage que de développement d'un avantage compétitif** ; en particulier, la technologie d'hétérojonction pour laquelle des développements industriels suite au programme Solar Nano Crystal ne sont pas envisageables avant 2015 est déjà mise sur le marché par le japonais Sanyo à des rendements supérieurs à ceux qu'atteint l'INES en laboratoire (23 % contre 20 %). Il fait également apparaître **la part prépondérante de Photowatt dans les partenariats industriels de l'INES, qui semble disproportionnée par rapport aux enjeux industriels que présente l'entreprise** (cf. 3.1).

Au-delà de Photowatt, l'INES mène notamment des travaux dans le cadre de partenariats industriels dans le domaine de la purification du silicium (Ferropem), de la fabrication de lingots de silicium (ECM et Vésuvius) ou de l'encapsulation de cellules (Apollon Solar).

**Les moyens de l'INES doivent permettre, au-delà de l'optimisation des procédés industriels, des avancées technologiques capables de créer un avantage compétitif pour les entreprises.** Pour cela, la coopération avec les centres de recherche amont doit être renforcée et les partenariats industriels diversifiés.

**Positionné sur le secteur des couches minces, qui semble devoir prendre une part croissante du marché dans les années à venir étant donné ses faibles coûts et ses rendements en progrès, l'IRDEP doit atteindre une taille critique pour faciliter les transferts de technologies vers les entreprises,** comme cela a été fait pour sa spin-off Nexcis.

L'IRDEP (Institut de Recherche et Développement sur l'Énergie Photovoltaïque) a été créé en 2005 entre EDF, le CNRS et l'école de Chimie ParisTech. Il est situé à Chatou (Yvelines) et compte quarante-cinq chercheurs en 2010. Ses travaux portent principalement sur la réduction des coûts de production des modules PV, l'amélioration des rendements de conversion photovoltaïques, les procédés de dépôt de couches minces, et s'articulent autour de trois champs :

- ◆ la technologie à couche mince CIS ;
- ◆ les cellules à très haut rendement (cellules multijonctions) ;
- ◆ la recherche exploratoire en matière de couches minces (cellules hybrides nanostructures, oxydes conducteurs transparents).

Le budget 2010 de l'IRDEP est de l'ordre de 4 M€, dont 3 M€ d'EDF et 1 M€ issus des projets européens et ANR. L'IRDEP a été à l'origine de l'émergence de la start-up Nexcis (cf. 3.5) ; après plusieurs années dédiées à la consolidation préindustrielle du procédé de production de modules CIS à bas coût destiné à être transféré à Nexcis, l'IRDEP se concentre depuis la création de la spin-off sur un composé alternatif de CIS dont le rendement théorique est encore nettement supérieur à celui de la technologie développée par Nexcis et pour lesquels les rendements records ont à ce jour été obtenus au National Renewable Energy Laboratory (NREL) aux États-Unis.

Malgré une concurrence très soutenue au niveau mondial au sein des équipes de recherche, le positionnement de l'IRDEP semble pertinent, à la fois dans des perspectives de pré-industrialisation, et de développements à moyen terme, à travers :

- ◆ une technologie, le CIS, qui offre des possibilités de déploiement industriel à court terme, pour laquelle le couple coût/ rendement reste à optimiser pour permettre des développements industriels à grande échelle (cf. 3.5), et qui pourrait constituer une alternative ou un complément pertinent au CdTe sur le segment des couches minces étant donné les faiblesses de l'usage du cadmium (toxicité) ;
- ◆ des technologies de rupture susceptibles d'émerger à moyen terme et de dominer tout ou partie du marché du photovoltaïque grâce à leurs très hauts rendements, pour lesquelles le leadership technologique se situe à ce jour dans des laboratoires allemands et américains.

**Toutefois, afin de pouvoir d'une part être présent au niveau international, et d'autre part être en mesure de conduire rapidement à la création d'entreprise, l'IRDEP doit atteindre la taille critique par rapprochement avec d'autres équipes, en maintenant le principe d'un regroupement entre recherche privée et publique.** L'IRDEP, qui souffre aujourd'hui d'une taille trop faible pour être en mesure de mettre en place une structure de transfert de technologie, ce qui apparaît pourtant comme une priorité étant donné les échelles de temps très courtes en matière de développement du photovoltaïque, a pour projet de rejoindre un institut du solaire sur le plateau de Saclay qui rassemblerait également :

- ◆ le laboratoire de physique des interfaces et des couches minces (LPICM), unité mixte de recherche du CNRS et de l'École Polytechnique, dont les travaux portent principalement sur le silicium microcristallin ou polymorphe ;
- ◆ des équipes de R&D de Total ;
- ◆ un mastère École polytechnique et Paristech.

L'institut, qui regrouperait des équipes représentant actuellement 150 personnes environ (dont 70 permanents), a pour cible :

- ◆ des équipes de 200 personnes à 250, notamment par quelques recrutements de chercheurs étrangers ;
- ◆ un regroupement sur le site de Saclay, qui pourrait être financé dans le cadre du grand emprunt. L'institut est en effet sur le point de déposer un dossier de candidature comme Institut d'Excellence pour les Énergies Décarbonées (IEED)<sup>4</sup>, comportant une première phase d'investissement de l'ordre de 60 M€.

**Proposition n° 3 : La mission préconise que le projet d'institut du solaire de Saclay soit soutenu dans le cadre du fonds d'investissement d'avenir et soit mis en place rapidement pour être en mesure de développer un avantage technologique dans le cadre de la compétition internationale des équipes de R&D.**

**Au-delà des performances respectives de l'INES et de l'IRDEP, se pose la question de leur articulation.** En effet, l'équilibre entre ces deux centres de recherche semble résulter d'une logique double : logique de maturité des projets (l'IRDEP étant plutôt positionné sur des recherches amont et l'INES sur le développement technologique) et logique de génération technologique (silicium cristallin pour l'INES, couches minces pour l'IRDEP, les deux instituts conduisant par ailleurs des travaux sur les filières dites de troisième génération). Or, il résulte de cette double logique des lacunes. L'enjeu est pour l'INES, au-delà de l'optimisation des procédés industriels, de pouvoir contribuer à des avancées technologiques capables de créer un avantage compétitif pour les entreprises en travaillant de manière plus rapprochée avec des centres de recherche amont ; pour l'IRDEP et les autres centres de recherche amont, de bénéficier des moyens de la plate-forme de Chambéry.

Par ailleurs la question de la coordination avec les industriels en vue de faciliter les transferts de technologie vers les entreprises est au cœur de la question du pilotage des instituts de recherche. Elle passe par une meilleure association en amont des partenaires industriels (association aux instances de pilotage des instituts, cartographie des besoins des industriels : cf. proposition 2), mais aussi par la mise en place ou le renforcement des structures de valorisation (mise en place d'accords collectifs ou de partenariats pour l'accès aux résultats de la recherche et aux brevets).

---

<sup>4</sup> Au-delà des 1,35 Md€ affectés au fonds démonstrateur de l'ADEME pour les énergies renouvelables et décarbonées et la chimie verte », le programme « Investissements d'avenir » prévoit 1 Md€ de crédits pour des « instituts thématiques d'excellence en matière d'énergies décarbonées ». Ces crédits seront consacrés à la constitution de campus d'innovation technologique en matière d'énergies renouvelables visant une dimension mondiale.

**Encadré 4 : Le modèle américain de R&D dans le photovoltaïque : une organisation tournée vers la valorisation de la recherche**

Le *Department of Energy* américain (DOE) a mis en place un programme national de recherche en matière de solaire : le *Solar Energy Technologies Program*. La somme annuelle allouée en faveur du programme consacrée à l'énergie photovoltaïque est de 145 MUSD. Les domaines de recherche sont les suivants :

- technologies photovoltaïques innovantes (*Next generation PV devices and processes*). Les technologies à l'étude sont les cellules CIGS (cuivre, indium, gallium et sélénium) ou à base de tellurure de cadmium, le silicium amorphe, des semi-conducteurs de grande efficacité énergétique, les cellules à pigment photosensible (cellules Grätzel) et organiques ;
- pré-incubateur de technologie photovoltaïque : aide à des petites entreprises disposant d'une technologie reconnue à développer des prototypes commerciaux ;
- incubateur de technologie photovoltaïque : analyse du potentiel commercial (coût, fiabilité, performance) de nouveaux processus produits dans les prototypes ;
- partenariats de développement technologiques (*Technology Pathway Partnerships*) : désignation de projets pouvant faire l'objet d'une commercialisation massive avant 2015 ;
- chaîne logistique : réduction de coûts de production par l'amélioration des produits et des processus.

*Source : Servie économique régionale des États-Unis.*

**Proposition n° 4 : Améliorer la coordination entre les centres de recherche amont (notamment l'IRDEP) et la recherche technologique, organisée autour de la plate-forme de l'INES à Chambéry. Faciliter les transferts de technologie par des liens renforcés avec les industriels.**

Le projet de la direction générale pour la recherche et l'innovation (DGRI) du ministère de la recherche a transmis à la mission un document de travail proposant un schéma de pilotage de la R&D dans le photovoltaïque, fondé notamment sur :

- ◆ une clarification du positionnement des différents centres : IRDEP, LPICM, ENSCP, LCPO de Bordeaux sur la recherche amont / INES sur la recherche technologique et l'intégration ;
- ◆ une proposition de pilotage harmonisé de ces deux catégories de centres de recherche ;
- ◆ des partenariats renforcés avec les industriels.

Si ce projet semble intéressant, il apparaît que sa mise en œuvre devrait être accélérée. Par ailleurs, il ne répond pas à la question de l'articulation entre les différents financeurs (ANR, ADEME, OSEO) ni à celle de la mise en place d'une stratégie de R&D sur le secteur (notamment articulation avec la mission de l'Alliance nationale dans le domaine de l'énergie - ANCRE - et avec la feuille de route de l'ADEME dans le cadre du fonds démonstrateur).

**2.2.3. Les pôles de compétitivité, qui recensent un nombre important de projets innovants dans le domaine du photovoltaïque, constatent que peu d'entre eux parviennent à passer au stade de l'industrialisation**

**Dans un contexte d'absence d'entreprises industrielles moyennes ou grandes sur le secteur, les pôles de compétitivité peinent à faire émerger des projets innovants offrant des perspectives de développement industriel.**

**Les pôles de compétitivité** Capénergies (Provence-Alpes-Côte d'Azur), Derbi (Languedoc-Roussillon), Tenerrdis (Rhône-Alpes) et Sciences et Systèmes de l'Énergie Électrique (région Centre) interviennent dans le domaine des énergies renouvelables. Les pôles permettent la structuration de projets, le plus souvent mixtes (entreprises, recherche, collectivités) et accompagnent l'obtention d'aide auprès des guichets nationaux (ANR, OSEO et ADEME), européens (PCRD) ou locaux (conseils régionaux et généraux, autres collectivités).

Le pôle Capénergies rassemble 400 acteurs de l'industrie, de la recherche et de la formation des régions Provence-Alpes-Côte d'Azur, Corse et d'outre-mer. Son champ d'intervention est la maîtrise de la demande énergétique ainsi que le développement des ENR. Une trentaine de projets relatifs au photovoltaïque ont été labellisés et financés dans le cadre du pôle sur la période 2006-2010, pour un montant total des projets de 142 M€ dont 34 M€ d'aides.

Le pôle compte plusieurs projets labellisés en matière de solaire photovoltaïque :

- ◆ projets relatifs à l'amont, portant sur les matériaux (couches minces ou nanostructures) ou sur les performances des systèmes (optimisation des performances sous ombrages par reconnexion automatique des panneaux, refroidissement, systèmes électriques) ;
- ◆ projets de déploiement d'installations à caractère exemplaire ou de vitrine ;
- ◆ expérimentations de labels pour les entreprises de l'aval.

Aucune des sociétés du pôle présente sur l'amont de la filière n'offre de perspectives de développement ni d'industrialisation à moyen terme, du fait de difficultés de financement auprès des investisseurs financiers comme auprès des groupes industriels ; à défaut d'investissement privé suffisant, les aides publiques ne parviennent pas à créer un effet de levier et le développement du marché de production lié aux tarifs de rachat est sans effet sur le développement de l'innovation.

**Enfin, il apparaît que l'émergence d'entreprises innovantes dans la filière photovoltaïque souffre de l'insuffisance des investissements ou des projets de développement collaboratifs de la part des grands énergéticiens ou des grands industriels français.** Le seul acteur présentant une stratégie d'investissement systématique dans les PME innovantes est EDF Énergies Nouvelles (EDF EN), qui détient notamment 19 % du capital de Nexcis, 50 % du capital d'Apollon Solar, et qui est membre du consortium PV Alliance. Toutefois, le « monopole d'investissement » d'EDF EN présente un double défaut :

- ◆ il ne peut à lui seul répondre au besoin de financement de l'ensemble des entreprises innovantes du secteur, parfois d'ailleurs positionnées sur des technologies concurrentes ;
- ◆ il induit un rapport de force déséquilibré entre les pouvoirs publics et l'entreprise, qui tient à la fois le rôle de principal promoteur du développement de la filière photovoltaïque et de principal bénéficiaire des politiques publiques menées dans le secteur.

En revanche, des acteurs comme Total, ST Microelectronics, GDF-Suez, Saint-Gobain, etc. n'ont pas investi dans les entreprises innovantes ou projets issus de la R&D, du moins en France. Or leur implication sur le secteur est une condition nécessaire à l'émergence d'une véritable filière industrielle.

**Proposition n° 5 : La mission préconise que les pouvoirs publics, à un niveau politique, mobilisent les principaux acteurs de l'énergie et de l'industrie de manière à ce que les importants moyens de recherche et de développement engagés trouvent des relais de croissance à travers ces grands groupes.**

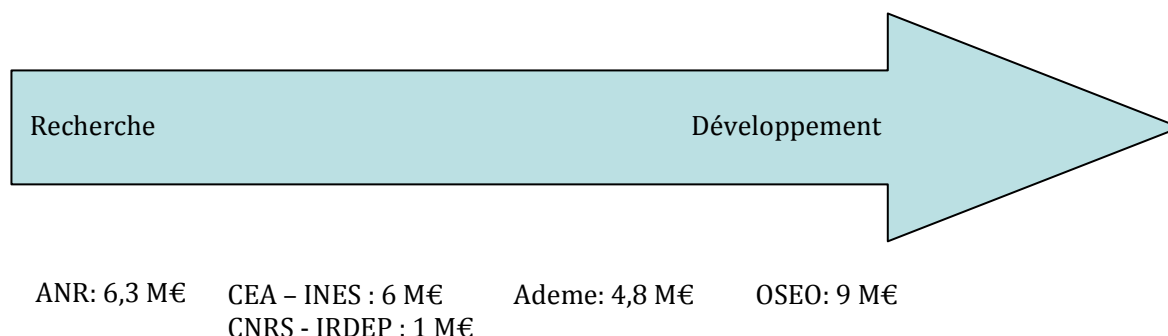
#### **2.2.4. Le montant total de l'effort de R&D français reste inférieur à celui des principaux acteurs du domaine et sans commune mesure avec les moyens anticipés pour le développement du parc**

La France s'est ainsi dotée de moyens de financement de la recherche qui couvrent les différentes étapes de R&D, de l'amont à l'aval (cf. Graphique 7), et d'une organisation en instituts ayant commencé à structurer le secteur, même si leur consolidation et leur articulation restent à poursuivre. Ces moyens atteignaient en 2009 de l'ordre de 26 M€ d'après les informations dont dispose la mission ; ils devraient croître de manière accélérée en 2010, avec d'une part l'augmentation des moyens mis en œuvre par OSEO pour l'innovation industrielle et d'autre part les appels à projet du fonds démonstrateur et des investissements d'avenir pilotés par l'ADEME.

Toutefois, malgré ces évolutions positives, l'effort de R&D français reste :

- ◆ en deçà de celui consenti par les pays leaders dans le domaine ;
- ◆ très inférieur aux moyens qui sont en passe d'être alloués au développement du parc de production d'électricité photovoltaïque.

Graphique 6 : Effort public de R&D dans le photovoltaïque en 2009



Source : Mission<sup>5</sup>.

En effet, le rapport 2009 *PVPS Trends report* de l'agence internationale de l'énergie (IEA), évalue l'effort de R&D français à 12 M€ pour 2008, pour l'ANR et l'ADEME. Pour l'année 2009, le budget de ces deux organismes est du même ordre (11,1 M€). **L'étude de l'IEA positionne la France en sixième position en termes d'effort de R&D**, derrière les États-Unis, l'Allemagne, la Corée, le Japon et la Grande-Bretagne. Le montant de la R&D française en 2008 était sept fois inférieur à celui des États-Unis et cinq fois inférieur à celui de l'Allemagne (cf. **Encadré 5**).

Tableau 5 : Montant de l'effort de R&D publique des pays membres de l'AIE

Pays	Effort de R&D 2008 ( M€)
États-Unis	83,3
Allemagne	59,4
Corée	35,9
Japon	24,3
Grande-Bretagne	14,8
France	12 <sup>6</sup>
Pays-Bas	12
Espagne	12

Source : IEA – *PVPS Trends report 2008* (pays de l'OCDE seulement : hors Chine).

<sup>5</sup> La DGRI a communiqué à la mission les résultats d'une enquête menée auprès des organismes publics dans le cadre du suivi de la mise en œuvre des engagements du Grenelle de l'environnement relatifs à la recherche ; cette enquête fait état d'un budget prévisionnel 2009 pour le solaire (photovoltaïque et thermique) de 13 M€ pour le CEA et de 15 M€ pour le CNRS. N'ayant pas eu accès au détail de ces chiffres, la mission s'en tient aux données fournies par l'INES et l'IRDEP. Pour Oséo, le budget annuel est estimé par annualisation de l'enveloppe globale pluriannuelle.

<sup>6</sup> Pour la France, l'étude ne tient compte que des budgets ANR et ADEME, c'est-à-dire hors budgets propres du CEA et hors Oséo. La mission n'a pas été en mesure de vérifier l'homogénéité des données et des types de financements pris en compte entre pays.

**Encadré 5 : Le modèle allemand : un soutien important à la recherche publique qui travaille en étroite collaboration avec le privé**

La R&D dans le secteur photovoltaïque a été subventionnée par l'État fédéral en 2009 à hauteur de 70 M€ auxquels s'ajoutent des investissements privés de 180 M€ annuels. En avril 2010, le gouvernement fédéral a annoncé un nouveau programme de soutien à la recherche privée dans le domaine du photovoltaïque d'un montant de 100 M€. Ce programme, qui devrait entraîner des investissements industriels de 400 M€, a été mis en place pour compenser la baisse des tarifs d'achat garantis.

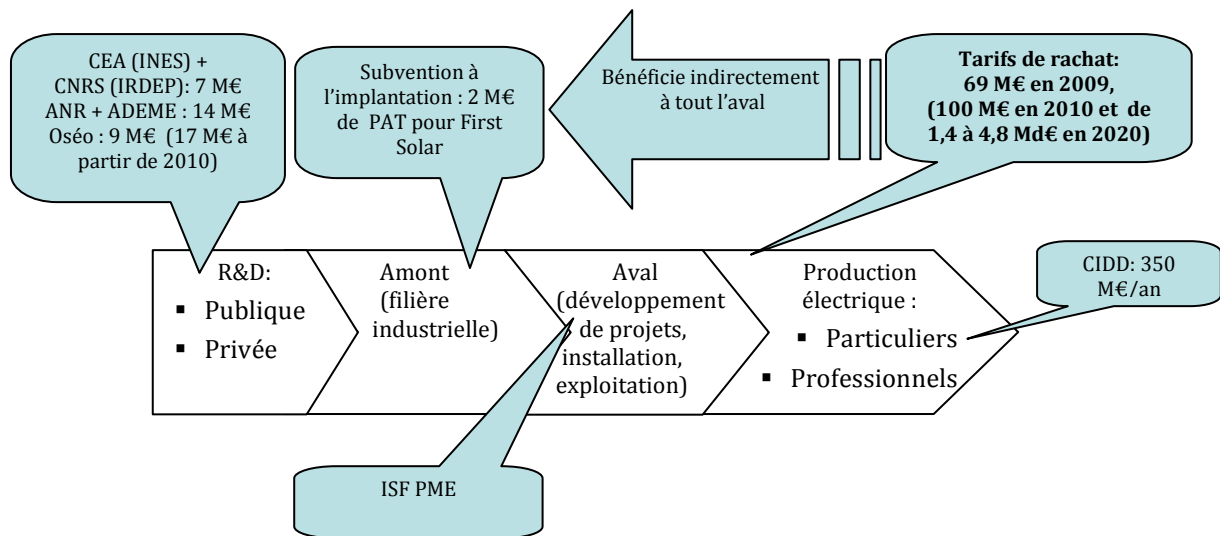
Ces financements sont utilisés par la recherche publique allemande qui, dans le secteur photovoltaïque, est principalement menée par quatre institutions, travaillant en étroite collaboration avec le monde industriel :

- ◆ l'institut Fraunhofer des systèmes énergétiques solaires (ISE) est le plus grand institut de recherche solaire européen avec 830 collaborateurs et plus de 40 M€ de budget (2008). Ses travaux vont de l'exploration des fondements techniques à la réalisation d'installations de démonstration en passant par le développement de prototypes. Il étudie les cellules solaires multi-jonctions hautement performantes et les systèmes PV à haute concentration. Il collabore activement avec les industriels, des universités et les autres instituts Fraunhofer ;
- ◆ le centre allemand de recherche aérospatial dispose d'une unité de 90 employés qui développe et teste des composants pour les systèmes CSP (technologies solaires à concentration) et réalise des études de faisabilité technique et économique. Il met ses capacités de R&D à disposition de l'industrie allemande pour favoriser l'introduction des technologies CSP sur le marché européen.
- ◆ la division « Énergie » du HZB (centre Helmholtz de Berlin) se focalise sur les aspects de recherche fondamentale et de développement de prototypes avec deux objectifs : réduire les coûts et augmenter le rendement. Elle travaille aux côtés de la Technische Universität de Berlin et de huit industriels, en particulier sur les technologies à couches minces et les nanotechnologies.
- ◆ le groupe de recherche IEF-5 de l'IEF (Institut pour la recherche énergétique) : il fait partie du Centre Helmholtz de recherche de Jülich qui héberge le Projektträger Jülich, le centre de gestion de projets qui gère le financement public projets liés aux énergies renouvelables. IEF-5 travaille sur les cellules photovoltaïques à couche mince à base de silicium.

*Source : Service économique régional de Berlin*

Par ailleurs, **les moyens dévolus au développement du marché sont en passe de croître beaucoup plus rapidement que ceux de la R&D** ; ces moyens, qui passent par les tarifs de rachat et le crédit d'impôt développement durable notamment, comptabilisés en centaines de millions et bientôt en milliards d'euros, ont, s'ils bénéficient à l'activité aval et à l'atteinte des objectifs du Grenelle, très peu contribué au développement d'une filière industrielle (cf. **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Graphique 7 : Cartographie des aides publiques au photovoltaïque en 2009



Source : Mission.

**Proposition n° 6 :** La mission préconise de conforter l'effort de R&D annoncé, notamment à travers les programmes d'OSEO et l'investissement d'avenir, tout en s'assurant de l'efficacité de ces moyens en termes de valorisation (rapidité des circuits, diversité des partenaires industriels).

### 2.3. Conclusion sur la R&D dans le secteur photovoltaïque

En conclusion, la mission préconise que l'effort de R&D entrepris dans le domaine du photovoltaïque soit conforté mais aussi optimisé dans :

- ◆ ses thématiques, en ciblant les technologies émergentes (deuxième et troisième générations) ou les secteurs connexes à l'industrie du photovoltaïque, qui comptent déjà des acteurs industriels majeurs français (propositions 1 et 2) ;
- ◆ son organisation et son pilotage, qui doivent permettre aussi bien les avancées théoriques grâce à la recherche amont, que leur valorisation industrielle grâce à une plate-forme technologique. Les liens avec les grands industriels, que ce soit sous forme de recherche partenariale ou d'investissement dans des spin-off issues de la R&D doivent être renforcés (propositions 3, 4 et 5) ;
- ◆ ses moyens, en confirmant les renforts annoncés mais aussi en renforçant la mesure de leur efficacité en termes de valorisation (proposition 6).

### 3. L'amont de la filière française reste embryonnaire

La filière française amont du photovoltaïque présente les caractéristiques suivantes :

- ◆ un seul acteur, Photowatt, intervient de manière intégrée sur tout l'amont de la filière du silicium cristallin, de la production de silicium à la fabrication de modules. Sa production (70 MW/an) est nettement inférieure aux besoins du marché français ;
- ◆ les fabricants de modules de silicium cristallin (par assemblage de cellules), en nombre limité jusqu'en 2008 sont en développement depuis deux ans. La prime d'intégration au bâti n'a pas réellement permis de créer de produits de niche sur ce segment ;
- ◆ plusieurs sociétés de petite taille se positionnent sur des étapes très précises du processus de production, pour lequel elles proposent des solutions innovantes, souvent développées dans le cadre de programme de R&D. Leur volume de production reste toutefois marginal ;
- ◆ le segment des couches minces est embryonnaire, même s'il présente deux perspectives de développement : l'émergence de Nexcis, spin-off de l'IRDEP, dont le positionnement au stade de la production reste à consolider et l'implantation possible de l'américain First Solar à Blanquefort (Aquitaine) ;
- ◆ plusieurs industriels français sont présents sur le marché de la fourniture des équipements industriels et matériaux pour le photovoltaïque, ainsi que sur celui du « balance of system » (BOS), avec toutefois peu de capacités de production localisées en France.

#### 3.1. Le seul acteur français intégré dans le domaine du photovoltaïque, Photowatt, doit réduire fortement ses coûts et proposer des progrès technologiques pour être compétitif

**Le seul acteur français intervenant de manière intégrée** sur l'amont de la filière photovoltaïque, de la fabrication des lingots de silicium à l'assemblage des modules, est Photowatt, société initialement créée en 1979 en tant qu'organisme de recherche dans le domaine des technologies photovoltaïques, installée à Bourgoin Jallieu (Isère). Sa capacité de production, qui était de 3 MW en 1996 puis de 13 MW en 2000 suite à son rachat par le canadien ATS en 1997, est de 70 MW en 2010 ; elle a produit 40 MW de modules en 2009, pour un chiffre d'affaires de 130 M€. Elle compte à la date de la mission 700 employés, dont 550 pour la fabrication.

Photowatt qui se situait à sa création dans les trois premiers fabricants mondiaux et figurait encore au début des années 2000 dans les dix leaders du marché, représente en 2010 moins de 1 % de la production mondiale de cellules et modules alors que le « top 10 » concentre plus de 60 % de la production.

Photowatt a connu en 2009 d'importantes difficultés à la fois conjoncturelles et structurelles :

- ◆ l'entreprise a été touchée de plein fouet par l'effondrement du marché espagnol, qui conjugué à la hausse des capacités mondiales de production, a abouti à un effondrement des prix ;
- ◆ elle a des coûts de production élevés, liés notamment à un fort niveau de main-d'œuvre sur les fonctions d'assemblage ;
- ◆ elle a cherché, suite à la hausse des prix du silicium, à baser sa fabrication sur le silicium métallurgique au lieu du silicium électronique, ce qui a dégradé fortement la qualité de ses produits.

**Depuis 2010, la situation est devenue un peu plus favorable pour Photowatt, à la fois grâce à des actions menées par l'entreprise, à un soutien public via le programme Solar Nano Crystal et à la conjoncture :**

- ◆ Photowatt a entrepris un plan d'action de réduction des coûts, en agissant sur l'optimisation des process (réduction des pertes sur les lignes de production), sur la performance du produit (composition du silicium, connexions électriques, épaisseur des plaques), sur les achats et la productivité des employés ;
- ◆ l'entreprise bénéficie par ailleurs de l'évolution favorable du cours euro/dollar et de la reprise du marché du photovoltaïque, notamment tiré par l'Allemagne, où l'avantage est revenu à l'offre. Dans ce contexte, conjugué au plan de réduction évoqué précédemment, ses coûts de production, qui étaient, en 2009, 50 % supérieurs à ceux de ses concurrents chinois, se sont rapprochés des prix de vente des modules chinois : les coûts de Photowatt atteignent en 2010 selon l'entreprise 1,6 €/Wc, alors que les modules chinois sont vendus à 1,55 €/Wc ;
- ◆ elle a développé ses activités sur l'aval (fourniture d'installations clés en main), où ses marges sont plus importantes ;
- ◆ enfin, elle a bénéficié des aides publiques dans le cadre du consortium PV Alliance et du programme Solar Nano Crystal, qui a permis l'installation d'un « LabFab 1 » de 25 MW destiné à permettre en lien avec les équipes de l'INES des gains en termes de rendement des modules (objectif de gain de 0,25 % de rendement par semestre).

Malgré ces améliorations, il apparaît que l'entreprise reste fragile. Le financement du « LabFab 2 » dans le cadre de Solar Nano Crystal, qui devrait permettre un saut technologique avec le développement d'une technologie à hétérojonction et donner à Photowatt un avantage compétitif à échéance 2012, apparaît également incertain. Enfin, une incertitude plane sur l'évolution de l'actionnariat de l'entreprise, le canadien ATS ayant annoncé son souhait de se retirer du capital.

Pour atteindre son objectif d'accéder à une taille critique de 500 MW de production destinés à 80 % à l'export, l'entreprise a besoin de pouvoir s'appuyer sur le marché national à hauteur de 20 % de ses ventes. Pour cela il existe deux options :

- ◆ Photowatt est en mesure rapidement de vendre au prix du marché ;
- ◆ elle est soutenue par des mesures de protection, comme des clauses d'emploi local dans les appels d'offre des collectivités ou de l'État si ce système est retenu (l'alternative proposée par Photowatt aux clauses d'emploi local est celle du contenu CO<sub>2</sub> des produits). Ce type de mesure, dont la faisabilité juridique n'est pas assurée, n'aurait dans tous les cas pas pour effet de discriminer spécifiquement Photowatt par rapport aux produits de First Solar si le projet d'implantation de cette entreprise était confirmé (cf. 3.5).

En conclusion, la mission considère que Photowatt, qui a déjà fait l'objet de soutiens publics directs ou indirects importants, peut difficilement bénéficier de nouveaux appuis à travers le marché national. De plus, comme cela a été démontré précédemment, le marché national joue seulement le rôle de base pour un développement à l'international : l'enjeu pour Photowatt est de se positionner sur un marché international via un avantage prix, qualité ou technologique. **L'action des pouvoirs publics doit être prioritairement tournée vers l'aide à l'exportation** (relai de la part des services du commerce extérieur, garantie de l'État français pour les appels d'offre étrangers).

**Deux abandons de projets sur l'amont de la chaîne du silicium illustrent la difficulté française à développer un avantage comparatif sur ce segment :**

- ◆ Photovoltech, filiale commune de GDF-Suez et Total, qui produit en Belgique des cellules photovoltaïques à partir de plaquettes (capacité de 140 MW), avait annoncé en 2009 un projet d'extension à Carling en Moselle, abandonné depuis lors ;
- ◆ le projet de fabrication de silicium « Silpro » (Silicium de Provence), porté de 2006 à 2009 par la compagnie d'énergies renouvelables Econcern (Pays-bas), EDF Energies Nouvelles et le fabricant norvégien de wafers de silicium NorSun, sur le site de Saint-Auban (ancienne usine Arkéma).

Toutefois, un projet mené par le consortium constitué autour de l'entreprise MPO (Moulages Plastiques de l'Ouest) dans le cadre du projet PV 20 financé par OSEO (cf. 2.2.1.) a pour objectif de créer une filière compétitive en développant des procédés innovants et à bas coûts sur la filière intégrée du silicium cristallin<sup>7</sup>.

**3.2. La production de modules (assemblage de cellules) en France a connu un développement rapide en 2009-2010**

Alors que jusqu'à 2008 le marché français des modules de silicium était dominé par les seuls Photowatt et Tenesol (filiale d'EDF), plusieurs industriels français de taille intermédiaire se sont développés en 2009 et 2010. Ces nouveaux entrants sur le marché, qui assemblent des cellules de fabrication étrangère, ont différentes stratégies de positionnement : spécialisation dans l'intégré au bâti et/ou intervention également en aval de la chaîne pour le développement de projets.

La capacité totale de fabrication de modules de l'ordre de 220 MW au premier trimestre 2010, et les extensions de capacités ou nouveaux projets annoncés avant la fin de l'année 2010 amènent cette capacité à près de 400 MW. Plusieurs spécialistes de l'aval annoncent également des projets de fabrication de modules à moyen terme (par exemple, projets de la société Solaire Direct), ce qui confirme le modèle de remontée du développement de projets vers l'assemblage.

---

<sup>7</sup> Toute l'étendue de la filière (sauf la production de silicium charge) devrait être représentée dans le projet, avec, depuis l'amont, Emix pour la fourniture des lingots de silicium et la production des plaquettes, MPO pour la fabrication de cellules sur une ligne de production de grande capacité (100 MW) délivrée par SEMCO Engineering, enfin Tenesol pour la qualification des cellules produites et l'intégrant dans ses panneaux solaires. L'INES intervient aussi en transférant des procédés de fabrication de cellules solaires à MPO et en effectuant la recherche sur l'architecture de la cellule de façon à mettre au point les procédés par voie sèche.

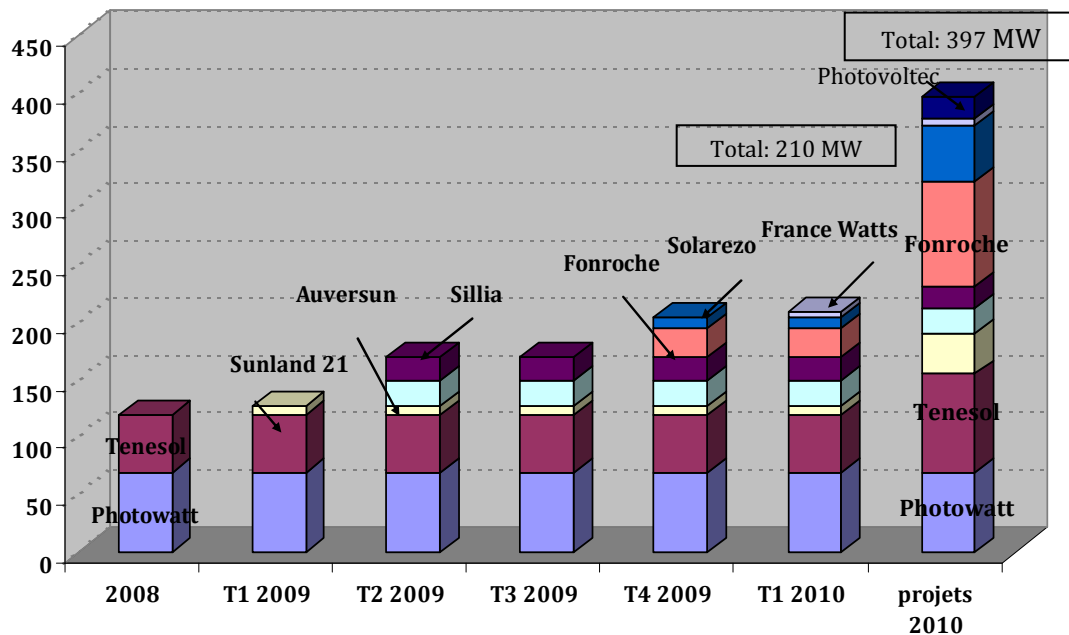
## ANNEXE

Tableau 6 : Fabricants de modules photovoltaïques implantés en France

Nom	Capacité (MW)	Site	Démarrage de la production	Technologie Fournisseur	Emplois	Commentaires
Photowatt	70	Bourgoin-Jallieu	1984 (60 MW depuis 2007)	Multicristallin Photowatt	550 emplois industriels (dont 200 sur l'assemblage)	Positionnement intégré
Tenesol	50 (85 en 2010)	Toulouse, 31 (Haute Garonne)	2005	Mono et multicristallin	100 emplois industriels	Positionnement aval Second site en Afrique du Sud
Auversun	22	Clermont-Ferrand , 63 (Puy-de-Dôme)	Juin 2009	Mono et multicristallin SMA, Q-Cells	ND	Positionnement aval Un produit ciblé vers les installations agricoles : Agrisun
Sunland 21	8 (35 en 2010)	Anse, 69 (Rhône)	2009	Monocristallin	ND	Activité de R&D ? (partenariats INES, ANR, ADEME, Tenerrdis).
Sillia	20	Lannion, 22 (Côtes d'Armor)	Juin 2009	Mono et multicristallin Q-Cells	ND	ND
Fonroche	25 (90 en 2010)	Roquefort, 47 (Lot-et-Garonne)	octobre 2009	Mono et multicristallin	55 (120 en 2010)	Positionnement aval
Systovi	ND	Saint Herblain, 44 (Loire-Atlantique)	octobre 2009	Monocristallin Bosch Solar	ND	Production annoncée 2011 : 40 MW
Solarezo	10 (50 en 2010)	Pontoux-sur-l'Adour, 40 (Landes)	décembre 2009	Monocristallin	ND	Positionnement aval Extension à 50 MW annoncée pour 2010 ; une centaine d'emplois annoncés
Voltec Solar	20	Dinsheim-sur-Bruche, 67 (Bas-Rhin)	février 2010	ND	ND	60 annoncées pour septembre 2010
France Watts	5	Barentin, 76 (Seine Maritime)	mars 2010	Mono et multicristallin	ND	Positionnement aval

Source : Mission

Graphique 8 : Capacité française de production de modules (en MW)



*Source : Mission.*

Bien que très peu de données soient disponibles sur les emplois de ces entreprises les quelques ratios connus (Tenesol : 100 emplois industriels pour 85 MW, Fonroche : 120 emplois industriels pour 90 MW à fin 2010) ou annoncés (Solarezo : 100 salariés pour 50 MW) suggèrent que **le potentiel d'emploi lié à ce segment est relativement limité**. Ainsi, par extrapolation, dans l'hypothèse où toutes les capacités d'assemblage de modules correspondant à la PPI (550 MW/ an) seraient situées en France, ce segment emploierait de l'ordre de 500 personnes.

En termes de valeur ajoutée, l'analyse que fait PricewaterhouseCoopers du résultat d'exploitation montre par ailleurs que ce segment réalise des marges relativement faibles (cf. Encadré 1) : les ratios résultat d'exploitation sur chiffres d'affaires (de l'ordre de 8 %) sont parmi les plus faibles de la filière.

Ce segment est très largement tourné vers le marché national ; or les principales perspectives de croissance sont à l'exportation. Une entreprise fait toutefois exception vis-à-vis de ce constat : Tenesol, filiale d'EDF et de Total, qui intervient en Europe et dans plusieurs pays d'Afrique et du Moyen-Orient, met en œuvre une stratégie d'exportation liée à leurs activités sur l'aval dans le monde. Toutefois Tenesol, qui a été l'un des acteurs historiques du photovoltaïque en France, est confrontée à un enjeu de reconstitution de son actionnariat, avec notamment la volonté affichée par EDF de se recentrer vers les activités de production d'électricité plutôt que la fabrication industrielle.

Par ailleurs, les purs fabricants de modules sont menacés par la concurrence des fabricants de cellule qui ont une stratégie de descente de la chaîne.

**Enfin, le développement récent des entreprises et des sites de fabrication de modules, qui semblent tirer bénéfice de la proximité avec le marché national, constitue un retour en emploi et en valeur ajoutée modeste au regard de l'ambition de la politique du photovoltaïque ; ce segment de marché ne semble pas en mesure de constituer le socle d'une filière industrielle.**

### 3.3. Les retours de la prime d'intégration au bâti en termes d'innovation et de développement des produits de niche ne sont pas à la hauteur des ambitions qui avaient conduit à la mettre en place

L'introduction de la prime d'intégration au bâti en 2006 avait pour objectif l'élaboration de produits de niche, et la mise en place d'une filière spécifique française tournée vers les produits adaptés au bâtiment. Or, si la prime à l'intégration au bâti a sans doute contribué au développement des entreprises de fabrication de modules et de systèmes évoquées au chapitre 3.2), ce n'est pas en favorisant le développement de modules spécifiques mais en permettant aux assembleurs de regagner en compétitivité en réduisant les coûts des systèmes d'intégration<sup>8</sup>. La nouvelle définition de cette prime ne changera sans doute rien à cette situation. En effet :

- ◆ la majorité des produits répondant à la définition de l'intégration au bâti de l'arrêté de 2006 sont en fait la juxtaposition de modules photovoltaïques et de structures métalliques (« bacs acier »), qui représentent 75 % du marché en 2009 à dire d'experts. Ces produits correspondent à des modules tout à fait classiques, où seuls les systèmes d'intégration sont adaptés au marché français ;
- ◆ les produits répondant à la définition renforcée de l'intégration au bâti introduite par l'arrêté du 12 janvier 2010 (cf. encadré 6), qui ne représentaient en 2009 que de l'ordre de 25 % de ce marché, sont répartis entre des systèmes dans lesquels seuls les systèmes d'intégration (cadres drainants par exemple) sont spécifiques (20 % du marché en 2009) et des systèmes dans lesquels le module est réalisé sur mesure (« tuile photovoltaïque », 5 % du marché en 2009). Dans un cas comme dans l'autre, les équipements spécifiques (systèmes d'intégration ou module) ne sont pas nécessairement produits en France : **ainsi la tuile d'Imerys est-elle réalisée sur mesure par Suntech (Chine), tandis que celle de Saint-Gobain produite dans l'usine luxembourgeoise du groupe.**

#### Encadré 7 : Définitions de l'intégré au bâti et les tarifs

L'arrêté du 10 juillet 2006 définissait comme suit la notion d'équipements intégrés au bâti : « les équipements de production d'électricité photovoltaïques assurant également une fonction technique ou architecturale essentielle à l'acte de construction. Ces équipements doivent appartenir à la liste exhaustive suivante : toitures, ardoises ou tuiles conçues industriellement avec ou sans supports ; brise-soleil ; allèges ; verrière sans protection arrière ; garde-corps de fenêtre, de balcon ou de terrasse ; bardages ; mur rideau.

L'arrêté du 12 janvier 2010 limite, d'une part, le bénéfice de la prime d'intégration au bâti aux installations de moins de 250 kWc, et d'autre part retient une définition nettement plus complexe pour les équipements en toiture, avec un cumul de conditions pour bénéficier de la prime d'intégration au bâti :

- le bâtiment doit être clos et couvert, avoir plus de deux ans (sauf pour les bâtiments à usage principal d'habitation) ;
- les panneaux doivent être dans le plan de la toiture et remplacer les éléments du clos et couvert et assurer l'étanchéité ;
- pour les systèmes rigides, le module doit être l'élément principal de l'étanchéité tandis que pour les films souples l'assemblage doit être effectué en usine, ou sur site dans le cadre d'un contrat de travaux unique.

<sup>8</sup> En intégrant les marges de l'assemblage et de l'intégration, ces entreprises retrouvent une part de compétitivité sur des produits livrés prêt à l'emploi aux installateurs, par rapport à l'alternative qu'est l'achat séparé de modules et de système d'intégration sur le marché. Ceci fonctionne tant que les grands fabricants de panneaux, chinois notamment, ne se sont pas tournés vers les systèmes photovoltaïques « prêts à l'emploi » car le marché est trop limité pour eux.

L'arrêté prévoit une période de transition d'un an (jusqu'au 1<sup>er</sup> janvier 2011) pour la mise en œuvre de cette définition. Par ailleurs, il introduit pour les installations ne répondant pas à cette définition la notion d'intégration simplifiée au bâti, qui donne lieu à un niveau de prime plus faible ; dans ce cas, il suffit que le système photovoltaïque assure l'étanchéité et soit parallèle au plan de la toiture.

Enfin, il apparaît que les produits intégrés au bâti n'ont pas connu de développement hors des tarifs spécifiques : malgré les avantages techniques (du point de vue du bâtiment) ou esthétiques (cf. graphique 9) mis en avant par leurs promoteurs, ces produits se seraient assez peu développés dans les autres pays d'Europe.

#### Graphique 10 : Comparaison des différents systèmes d'intégration en toiture



Surimposition

Panneaux intégrés au bâti sur bac acier

Tuile photovoltaïque

*Source* : image 1 : site [www.photovoltaique.guidenr.fr](http://www.photovoltaique.guidenr.fr) ; images 2 : site [www.saint-gobain-solar.com](http://www.saint-gobain-solar.com) ; image 3 : site *imerys terre cuite*.

**Ainsi, si l'idée initiale poursuivie en 2006 avec la prime d'intégration au bâti paraissait pertinente, les résultats ne sont pas à la mesure des ambitions et le bilan coût / avantage est défavorable :**

- ◆ le système n'a pas fonctionné en tant que barrière à l'entrée puisque la majorité des équipements répondant à la définition de l'intégration au bâti sont importés ;
- ◆ très peu de produits de niche à haute valeur ajoutée ont vu le jour, dans la majorité des cas les systèmes d'intégration pour la bâtiment sont à faible contenu technologique (support en acier) ;
- ◆ même si la nouvelle définition devait susciter un peu plus d'innovation au plan technique (étanchéité) ou esthétique, les produits correspondant seraient intéressants pour un marché résidentiel mais non agricole ou industriel ;
- ◆ si l'intégration au bâti a renforcé la création d'emploi sur l'aval de la filière (plus de temps d'étude et de main d'œuvre pour l'installation), c'est au prix d'un fort surcoût, comme le suggère l'analyse des écarts de coûts France - Allemagne réalisée par l'entreprise Tenesol (cf. Graphique 11 : surcoût de 12 % même pour l'intégration simplifiée).

**Proposition n° 7 : La mission préconise donc de limiter la prime d'intégration au bâti au seul segment des particuliers (toitures <9 kWc), où se situent les principales perspectives en termes de marché de niche. Pour les autres types de bâtiments ou pour les installations des particuliers non intégrées au bâti, la prise en compte des surcoûts d'installation par rapport au sol sera traitée par un tarif « bâtiment » qui ne comportera qu'un nombre très limité de critères techniques et pas de notion d'intégration.**

Cette dernière proposition nécessitera, outre les dégressions proposées pour le tarif à structure constante, de réinitialiser le niveau de tarif pour les bâtiments étant donné que les contraintes techniques seront allégées (facteur de réduction du coût).

Graphique 11 : Écarts de coûts entre la France et l'Allemagne : analyse réalisée par Tenesol

Installation de 100 KWp	France	Allemagne	Toiture simple avec pente
Module	1,75	1,75	
Matériel	0,55	0,5	
Pose classique	0,3	0,2	Sécurité en France vs Allemagne
Ingénierie / étude	0,05	0,03	
Surcout intégré simplifié	0,4		
<b>Sous total Système seul</b>	<b>3,05</b>	<b>2,48</b>	
Traitement administratif / démarches bancaires	0,06	0,02	50 heures @ 80 €/heure
Coût commercial	0,1	0,05	Maturité et densité
Marge	0,32	0,26	
Somme : prix de vente	3,53	2,81	
Délai Raccordement	0,09		Maximum : 9 mois en France à 6% pris par les établissements financiers
Coût de raccordement	0,15	0,05	
Assurances (décennale, dommage ouvrage)	0,07	0,03	
Coût total opération	3,84	2,885	
Ensoleillement	1000	900	
Tarif de rachat	0,42	0,31	

Source : Tenesol 2010.

### 3.4. Quelques entreprises françaises innovantes se positionnent sur le marché mondial des matériaux solaires ou des équipements industriels

Par ailleurs, plusieurs sociétés de plus petite taille implantées en France interviennent en tant que sous-traitant à des étapes spécifiques entre la fabrication de silicium de qualité photovoltaïque et la fabrication de cellules, où elles apportent une plus-value technologique (processus innovants) :

- ◆ Production de silicium : Apollon Solar développe du silicium de qualité photovoltaïque par purification du silicium métallurgique (dans le cadre du projet Photosil, mené conjointement avec Invensil/Ferropem et le CEA/ INES et le CNRS : après une phase de R&D, mise en place d'une unité pilote au Bourget-du-Lac près de l'INES avec une capacité de production de 200 tonnes) et développement d'un procédé de fabrication de modules à bas coût (procédé NICE). EDF ENR est actionnaire à 50 % de cette entreprise ;
- ◆ *Production de lingots et plaquettes* Emix, située à la Souterraine en France (Creuse), fabrique et commercialise des blocs de silicium multicristallin, à partir de la technologie de moulage électromagnétique en creuset froid (production continue, forte productivité, exploitation aisée et très automatisée), avec une capacité de 360 tonnes et 30 salariés en 2008. Selon l'ADEME<sup>9</sup>, des investissements seraient en cours pour la production de plaquettes ;
- ◆ *Production de plaquettes* Solar Force (Bourgoin Jallieu) développe des plaquettes de silicium de haute qualité à partir de la technologie de fabrication en ruban, procédé permettant de diviser par quatre la quantité utilisée pour la fabrication de cellules.

**La France dispose par ailleurs d'un tissu d'équipementiers pour l'industrie photovoltaïque**, issus de la recherche (CEA ou CNRS) ou de la microélectronique ; le syndicat des énergies renouvelables en compte 25, dont notamment CM technologies (fours de fusion à silicium), SEMCO (appareillages), TRUMF (traitement de surface), Adixen (pompes à vide).

<sup>9</sup> Rapport intermédiaire n°1 – programme PVPS de l'AIE, rapport « France PV 2009 ».

**De grands groupes industriels sont également présents sur le marché des matériaux solaires, tels Saint-Gobain** qui détient une part importante du marché mondial des verres pour modules photovoltaïques **ou Air Liquide** qui fournit les industriels du photovoltaïque en gaz de process.

**Enfin, pour ce qui concerne le « balance of system » (éléments constitutifs du système photovoltaïque, hors modules),** qui a vocation à devenir un déterminant de plus en plus important du coût des systèmes photovoltaïque étant donnée la baisse du prix des modules :

- ◆ **Schneider Electric** est positionné sur le marché des onduleurs, disjoncteurs, transformateurs et automatismes. Entrée plus tardivement sur le marché du photovoltaïque que le leader mondial des onduleurs photovoltaïques, l'allemand SMA, l'entreprise Schneider Electric se développe sur ce segment notamment à partir de la société canadienne Xantrex, acquise en 2008 ; la fabrication d'onduleurs Schneider pour l'Europe est localisée en Allemagne. On peut souligner qu'au-delà de la fourniture d'équipements liés au BOS, Schneider Electric se développe depuis 2009 sur les activités de l'aval (ensemblier, ingénierie, maintenance) ;
- ◆ plusieurs entreprises se sont développées sur la vente de systèmes photovoltaïques intégrés au bâti (cf. 3.3 ci-dessus). Il s'agit soit de fabricants de modules détenant des brevets pour les systèmes d'intégration (cadres en acier par exemple), qu'elles font fabriquer en sous-traitance par des sociétés d'usinage, soit de spécialistes du bâtiment. Ces entreprises réalisent généralement peu de marges au plan industriel, mais peuvent également intervenir sur l'aval de la filière.

**Ces entreprises (équipementiers, matériaux solaires, BOS), dont les clients sont des industriels du photovoltaïque, visent un marché mondial et leur développement ne dépend pas spécifiquement du marché français.** L'enjeu est pour elles d'une part la capacité d'innovation (cf. proposition 2), d'autre part, pour les petites entreprises en particulier, la mise en réseau et la visibilité internationale.

**Proposition n° 8 : Mettre en réseau au niveau national le tissu d'entreprises présentes sur le segment des équipements pour l'amont et l'aval (équipementiers, matériaux solaires, BOS). Après avoir identifié tous les intervenants (cartographie ou annuaire), les pouvoirs publics favoriseront les regroupements ou consortiums en soutenant le développement de projets collaboratifs sur ce segment de marché.**

En effet, les projets de développements (cf. 2.2.1 OSEO) sont aujourd'hui beaucoup plus centrés sur la chaîne de valeur des panneaux photovoltaïques que sur les produits ou systèmes connexes, qui constituent pourtant une opportunité plus forte de développement pour les entreprises françaises. Par ailleurs, si les pôles de compétitivité ont pu intervenir sur ce type de projets, il apparaît que la bonne échelle est nationale, même si elle peut d'appuyer sur les réseaux régionaux ou inter régionaux.

**Proposition n° 9 : Soutenir le développement à l'international des entreprises françaises et améliorer leur visibilité par la promotion d'une « marque France » en lien avec le réseau Ubifrance.**

### **3.5. Le secteur français des couches minces en est au stade de la R&D**

Jusqu'en 2009, la France comptait dans le domaine des couches minces deux petites sociétés, toutes deux positionnées sur le silicium amorphe, positionnées au stade de la R&D et avec une activité industrielle très faible ou en devenir (Free Energy à Lens et Solems à Palaiseau).

**Nexcis, nouvel acteur apparu en 2009, et qui offre des perspectives intéressantes sur le plan industriel, ne devrait pas être présent sur le marché avant 2012.** La société Nexcis, spin-off de l'IRDEP, a été créée en novembre 2008 et s'est implantée en mars 2010 sur le site de Rousset dans les Bouches-du-Rhône (ancienne unité ST Microelectronics). Le projet de la société Nexcis consiste à développer et produire des modules photovoltaïques CIS grâce à un procédé à bas coût (cible d'1 €/Wc) d'électro-dépôt. La société en est aujourd'hui au stade de la R&D (Nexlab), et envisage le développement d'un pilote industriel de 5 MW en 2012 (Nexfab1), destiné à atteindre une production industrielle de 50 MW en 2013-2014 (Nexfab2). En mars 2010, Nexcis comptait 37 emplois, avait levé 19 M€ de fonds dont 12 M€ d'aides publiques (FEDER, CG 13, CR PACA, Pays d'Aix, OSEO). Son actionnariat est constitué à 66 % de la SIIF (Société Internationale d'Investissement Financier, détenue par le président d'EDF EN), d'EDF EN, d'EDF EDEV, d'IBM et du directeur général de Nexcis.

Ainsi, si Nexcis a bénéficié indirectement du développement du marché du photovoltaïque via son investisseur EDF Énergies Nouvelles, elle ne semble pas pouvoir tirer profit de développement trop rapide de ce marché. Son positionnement est en effet clairement international, dans un contexte fortement concurrentiel (les technologies alternatives de Nanosolar ou Solopower ont un temps d'avance) même si elle compte pouvoir adosser son développement à un marché français, et fondé sur un avantage technologique (projet de technologie couche mince à bas coût et modules légers pour le marché des grandes toitures) ; l'entreprise affiche à cet égard qu'en cas de succès, le déploiement de sa production ne se ferait pas nécessairement sur le territoire français mais probablement dans différentes unités en fonction des financements (cf. partenariat avec IBM ) ou du marché.

**Saint-Gobain est également présent sur le segment des couches minces à travers sa filiale Avancis,** positionnée sur les modules en couches minces CIS, qui connaît un développement progressif du fait de coûts de production encore élevés. Cette entreprise avait été fondée par Siemens et développée par Shell, avant d'être entièrement reprise par Saint-Gobain. Les modules Avancis sont fabriqués à Torgau, en Allemagne ; le projet d'usine française semble totalement abandonné avec l'extension en juin 2010 du site de Torgau. L'argument avancé par Saint-Gobain est, comme pour l'abandon du projet de site français de fabrication de tuiles solaires, la difficulté à élaborer des partenariats avec les professionnels de l'aval étant donné l'éclatement du marché.

**Enfin, au-delà du développement des entreprises françaises, les couches minces devraient voir l'implantation en France d'un site industriel de l'américain First Solar,** leader mondial du photovoltaïque en 2009, et exploitant d'un site de 200 MW aux États-Unis, d'un site de 200 MW en Allemagne et d'un site de 800 MW en Malaisie. En effet, First Solar a annoncé l'implantation à Blanquefort (33) d'une unité de production de 100 à 120 MW/an générant 400 emplois. Les travaux sont censés démarrer fin 2010 et la production fin 2011. First Solar devrait recevoir dans le cadre de ce projet une subvention de 2 M€ au titre du maintien de l'emploi (prime à l'aménagement du territoire).

Ce projet s'inscrit dans le cadre d'un partenariat avec EDF Énergies Nouvelles, dont First Solar est déjà en 2009 le principal fournisseur pour ses centrales au sol, et qui s'est engagé dans le cadre du projet de Blanquefort à racheter à First Solar l'ensemble de la production du site pendant dix ans à un prix négocié en 2010, et à l'installer uniquement sur le territoire français.

Pour sécuriser ce contrat en termes de débouchés et de rentabilité, EDF EN cherche à disposer d'un portefeuille de sites de centrales au sol, qui constituent un segment de marché adapté à la production de First Solar. A cette fin, EDF EN compte obtenir l'ensemble des autorisations administratives correspondant à cette production (soit 1 000 à 1 500 MWc) avant l'implantation de l'usine afin d'avoir la certitude de bénéficier des tarifs 2010. L'intérêt de l'implantation de site de First Solar, qui tout en apportant un contenu en emplois ne semble pas s'inscrire dans une dynamique de création de filière en France (pas de R&D partenariale ni de création d'un réseau de sous-traitant), ne semble pas justifier l'important surcoût que représente le rachat de ses débouchés pour EDF EN à un tarif 2010 par rapport aux évolutions d'ores et déjà prévues (dégression de 10 % d'après l'arrêté du 12 janvier 2010) ou proposées par la mission (évolution du dispositif de soutien pour les centrales au sol : appels d'offres, mécanismes de sortie de la file d'attente après deux ans).

### 3.6. Les capacités industrielles françaises aboutissent à un déficit de la balance commerciale

L'analyse de la balance commerciale française sur le segment des cellules et des modules<sup>10</sup> montre que celle-ci présente un fort déficit, qui s'est nettement accentué en 2009 pour atteindre plus de 800 M€ sur l'année, soit de l'ordre de 2 % du déficit de la balance commerciale française (43,4 Mds€ en 2009 selon les douanes). Cette tendance se poursuit en 2010 puisque le déficit de la balance commerciale sur les quatre premiers mois de l'année atteint plus de 400 M€.

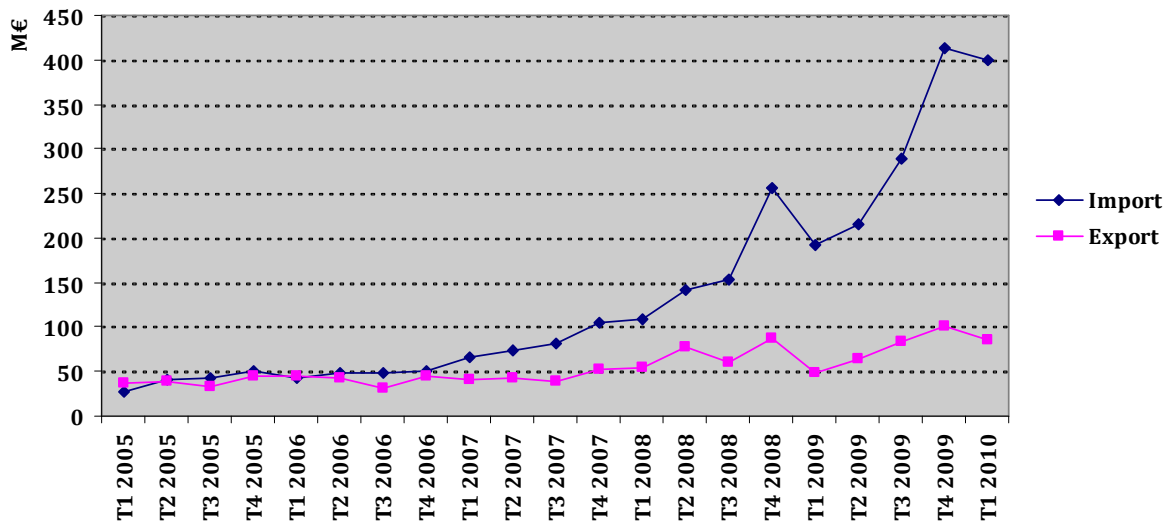
**Tableau 7 : Balance commerciale française des cellules et modules photovoltaïques**

	2009		Janvier-avril 2010	
	Valeur ( M€)	Quantité (tonnes)	Valeur ( M€)	Quantité (tonnes)
Exportations	298	14 832	115	6 563
Importations	1 125	50 767	551	29 870
Balance commerciale (exportations - importations)	-827	-35 935	-436	-23 307

*Source : Direction générale des douanes et droits indirects - Département des statistiques et des études économiques.*

<sup>10</sup> Le code de la nomenclature internationale douanière à huit chiffres utilisé est le code NC85414090 « dispositifs photosensibles à semi-conducteur, y compris les cellules photovoltaïques même assemblées en modules ou constituées en panneaux ». Ce code peut donc contenir d'autres matériels que les cellules et modules photovoltaïques, toutefois le service des douanes a considéré dans son étude de mars 2010 sur les éco-produits, en accord avec le CGDD et Eurostat, qu'il constituait un bon indicateur pour ce marché.

**Graphique 12 : Évolution de la balance commerciale française des cellules et modules photovoltaïques de 2005 à 2010**



*Source : Direction générale des douanes et droits indirects - Département des statistiques et des études économiques.*

Sur la période avril 2009 – avril 2010, les importations proviennent essentiellement d'Allemagne (27 % en valeur), de Chine (23 %) et de Malaisie (11 %, correspondant probablement à l'usine First Solar). Les exportations sont quant à elles majoritairement tournées vers l'Allemagne, l'Italie et l'Espagne (70 % du total).

**Ainsi, la subvention donnée au marché national a essentiellement conduit à creuser le déficit de la balance commerciale ; cette politique, coûteuse, ne profite ainsi que très marginalement aux emplois industriels français.**

#### **4. L'aval de la filière, qui bénéficie directement des politiques de soutien au marché, capte une part importante des marges de la filière et concentre la majorité des emplois**

##### **4.1. L'aval de la filière constitue un marché local assez peu structuré qui capte une part importante des subventions au photovoltaïque**

L'aval de la filière va du montage de projet sur la plan technique (études), financier (solutions de financement, assurances) et administratif à l'installation et parfois à l'exploitation ou à la maintenance des panneaux. Les acteurs peuvent avoir une offre :

- ◆ globale, ou au contraire limitée à une étape ;
- ◆ généraliste, ou au contraire spécialisée (résidentiel vs industriel ou agricole, intégration au bâti vs centrales au sol, grosses vs petites puissances).

La structure de marché dépend largement du type de production, et apparaît d'autant plus concentrée que les puissances à installer sont importantes :

- ◆ pour la production résidentielle, les quatre principaux installateurs, dont l'offre est globale (Evasol, Sunnco, Photon Power – filiale d'EDF EN et Solaire Direct) détenaient en 2008 entre 30 et 34 % du marché. Le segment de l'installation même compte une multitude de petits acteurs (> 5 000 installateurs certifiés QualiPV en novembre 2009) ;
- ◆ pour la production professionnelle en toiture (agriculteurs ou industriels), les projets peuvent être développés par des spécialistes de la filière photovoltaïque (Tenesol, Sunvie, Urbasolar...), dont l'offre est le plus souvent globale, ou par les foncières des groupes industriels. Le financement et d'exploitation peuvent être assurés par le propriétaire (qui paye une prestation d'assistance à maîtrise d'ouvrage), le développeur ou un investisseur tiers (dans ces deux derniers cas, le propriétaire loue sa surface via un bail emphytéotique) ;
- ◆ pour les centrales au sol, le nombre d'acteurs est beaucoup plus limité (EDF EN, Solaire Direct, GDF Suez, Powéo...).

Alors que le marché des modules photovoltaïques est clairement mondial, les activités de l'aval sont par définition locales ; ainsi, tout décalage entre le niveau des politiques de soutien (tarif) et les prix mondiaux des modules est capté par les acteurs de l'aval, soit sous forme de marge, soit en leur permettant de développer une force de vente démesurée.

Par ailleurs, la politique française de l'intégration au bâti a engendré sur l'aval des surcoûts en termes d'étude et d'installation (cf. 3.3).

Les importants moyens financiers ainsi dirigés vers l'aval de la filière, que ce soit en compensation des surcoûts techniques (intégration au bâti) ou en rémunération excessive du fait d'un décalage entre les tarifs et les coûts, se traduisent en partie par des créations d'emplois (cf. 4.2 ci-dessous). Toutefois, le coût de l'emploi généré apparaît excessif et par ailleurs ceci va à l'inverse de l'objectif prioritaire de compétitivité du secteur, qui passe non seulement par une réduction du coût des équipements mais aussi par une baisse des coûts sur l'aval. Ce constat est cohérent avec les propositions de maîtrise du marché formulées par la mission.

En revanche, il apparaît que l'aval de la filière, et notamment le développement de projet, offre des perspectives de croissance à l'international pour les grandes entreprises françaises des « utilities », qu'elles soient déjà positionnées sur ce secteur (EDF EN, GDF Suez) ou non (par exemple Véolia, JC Decaux).

#### **4.2. Les créations d'emploi de la filière sont concentrées sur l'aval, du fait d'une rémunération excessive qui va à l'encontre de la recherche de compétitivité pour le secteur photovoltaïque**

Plusieurs évaluations du nombre d'emplois créés et susceptibles d'être créés par la filière photovoltaïque (emplois directs, de la production industrielle à la maintenance en passant par l'installation) sont disponibles :

- ◆ l'ADEME publie annuellement, depuis 2008, une estimation des emplois liés aux énergies renouvelables. L'édition 2008 incluait également un exercice de prévision jusqu'à 2012<sup>11</sup> ;

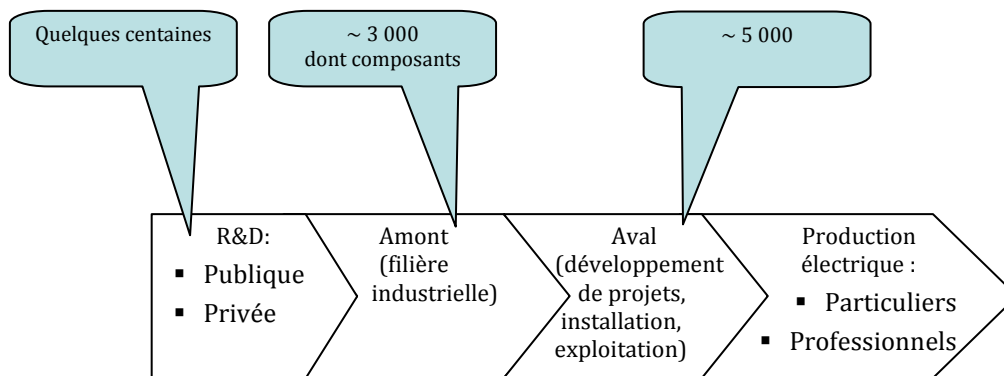
---

<sup>11</sup> Marchés, emploi et enjeu énergétique des activités liées aux énergies renouvelables et à l'efficacité énergétique : Situation 2007-2008 – Perspectives 2009/ Situation 2006-2007 – Perspectives 2012.

- ◆ l'étude du Boston Consulting Group sur les éco-industries réalisée en 2008 modélisait les conséquences en termes d'emploi de la filière photovoltaïque, dans le cadre d'une croissance progressive vers l'objectif de 5 400 MW installés en 2020, avec quatre scénarios en termes de production industrielle (0 %, 50 %, 100 % et 200 % de la consommation nationale est produite sur le territoire) ;
- ◆ le rapport PricewaterhouseCoopers 2010 relatif à l'état de la filière photovoltaïque en France dresse un état des lieux des emplois en 2008 et des perspectives 2012, sur la base d'une enquête menée par le syndicat des énergies renouvelables (SER) en avril 2009 auprès de ses 250 adhérents ;
- ◆ l'étude de l'association Enerplan « Panorama du photovoltaïque en France et prospective 2020 » propose également un état des lieux 2008 et des perspectives pour 2020.

**Les études convergent autour du chiffre de 4 000 emplois environ en 2008**, répartis, selon l'ADEME, de manière à peu près équilibrée entre l'amont (incluant pour moitié les modules et cellules et pour moitié les composants) et l'aval de la filière. Pour 2009, les chiffres disponibles sont uniquement des prévisions, qui proposent une fourchette assez large allant de 5 500 (SER – PWC) à 8 500 (ADEME) emplois.

**Graphique 13 : Cartographie des emplois liés au photovoltaïque en 2009**



*Source : Mission, données Ademe.*

Les prévisions à moyen (2012) et long terme (2020) divergent beaucoup plus fortement, ce qui s'explique aisément par le fait que les différents organismes retiennent des hypothèses très diverses aussi bien en ce qui concerne la production installée (impactant directement les emplois de l'aval) que le développement de la filière industrielle.

Ainsi, pour 2012, l'ADEME sur la base du chiffre de 1 100 MW installés évalue les emplois créés à 13 000 ETP. Le SER (source : étude PricewaterhouseCoopers « L'état de la filière photovoltaïque en France – 2010 ») estime les emplois créés à 15 000, dont 7 000 pour l'amont (2 000 systèmes d'intégration, 1 500 filière couches minces, 3 500 filière silicium) et 8 000 pour l'aval, sans préciser les hypothèses sous-jacentes.

À horizon 2020 :

- ◆ le BCG évalue les emplois de l'aval à 6 800 pour 5,4 GW installés (scénario PPI). Pour l'amont, son estimation va de 0 à 11 600 emplois créés, selon que la production annuelle est de 0 ou 1 200 MW de modules. L'étude retient une fourchette de 9,5 à 17,5 ETP/MW produit, mais ne précise pas si ces emplois correspondent uniquement à des usines d'assemblage, ou bien intègrent une part plus large de la filière amont voire des emplois liés aux composants ou aux équipements industriels ;

- ◆ Enerplan, sur la base d'une capacité installée de 17 GW, évoque 70 000 à 100 000 emplois créés.

**Tableau 8 : Évaluation des emplois créés par le photovoltaïque (2007-2020)**

		2007	2008	2009 (prévision)	2012 (prévision)	2020 (prévision)
Ademe	Amont	1446	1 900	3 237	ND	ND
	Aval	898	2 550	5 278	ND	ND
	<b>Total</b>	<b>1 158</b>	<b>4 450</b>	<b>8 515</b>	<b>13 000<sup>12</sup></b>	<b>ND</b>
SER - PWC	Amont	ND	ND	ND	7 000	ND
	Aval	ND	ND	ND	8 000	ND
	<b>Total</b>	<b>ND</b>	<b>4 000</b>	<b>5 500</b>	<b>15 000</b>	<b>ND</b>
BCG	Amont	ND	ND	ND	ND	0 – 11 600
	Aval	ND	ND	ND	ND	6 800
	<b>Total</b>	<b>3 000</b>	<b>ND</b>	<b>ND</b>	<b>ND</b>	<b>6 800- 18 400</b>
Enerplan	Amont	ND	ND	ND	ND	ND
	Aval	ND	ND	ND	ND	ND
	<b>Total</b>	<b>ND</b>	<b>3 700</b>	<b>ND</b>	<b>14 030</b>	<b>100 780</b>

*Source : ADEME (Marchés, emplois et enjeu énergétique des activités liées aux énergies renouvelables et à l'efficacité énergétique - éditions 2008 et 2009), PricewaterhouseCoopers (État de la filière photovoltaïque en France - janvier 2010), Boston Consulting Group (Développer les éco-industries - décembre 2008), Enerplan.*

En conclusion sur les créations d'emplois dans le secteur, il apparaît que les emplois de l'aval seront directement corrélés au montant des subventions sur le marché : ils dépendront du niveau mais aussi de la structure des tarifs (avec les chiffres du BCG, 600 MW installés par an en toiture généreront 9 600 emplois en 2020, contre seulement 1 200 si tout est réalisé sous forme de centrales au sol). Ainsi plus les montants consacrés au photovoltaïques seront élevés via la CSPE notamment, plus cela génèrerait d'emploi sur l'aval ; toutefois ce constat n'est que faussement encourageant, puisque :

- ◆ cela revient à dire que les emplois de l'aval sont des emplois purement subventionnés, et ce à un niveau très supérieur au coût des dispositifs publics d'aide à l'emploi<sup>13</sup> : le système est donc très peu efficace. Par ailleurs, les emplois créés sont par construction fragiles et très dépendants de la politique publique ;
- ◆ le fait de sur-rémunérer le photovoltaïque conduit certes à renforcer la création d'emploi sur l'aval (force de vente, installation) mais par là-même à gonfler durablement les coûts : ceci va à l'inverse de l'objectif d'atteindre le plus rapidement possible la compétitivité prix pour le photovoltaïque.

En ce qui concerne en revanche la création d'emplois industriels sur le secteur, elle n'est pas directement corrélée au niveau de soutien au marché national, mais plutôt à l'ensemble de la politique de soutien à la filière, qui passe par une politique de R&D, une stratégie industrielle basée sur l'adhésion des grands groupes, et enfin une stimulation du marché national uniquement comme base de développement pour les entreprises.

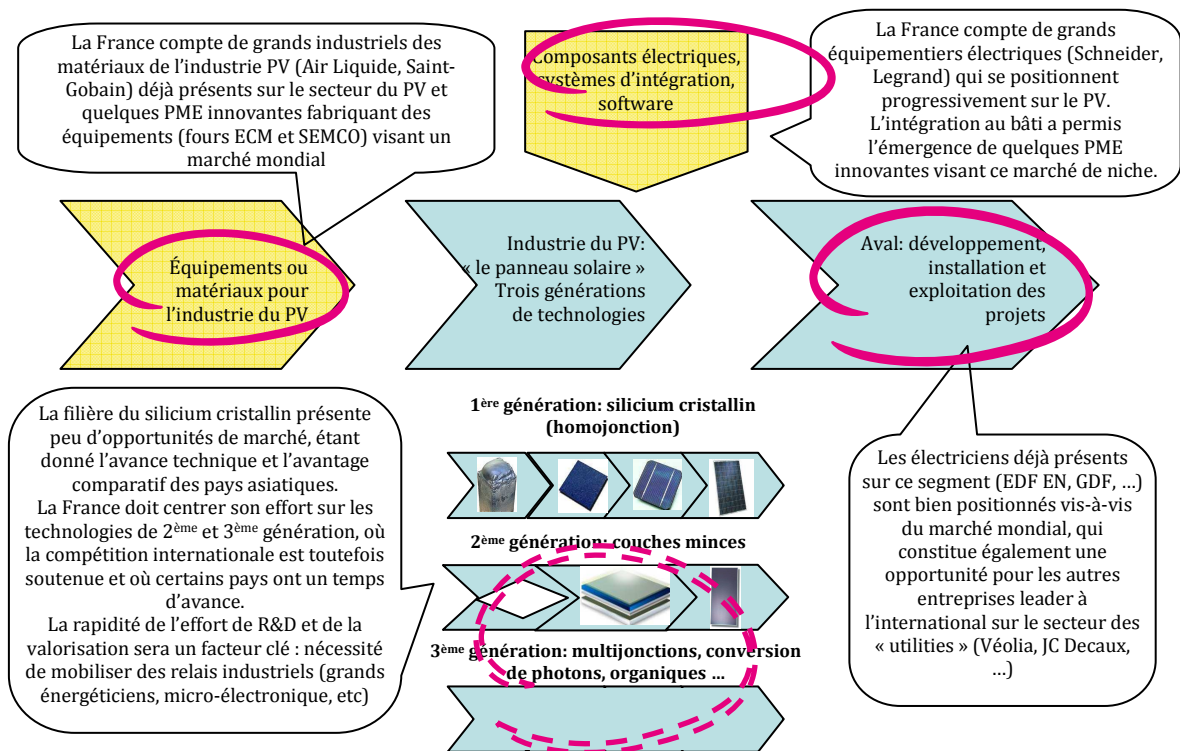
<sup>12</sup> Hypothèse : 1 100 MW installés.

<sup>13</sup> Une étude du Rheinische-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung en rapportant le coût pour le consommateur d'électricité à la création d'emploi évalue le coût de l'emploi créé en Allemagne à 175 000 €. Une étude du ministère allemand du développement durable (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) de mars 2009 estimait à 57 000 le nombre d'emplois dans le photovoltaïque en 2008, dont 54 700 pour l'industrie et 2 300 pour l'aval. Le syndicat allemand de l'énergie solaire les évaluait à 63 000 en 2009. Pour mémoire la capacité installée en Allemagne était de près de 5,9 GW en 2008 et 9,8 GW en 2009.

## 5. Développer et mettre en œuvre une stratégie de positionnement des entreprises françaises sur l'un des secteurs clés de la « croissance verte » et des énergies renouvelables

L'analyse des différents segments industriels du secteur photovoltaïque au sens large, ainsi que celle des forces et faiblesses des entreprises françaises, montrent ainsi que les opportunités pour ces dernières ne se limitent pas à la chaîne de valeur du module photovoltaïque, mais sont aussi (et surtout) dans le secteur des équipements et des services pour l'amont et l'aval de la filière.

**Graphique 14 : Le secteur du photovoltaïque : principales opportunités pour les entreprises françaises**



*Source : Mission.*

**Dans la chaîne de valeur du module photovoltaïque, l'approche doit se concentrer sur les technologies émergentes (couches minces et troisième génération), où les possibilités de développer un avantage compétitif grâce à l'effort de R&D sont encore ouvertes :**

- ♦ la filière « traditionnelle » du silicium cristallin, qui représente aujourd'hui 85 % du marché et devrait rester prédominante, ne semble pas devoir connaître de développement industriel en France. La Chine dispose des mêmes technologies que les pays occidentaux et est plus compétitive (écart de prix de 25 % ; très grandes capacités de production, développées grâce à leur accès aux capitaux). Les développements actuels que connaît le segment de l'assemblage des panneaux, qui s'inscrit à l'opposé de la logique d'intégration industrielle observée dans les autres pays, présente des perspectives modérément intéressantes en termes d'emplois (de l'ordre de 100 emplois pour 50 MW) et en termes de création de valeur (cf. Graphique 15) ;

- ◆ la filière « couches minces » offre à court terme une perspective d'implantation industrielle et surtout l'émergence possible à moyen terme d'un acteur français :
  - une technologie éprouvée (CdTe), maîtrisée par le seul américain First Solar, devrait faire l'objet d'une implantation industrielle à Blanquefort (33) générant 400 emplois pour une production de 120 MW/an ;
  - Nexcis, spin-off d'un institut de recherche, présente des perspectives de développement d'une technologie alternative innovante (CIGS) à horizon 3-5 ans ;
- ◆ les filières « nouvelle génération », objet d'un effort de recherche soutenu, présentent des perspectives de développement industriel à plus long terme encore.

Même si les opportunités semblent plus importantes sur la 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> génération que sur la filière traditionnelle du silicium, le contexte reste très fortement concurrentiel aussi bien au niveau de la R&D que de la mise sur le marché. **La priorité doit donc être donnée à la rapidité de développement des projets de R&D et à leur valorisation, plutôt qu'au développement de la demande qui dans tous les cas ne bénéficiera pas à court terme aux entreprises française étant donnés leur horizons de développement.**

Par ailleurs, le passage du stade de la R&D au développement industriel peut suivre deux types de modèles :

- ◆ L'émergence de « pure players » (modèle américain, qui repose sur l'efficacité du capital-risque ou modèle allemand du « mittelstand ») ;
- ◆ Le développement d'industriels existants sur ce segment, par croissance interne ou externe (modèle japonais).

Les caractéristiques de l'industrie française laissent penser que la deuxième voie est la plus adaptée, mais les grands industriels français se sont peu mobilisés pour le photovoltaïque à ce stade, à l'exception d'EDF EN.

**Proposition n° 10 : Il apparaît nécessaire que le Gouvernement mobilise, à un niveau politique, les grands acteurs français de l'énergie (EDF, Total, GDF-Suez) ou des industries connexes au photovoltaïque (ST Microelectronics, Saint-Gobain) et use de sa capacité d'influence pour les inciter à investir dans le secteur du photovoltaïque.**

L'investissement des grands groupes privés devrait être la contrepartie de l'effort de la collectivité en faveur du marché domestique et de la R&D. La mission souligne également que dans tous les cas, le positionnement des industriels français sur le secteur ne se traduira pas par une création d'emploi 100 % française (stratégie internationale pour conquérir un marché international).

En outre une recomposition possible de l'actionnariat de plusieurs entreprises du secteur, à savoir Photowatt (cf. 3.1), Tenesol (détenue à parts égales par EDF et Total), Photovoltech (détenue à parts égales par GDF Suez et Total) pourrait conduire à une implication plus affirmée de certains grands groupes français dans ce secteur.

Enfin, au-delà de la chaîne de valeur du module photovoltaïque, les segments des matériaux solaires, des équipements industriels et du « balance of system » présentent l'avantage d'un tissu de grands groupes et de PME bien positionnés sur le marché international. L'enjeu pour ces activités est la recherche d'innovation (cf. stratégie de R&D en chapitre 2.3) et une meilleure mise en réseau.

## 6. Récapitulatif des propositions

**Proposition n° 1 :** Dans le domaine des cellules et modules photovoltaïque, l'effort de recherche et développement français doit se concentrer sur les technologies de deuxième et troisième génération, plutôt que sur le silicium cristallin à homojonction pour lequel les perspectives de développement industriel apparaissent limitées en France.

**Proposition n° 2 :** La DGRI devrait cartographier les compétences et moyens de R&D dans le secteur photovoltaïque au sens large, incluant les équipements industriels, les matériaux et les systèmes photovoltaïques, de manière à pouvoir afficher une programmation globale qui ne soit pas limitée aux cellules et aux modules. Elle procédera également à un examen systématique avec les industriels des segments de marché offrant un fort potentiel de croissance et où le besoin de R&D n'est pas couvert.

**Proposition n° 3 :** La mission préconise que le projet d'institut du solaire de Saclay soit soutenu dans le cadre du fonds d'investissement d'avenir et soit mis en place rapidement pour être en mesure de développer un avantage technologique dans le cadre de la compétition internationale des équipes de R&D.

**Proposition n° 4 :** Améliorer la coordination entre les centres de recherche amont (notamment l'IRDEP) et la recherche technologique, organisée autour de la plateforme de l'INES à Chambéry. Faciliter les transferts de technologie par des liens renforcés avec les industriels.

**Proposition n° 5 :** La mission préconise que les pouvoirs publics, à un niveau politique, mobilisent les principaux acteurs de l'énergie et de l'industrie de manière à ce que les importants moyens de recherche et de développement engagés trouvent des relais de croissance à travers ces grands groupes.

**Proposition n° 6 :** La mission préconise de conforter l'effort de R&D annoncé, notamment à travers les programmes d'OSEO et l'investissement d'avenir, tout en s'assurant de l'efficacité de ces moyens en termes de valorisation (rapidité des circuits, diversité des partenaires industriels).

**Proposition n° 7 :** La mission préconise donc de limiter la prime d'intégration au bâti au seul segment des particuliers (toitures <9 kWc), où se situent les principales perspectives en termes de marché de niche. Pour les autres types de bâtiments ou pour les installations des particuliers non intégrées au bâti, la prise en compte des surcoûts d'installation par rapport au sol sera traitée par un tarif « bâtiment » qui ne comportera qu'un nombre très limité de critères techniques et pas de notion d'intégration.

**Proposition n° 8 :** Mettre en réseau au niveau national le tissu d'entreprises présentes sur le segment des équipements pour l'amont et l'aval (équipementiers, matériaux solaires, BOS). Après avoir identifié tous les intervenants (cartographie ou annuaire), les pouvoirs publics favoriseront les regroupements ou consortiums en soutenant le développement de projets collaboratifs sur ce segment de marché.

**Proposition n° 9 :** Soutenir le développement à l'international des entreprises françaises et améliorer leur visibilité par la promotion d'une « marque France » en lien avec le réseau Ubifrance.

**Proposition n° 10 :** Il apparaît nécessaire que le Gouvernement mobilise, à un niveau politique, les grands acteurs français de l'énergie (EDF, Total, GDF-Suez) ou des industries connexes au photovoltaïque (ST Microelectronics, Saint-Gobain) et use de sa capacité d'influence pour les inciter à investir dans le secteur du photovoltaïque.