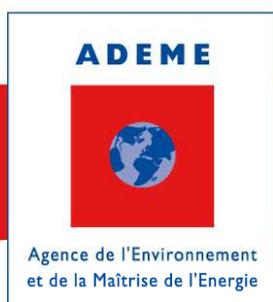


# **DONNEES ECONOMIQUES DE LA CHAINE DE VALEUR DU PHOTOVOLTAÏQUE ET ETUDE QUANTITATIVE DE L'IMPACT ECONOMIQUE DE L'INNOVATION**

**ESTIMATION DE L'IMPACT DES INNOVATIONS**

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par IN NUMERI et I CARE Environnement

Coordination technique : Nicolas BLANC – Service Economie et Prospective – Direction Recherche  
et Prospective – ADEME (Paris)



---

**SYNTHESE**

## REMERCIEMENTS

Les auteurs du rapport tiennent à remercier l'ensemble des membres du comité de pilotage pour leur implication tout au long de l'étude et leurs remarques à chaque étape de réalisation :

Par ordre alphabétique :

Vincent Baggioni – Doctorant au LAMES

Nicolas Blanc – ADEME

Yvonnick Durand – ADEME

Bernard Equer – Consultant

Albane Gaspard – ADEME

Marie-Laure Guillerminet – ADEME

David Marchal – ADEME

Rodolphe Morlot - ADEME

Jean-Michel Parrouffe – ADEME

Frédéric Ravel – Ministère de la Recherche Anne Varet – ADEME

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par la caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Any representation or reproduction of the contents herein, in whole or in part, without the consent of the author(s) or their assignees or successors, is illicit under the French Intellectual Property Code (article L 122-4) and constitutes an infringement of copyright subject to penal sanctions. Authorised copying (article 122-5) is restricted to copies or reproductions for private use by the copier alone, excluding collective or group use, and to short citations and analyses integrated into works of a critical, pedagogical or informational nature, subject to compliance with the stipulations of articles L 122-10 – L 122-12 incl. of the Intellectual Property Code as regards reproduction by reprographic means.

## Sommaire

|          |                                                                                                  |    |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| I.       | Introduction.....                                                                                | 7  |
| II.      | Méthodologie générale de l'étude .....                                                           | 8  |
| III.     | Contexte, marché et réglementation .....                                                         | 10 |
| III.1.   | Le marché international.....                                                                     | 10 |
| III.1.1. | Les puissances installées .....                                                                  | 10 |
| III.1.2. | Les différents marchés du photovoltaïques .....                                                  | 10 |
| III.2.   | Evolutions du contexte politique et réglementaire.....                                           | 11 |
| III.2.1. | En France .....                                                                                  | 11 |
| III.2.2. | A l'étranger .....                                                                               | 12 |
| III.3.   | Le marché Français.....                                                                          | 13 |
| III.3.1. | Puissances installées.....                                                                       | 13 |
| III.3.2. | Le marché du photovoltaïque en France .....                                                      | 14 |
| III.3.3. | Les entreprises Françaises du photovoltaïque .....                                               | 15 |
| III.4.   | Décomposition du coût de production en 2012 .....                                                | 17 |
| III.4.1. | Décomposition du coût du module.....                                                             | 17 |
| III.4.2. | Décomposition du coût de l'assemblage et de l'installation des modules .....                     | 18 |
| III.4.3. | Structure du coût total .....                                                                    | 19 |
| IV.      | Impacts des innovations sur les coûts.....                                                       | 20 |
| IV.1.    | typologie des innovations .....                                                                  | 20 |
| IV.2.    | Impacts des innovations retenues sur les coûts de production des systèmes.....                   | 21 |
| IV.2.1.  | Méthodologie utilisée .....                                                                      | 21 |
| IV.2.2.  | Potentiel de baisse de coût des modules .....                                                    | 22 |
| IV.2.3.  | Potentiel de baisse de coût pour l'aval .....                                                    | 24 |
| IV.2.4.  | Baisses de coût liées aux innovations étudiées sur l'ensemble des systèmes photovoltaïques ..... | 25 |
| IV.3.    | Impacts sur le coût de production de l'électricité PV (€/MWh).....                               | 26 |
| IV.3.1.  | Hypothèses utilisées.....                                                                        | 26 |
| IV.3.2.  | Evolution des coûts de l'électricité.....                                                        | 27 |
| IV.3.3.  | Date d'atteinte de la parité réseau.....                                                         | 28 |
| V.       | Impacts des innovations sur les marchés .....                                                    | 29 |
| V.1.     | Scénarios de développement .....                                                                 | 29 |
| V.1.1.   | Monde .....                                                                                      | 29 |
| V.1.2.   | France.....                                                                                      | 29 |
| V.2.     | Impacts des innovations sur chaque marché .....                                                  | 30 |
| V.2.1.   | Les équipements de production.....                                                               | 30 |
| V.2.2.   | Les fabricants de matériaux solaires .....                                                       | 31 |
| V.2.3.   | Les lingots et wafers .....                                                                      | 31 |
| V.2.4.   | Les cellules .....                                                                               | 32 |
| V.2.5.   | Les modules.....                                                                                 | 32 |
| V.2.6.   | Le BOS .....                                                                                     | 33 |
| V.2.7.   | L'installation .....                                                                             | 33 |
| V.2.8.   | La filière CPV .....                                                                             | 33 |

### Liste des figures

|            |                                                                                                                        |    |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1.  | Chaîne de valeur de la filière photovoltaïque .....                                                                    | 8  |
| Figure 2.  | Evolution du tarif d'achat en France, Allemagne et Italie .....                                                        | 11 |
| Figure 3.  | Evolution des puissances installées chaque année en France, par type d'application .....                               | 13 |
| Figure 4.  | Répartition des entreprises du photovoltaïque par segment de marché selon leur taille, hors petits installateurs ..... | 15 |
| Figure 5.  | Décomposition du coût de production d'un module en 2012 .....                                                          | 17 |
| Figure 6.  | Décomposition du coût de production des activités aval en 2012 .....                                                   | 18 |
| Figure 7.  | Structure de coût des systèmes résidentiels en 2012.....                                                               | 19 |
| Figure 8.  | Structure de coût des systèmes grandes toitures et au sol en 2012 .....                                                | 19 |
| Figure 9.  | Effets des innovations sur la structure de coût des modules c-Si.....                                                  | 22 |
| Figure 10. | Evolutions comparées des innovations et de la courbe d'expérience .....                                                | 23 |
| Figure 11. | Effet des innovations retenues sur la structure de coût des modules CdTe.....                                          | 23 |
| Figure 12. | Effets des innovations retenues sur la structure de coût des modules CIGS .....                                        | 24 |
| Figure 13. | Effet consolidé des innovations retenues sur le coût total des systèmes .....                                          | 25 |
| Figure 14. | Variation du LCOE selon l'ensoleillement en 2012, 2015 et 2020, par type d'application.....                            | 27 |

### Liste des tableaux

|             |                                                                                                                                                            |    |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau 1.  | Importations et production nationale par composante .....                                                                                                  | 14 |
| Tableau 2.  | Emploi pour chaque composante de la chaîne de valeur .....                                                                                                 | 14 |
| Tableau 3.  | Les entreprises Françaises intervenant dans le marché photovoltaïque, hors petits installateurs .....                                                      | 16 |
| Tableau 4.  | Synthèse du nombre d'innovations recensées par origine et étape de production .....                                                                        | 20 |
| Tableau 5.  | Récapitulatif des innovations présentant le plus important potentiel de baisse de coût.....                                                                | 21 |
| Tableau 6.  | Hypothèse sur l'évolution du prix des systèmes c-Si .....                                                                                                  | 27 |
| Tableau 7.  | Baisse du coût de l'électricité de la filière c-Si liée à l'impact des innovations retenues selon l'ensoleillement et le type d'application, en €/MWh..... | 27 |
| Tableau 8.  | Niveaux de prix de l'électricité et évolutions envisagées d'ici 2020 .....                                                                                 | 28 |
| Tableau 9.  | Date d'atteinte de la parité réseau par région et application, en conséquence de la baisse de coût potentielle liée aux innovations retenues.....          | 28 |
| Tableau 10. | Potentiel de marché français à partir de 2015 .....                                                                                                        | 30 |
| Tableau 11. | Comparaison de l'approche par la parité et des scénarios EGS-PV et SER (en GW) .....                                                                       | 30 |
| Tableau 12. | Prévisions de développement pour le CPV à horizon 2015.....                                                                                                | 33 |

## Liste des acronymes et abréviations

|        |                                                 |
|--------|-------------------------------------------------|
| BAPV   | Building Applied Photovoltaics                  |
| BIPV   | Builed Integrated Photovoltaics                 |
| BOS    | Balance Of System                               |
| CdTe   | Tellure de Cadmium                              |
| CIDD   | Crédit d'Impôt Développement Durable            |
| CIGS   | Cuivre- Indium- Gallium- Sélénium               |
| CPV    | Concentrated Photovoltaics                      |
| CRE    | Commission de Régulation de l'Énergie           |
| CSPE   | Contribution au Service Public de l'électricité |
| EGS-PV | Etats Généraux du Solaire PhotoVoltaire         |
| EPIA   | European photovoltaic Industry Association      |
| FiT    | Feed-in Tariff                                  |
| INES   | Institut National de l'Énergie Solaire          |
| IRENA  | International Renewable Energy Agency           |
| GW     | Giga Watt                                       |
| LCoE   | Levelized Cost of Electricity                   |
| Md(s)  | Milliard(s)                                     |
| MW     | Méga Watt                                       |
| PACA   | Provence Alpes Côte d'Azur                      |
| PV     | Photovoltaïque                                  |
| SER    | Syndicat des Énergies Renouvelables             |

## Résumé

La filière photovoltaïque a connu un essor très important ces dernières années, du fait des politiques de soutien et des baisses de coût des modules. Cette étude s'intéresse à l'impact économique du développement de cette nouvelle filière industrielle et plus particulièrement à l'impact économique des innovations.

Une trentaine d'innovations ont été retenues dans le cadre de cette étude, qui vise à déterminer leur impact théorique si elles se développent avec succès. Des baisses de coût conséquentes peuvent être attendues des innovations retenues, les prix pouvant être divisés par deux d'ici 2020 du seul fait des innovations envisagées. Ces baisses de prix permettent d'atteindre la parité réseau à partir de 2015-2016 dans le Sud de la France et dans la majorité des régions françaises d'ici 2020.

Toujours dans l'hypothèse où les baisses de coût se vérifient, le développement de la filière ne nécessitera à terme plus de politique de soutien, le développement pouvant se faire en fonction du marché. Les installations pourraient atteindre 4 GW/an en 2020.

En 2012, le chiffre d'affaire lié au photovoltaïque en France devrait approcher 2 Mds€, pour environ 17 000 emplois. Les baisses de coût pourraient permettre d'atteindre une production de 4 Mds€ en 2020, pour plus de 40 000 emplois, en supposant que les industries conservent ou augmentent leurs parts de marché grâce aux innovations.

## I. INTRODUCTION

Au cours de la dernière décennie, la technologie solaire photovoltaïque a connu une croissance exponentielle. La capacité mondiale de production photovoltaïque a atteint 70GW en 2011, soit une augmentation de 74% par rapport à l'année précédente, et une multiplication par 7,4 depuis 2007.

Depuis 2005, l'Europe est le principal lieu d'implantation du photovoltaïque ; en 2011, avec 52 GW, elle représente 75 % des puissances installées dans le monde. Cette croissance est le fruit de baisses importantes des coûts de production des modules, combinées aux politiques de soutien tarifaires et fiscales, le photovoltaïque étant considéré comme une composante importante du mix énergétique. Cette politique de soutien a un coût non négligeable. Le financement de ce soutien en France est effectué par la Contribution au Service Public de l'Électricité (CSPE), acquittée par les consommateurs et qui permet de compenser le coût des missions de service public aux distributeurs d'électricité<sup>1</sup>. La Commission de Régulation de l'Énergie (CRE) prévoit que la compensation du tarif d'achat photovoltaïque coûtera 1,5 Mds€ en 2012, soit 36% de la CSPE.

La mise en place d'une nouvelle filière énergétique peut offrir, au-delà des bénéfices environnementaux, des opportunités industrielles et des retombées économiques et sociales positives. Dans cette perspective, cette étude s'attache à mettre en évidence l'incidence des innovations dans le domaine du photovoltaïque.

Après avoir décrit le système productif français actuel, on présentera la liste des innovations technologiques qui vont être étudiées. Les innovations retenues ne visent pas à l'exhaustivité, les innovations concernant les acteurs Français de photovoltaïque ayant été privilégiées. Ces innovations devraient pouvoir arriver à un stade industriel avant 2020.

On étudiera ensuite l'impact de ces innovations sur le coût de production des installations photovoltaïques, puis sur le prix auquel l'électricité produite pourrait être vendue. Enfin, on en déduira l'impact potentiel des innovations sur la valeur ajoutée des entreprises sur le marché français et sur les emplois.

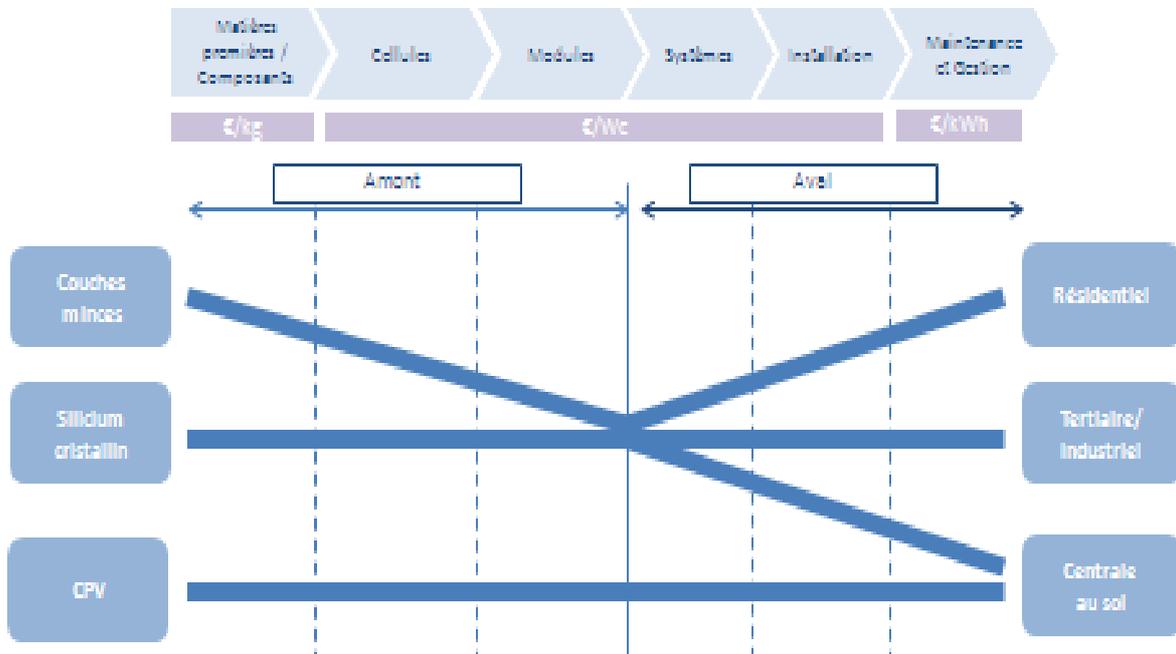
---

<sup>1</sup> La CSPE couvre le surcoût du soutien à la cogénération et aux énergies renouvelables, de la péréquation tarifaire dans les zones insulaires et des dispositifs sociaux en faveur des clients en situation de précarité.

## II. MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE DE L'ÉTUDE

### a) La filière photovoltaïque

Figure 1. Chaîne de valeur de la filière photovoltaïque



Source : I Care Environnement

Le graphique ci-dessus présente le découpage de la filière utilisé dans le rapport. L'amont de la filière représente l'ensemble des opérations qui conduisent à la fabrication des modules, éléments de base de production d'électricité. Ces opérations incluent la fabrication des matières premières et des composants permettant la fabrication des matières premières ; la fabrication des cellules, éléments de base des modules et la fabrication des modules. L'aval de la filière inclut la fabrication des composants électriques qui relient les modules au réseau (le BOS), la pose des modules et des composants électriques, la maintenance et la gestion. Si les coûts amont dépendent principalement de la filière technologique, on suppose que les coûts aval dépendent davantage des applications : résidentiel, tertiaire ou centrale au sol.

Le coût de pose des modules est directement lié à la surface couverte et à la puissance installée. Trois catégories d'applications sont distinguées : les applications domestiques, de moins de 36 kW, les applications industrielles, dites aussi « grandes toitures », qui vont de 36 kW à 120 kW, les centrales au sol, qui peuvent représenter des puissances de plusieurs MW.

#### Les technologies photovoltaïques

L'étude distingue trois familles technologiques de modules photovoltaïques. La première est la famille du **silicium cristallin**. Développée dès les années 60, elle représente encore la technologie dominante. Le processus de fabrication consiste, à partir de silicium de qualité solaire, à former des lingots de silicium puis à les découper en cellules photovoltaïques. La deuxième famille est celle des couches minces. Leur fabrication consiste à déposer sous vide de matériaux d'une épaisseur de quelques microns. Le principal avantage des couches minces est leur coût de production faible, mais leur rendement surfacique est d'environ 20% à 30% inférieur à celui du silicium cristallin. La principale technologie de couches minces en termes de parts de marché est celle du tellure de cadmium (CdTe), dont l'avantage est le faible coût de production, en partie compensé par de nécessaires coûts de recyclage. D'autres types de couches minces existent : silicium amorphe, alliages de Cuivre-Indium-Sélénium- Gallium...(CIGS)... La dernière famille est celle des modules photovoltaïques à concentration (CPV) Le module photovoltaïque à concentration se base sur l'utilisation de lentilles ou de miroirs paraboliques pour multiplier l'énergie incidente provenant du soleil sur une cellule photovoltaïque afin d'augmenter l'énergie produite par ce module. L'intérêt pour la concentration réside dans le rendement surfacique et dans la compacité des installations. Cette technologie n'en est qu'au début de la phase d'industrialisation et a fait l'objet d'un traitement séparé dans le rapport.

## **b) Choix des innovations et modélisation des baisses de coût**

Les innovations présentées dans l'étude n'ont pas vocation à couvrir l'ensemble des travaux en cours et des brevets déposés. Les innovations recensées sont celles qui permettent de répondre aux objectifs généraux de l'étude :

- Permettre d'accélérer la compétitivité de l'électricité photovoltaïque par rapport aux autres sources d'électricité non renouvelables,
- Maximiser les autres retombées positives du soutien à la production d'électricité photovoltaïque.

En conséquence, sans que cela soit systématique, on s'est intéressé davantage aux innovations issues de sociétés françaises ou qui concernent l'activité actuelle de sociétés françaises. Les innovations concernant l'amont de la filière ont été classées selon les trois filières de production : le Silicium cristallin, les couches minces avec les technologies CIGS et CdTe, et le CPV. Les innovations concernant l'aval ont été classées selon l'application.

Une attention plus particulière a été portée au Silicium cristallin, en raison de sa prépondérance dans la production mondiale actuelle. Les couches minces et le CPV n'ont pas pour autant été écartés de l'analyse, mais le recensement des innovations est plus général, et s'est limité aux innovations majeures en termes de baisse de coût. La filière CPV, en raison de son développement industriel récent et du relatif manque d'information, a fait l'objet d'un traitement séparé dans le rapport.

L'identification des innovations s'est faite à partir d'une revue de littérature, dont les références sont fournies en annexe du rapport, complétée d'entretiens avec une vingtaine de professionnels et chercheurs du secteur. Ces entretiens ont permis de vérifier les informations collectées lors de la revue de bibliographie, de compléter les innovations recensées et de déterminer l'horizon de mise sur le marché des innovations, avant 2015 ou entre 2015 et 2020.

## **c) Structure de coût 2012 et effet des innovations**

La décomposition des coûts (en €/W) en 2012 a été effectuée étape par étape à partir de l'analyse bibliographique, et validée par des entretiens auprès des industriels pour chaque filière de production et chaque type d'application. Il s'agit du coût de production par des entreprises françaises ou européennes. Ce coût a été calé sur la décomposition actuelle des coûts du SER.

Le potentiel de baisse de coût de chaque innovation a été estimé à partir des informations qualitatives collectées et de la structure de coût reconstituée en 2012. L'augmentation des capacités de production et les effets d'échelle associés n'ont pas été pris en compte.

La modélisation de la baisse de coût des installations liée aux innovations retenues est faite en cumulant les baisses de coût des innovations recensées, tout en tenant compte :

- de la date à laquelle les innovations vont se concrétiser (avant ou après 2015),
- de la concurrence entre les innovations, toutes ne pouvant pas se réaliser en même temps ou ne s'appliquant pas à la même technologie.

## **d) Scénarios de développement utilisés dans l'étude**

L'impact des innovations sur les marchés s'appuie sur des scénarios de développement des puissances installées à horizon 2015-2020, en France et dans le monde. Les scénarios de développement dans le monde sont ceux de l'EPIA<sup>2</sup>. Le scénario de développement français a été construit dans le cadre de cette étude et est décrit plus précisément.

---

<sup>2</sup> *Global Outlook market until 2016* – Mai 2012

### III. CONTEXTE, MARCHÉ ET RÉGLEMENTATION

#### III.1. LE MARCHÉ INTERNATIONAL

##### III.1.1. Les puissances installées

Les installations photovoltaïques ont vu leur puissance pratiquement doubler entre 2010 et 2011, passant de 40 GW raccordés en 2010 à 70 GW raccordés en 2011. Sur les 30 GW raccordés en 2011, 22 GW l'ont été en Europe. Pour 2012, les capacités raccordées devraient rester proches de leur niveau de 2011, la baisse des marchés européens étant partiellement compensée par des installations en Inde et en Chine.

Jusqu'à présent la technologie du silicium cristallin, la plus ancienne, domine largement le marché avec 87% des puissances installées en 2010<sup>3</sup>.

Le développement récent du parc photovoltaïque est lié à la baisse du coût des modules, en particulier sous l'effet d'une production massive de modules bon marché en provenance d'Asie. En Europe, la baisse du prix des modules conjuguée à des politiques de soutien tarifaire offensives, a permis aux acteurs qui installaient un parc photovoltaïque entre 2009 et 2011 de bénéficier d'un rendement élevé par rapport au capital investi, et a entraîné une augmentation massive des puissances photovoltaïque raccordées au réseau.

##### III.1.2. Les différents marchés du photovoltaïques

L'année 2011 a été marquée par une sur-production importante de **modules**, avec une production estimée à 50GW<sup>4</sup> pour 30 GW installés. Cette sur-production a entraîné des baisses de prix qui ont provoqué les difficultés ou la disparition d'importants acteurs européens de la filière (Solon SE, Q-cells, Solarhybrid, Evasol, Photowatt). Cette surcapacité de production ne devrait se résorber qu'en 2013 ou 2014<sup>5</sup>. Compte tenu de la volatilité des prix, il est difficile d'estimer la valeur de ce marché, qui pourrait se situer aux alentours de 30 milliards de dollars en 2011. Ce marché est caractérisé par son très fort degré de spécificité photovoltaïque, les fabricants de cellules et/ou modules étant des « pure players », spécialisés dans le photovoltaïque. Deux modèles d'entreprises coexistent, les assembleurs, qui assemblent les cellules en provenance d'Asie et les entreprises qui intègrent l'ensemble du processus de production, depuis les matériaux solaires jusqu'aux modules.

Le marché des **cellules** a longtemps été dominé par les fabricants nord-américains et européens, allemands en particulier. Depuis fin 2010, la surcapacité de production a conduit à une concentration des acteurs et à un rééquilibrage du marché en faveur de l'Asie : en 2011, la Chine et Taïwan concentrent près de 70% de la production mondiale de cellules. Si plusieurs centaines d'entreprises interviennent sur ce segment de marché, les dix plus gros fabricants détiennent 38% de la production mondiale de cellules en 2011 (soit 14 GW de capacités).

Le marché des **équipements de production** est estimé à 12,8 milliards de dollars en 2011. Suite à la surcapacité mondiale de production sur le marché des modules<sup>6</sup>, il aurait baissé de 55% en 2012, mais les perspectives de marché s'améliorent pour 2013 et sont nettement plus favorables à long terme. Ce marché est dominé par quelques grandes firmes occidentales<sup>7</sup>, dont plusieurs n'ont pas supporté la baisse d'activité<sup>8</sup>. Là encore, les fabricants chinois augmentent leur part de marché.

Le marché mondial des **matériaux solaires** est estimé en 2011 à 10,5 Mds€, pour 30 GW de puissance mondiale installée. Ce marché est très concentré, et dominé par de grands groupes industriels. La situation

<sup>3</sup> IRENA – juin 2012 - Renewable technologies : cost analysis series. Vol1 Solar photovoltaïcs. P.5.

<sup>4</sup> [http://www.lemonde.fr/planete/article/2012/04/03/photovoltaïque-l-offre-est-aujourd-hui-deux-fois-supérieure-a-la-demande\\_1679531\\_3244.html](http://www.lemonde.fr/planete/article/2012/04/03/photovoltaïque-l-offre-est-aujourd-hui-deux-fois-supérieure-a-la-demande_1679531_3244.html)

<sup>5</sup> D'après les analyses telles que celles menées par la Banque Sarasin, (Solar industry : survival of the fittest in a fiercely competitive marketplace, novembre 2011), par le Journal du Photovoltaïque, (Baromètre photovoltaïque, Euroserv'er, Journal du photovoltaïque n°7, avril 2012) ou par PVmagazine (www.pvmagazine.com).

<sup>6</sup> D'après des informations IMS Research reprises dans PV magazine le 10 novembre 2011

<sup>7</sup> Comme Centrotherm, Schmid Group, RENA, Meyer Burger (Roth&Rau), Oerlikon Solar – récemment racheté par la firme japonaise Tokyo Electron, Applied Materials, GT Advanced technologies, Amtech Tempres

<sup>8</sup> Centrotherm s'est déclarée en faillite et a été admise au régime de la poursuite d'activité mi 2012

sur ce marché est très dépendante de ce qui se passe sur les marchés situés en aval, un ralentissement au niveau de la production des modules limitant les besoins en matériaux solaires.

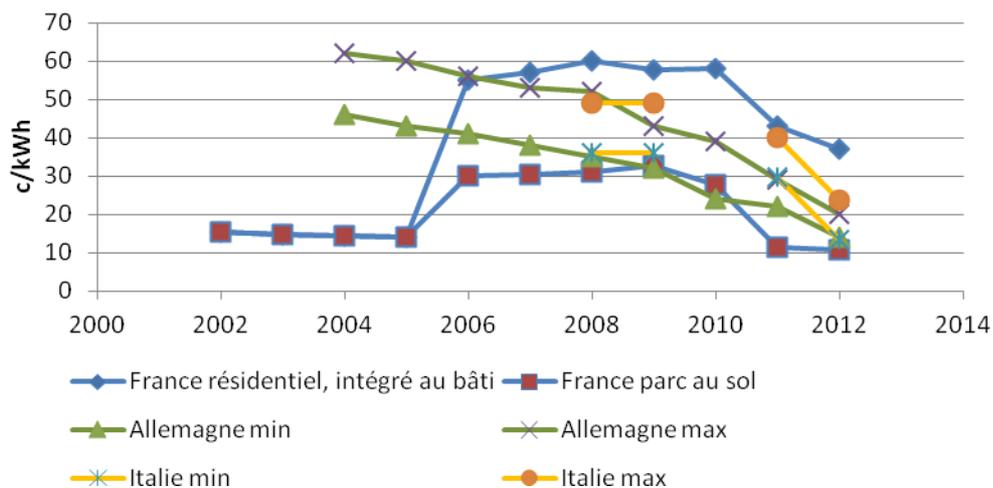
Les éléments de **BOS électrique** (onduleurs, câbles, boîtes de jonction...) constituent un marché d'envergure internationale. L'élément central du BOS électrique du photovoltaïque est l'onduleur. Ce marché représente près de 4,2 Mds€ en 2011. La production des onduleurs est historiquement réalisée en Europe, les principales entreprises se trouvant dans des pays comme l'Allemagne, l'Espagne, l'Autriche, la Suisse, le Danemark ou l'Italie. Au niveau international, des capacités de production importantes existent aux Etats-Unis, au Japon, en Corée du Sud et bien sûr en Chine.

### III.2. EVOLUTIONS DU CONTEXTE POLITIQUE ET RÉGLEMENTAIRE

Le développement du marché photovoltaïque dans le monde a été favorisé par les politiques de soutien mises en place dans les différents pays. Plusieurs schémas d'incitation peuvent cohabiter : tarifs d'achat de l'électricité photovoltaïque (*Feed-in Tariff ou FiT*), délivrance de certificats verts, subventions pour l'installation de systèmes, crédit d'impôts...

La modulation des schémas incitatifs peut se faire selon la puissance des systèmes installés, le type d'application, et le type de pose – la pose intégrée au bâti étant la forme favorisée en France. Globalement, les politiques de soutien à la filière PV ont été très favorables jusqu'en 2009-2010, période à laquelle le marché s'est emballé, du fait des baisses de prix des modules qui ont conduit à une rentabilité exceptionnelle des installations photovoltaïques. Des mécanismes de baisse graduelle des tarifs de soutien ont alors été instaurés dans la plupart des pays de manière à tenir compte de la baisse des coûts et de la montée en puissance des parcs photovoltaïques.

Figure 2. Evolution du tarif d'achat en France, Allemagne et Italie



Source : Photovoltaïque info, energiea

#### III.2.1. En France

Deux mécanismes de soutien ont été mis en place depuis le milieu des années 2000 : le Crédit d'Impôt Développement Durable (CIDD) et un tarif d'achat de l'électricité photovoltaïque injectée sur le réseau.

Le CIDD avait été fixé jusqu'en 2010 à 50% de la valeur des équipements. Il a été réduit en 2011 puis en 2012, et le taux applicable aujourd'hui est de 11%, avec un plafonnement des coûts à 3 200€TTC par kW.

En 2006, les tarifs d'achat du photovoltaïque ont été réévalués, à la fois pour les installations résidentielles, 0,55€/kWh et les centrales au sol. Couplé à la baisse importante du prix des modules, qui est passé de 5,1€/W en 2006 à 2€/W en 2009<sup>9</sup>, il s'est traduit par une rentabilité exceptionnelle. Les demandes de raccordements ont fortement augmenté, pour atteindre 60 000 demandes fin 2009, pour une puissance de

<sup>9</sup> D'après les rapports de la France à l'Agence Internationale de l'Energie

2,5 GW. Les raccordements au réseau n'ont pas suivi les demandes et la file d'attente a été multipliée par 8 entre le 1<sup>er</sup> janvier 2009 et le 31 décembre 2010.

Une première modulation des tarifs a été mise en place en 2010, avec notamment une baisse de 14% des tarifs d'achat pour les installations à « intégration simplifiée ». Puis, face à l'afflux continu des demandes et au coût croissant de la politique de soutien, un moratoire a été instauré début 2011 et un nouveau dispositif de soutien a été mis en place. Celui-ci fait appel à deux mécanismes distincts suivant la puissance de l'installation :

- des tarifs d'achat ajustés chaque trimestre pour les installations sur bâtiments de moins de 100 kW ; avec une baisse de 5% par trimestre des tarifs d'achat, modulée en fonction du niveau des demandes de raccordement,
- des appels d'offres pour les installations sur bâtiments de plus de 100 kW et les centrales au sol.

### III.2.2. A l'étranger

#### a) En Allemagne

L'Allemagne est le pays qui a développé le plus tôt une politique de soutien au développement de la filière photovoltaïque<sup>10</sup>. Le tarif d'achat est fixé selon la puissance des installations, entre les installations liées au bâti et les centrales au sol. L'autoconsommation est favorisée pour les installations liées au bâti.

Les premières baisses du tarif d'achat ont eu lieu en 2010. La révision de la loi EEG en 2012 a redéfini les modalités de réduction des tarifs d'achat<sup>11</sup>. Ils sont désormais révisés au 1<sup>er</sup> janvier et au 1<sup>er</sup> juillet. La révision de janvier, la plus importante, se fait sur une base de 9% de réduction du tarif d'achat par rapport à l'année précédente. Cette réduction est modulée selon « un couloir de développement » des installations entre 2,5 et 3,5 GW. Si le volume d'installation dépasse ce corridor, une réduction supplémentaire de 3 points est appliquée au tarif d'achat, par GW installé. Si le marché ne dépasse pas 2,5GW, la baisse du tarif d'achat est réduite de 2,5% tous les 500 MW. La réduction intermédiaire du tarif en juillet se fait selon le même principe que la révision de janvier, mais le couloir utilisé n'est pas le même.

#### b) En Italie

L'Italie avait mis en place un système extrêmement incitatif. Le tarif d'achat, versé par Gestore di Servizi Elettrici (GSE) est modulé selon la taille, la capacité de l'installation, et le niveau d'intégration au bâti.

Le schéma incitatif mis en place en 2009 mêlait comptage net et tarif d'achat pour les installations de moins de 200kW. Pour les usagers, le tarif d'achat de l'électricité produite est identique au tarif auxquels ils paient l'électricité consommée. Quand l'électricité produite dépasse l'électricité consommée, les clients reçoivent un crédit de la valeur de l'électricité. En outre, les propriétaires des installations reçoivent un supplément de tarif d'achat sur l'intégralité de la production de l'installation photovoltaïque.

Les tarifs ont été revus à la baisse en 2010. De plus, à partir de 2011, le système a été limité à 3 GW installés chaque année.

#### c) Au Japon

Les installations résidentielles au Japon bénéficient d'un nouveau tarif d'achat depuis 2009, en plus d'une subvention à l'installation. Le tarif d'achat s'applique au surplus d'électricité produite et non consommée par l'installation, que les entreprises sont légalement obligées de racheter.

Les installations non résidentielles bénéficiaient jusqu'en 2011 d'une aide à l'investissement, qui a été supprimée. En revanche, le tarif d'achat de l'électricité pour les systèmes de moins de 500 kW est passé de 0,15€/kWh à 0,35€/kWh<sup>12</sup>. Un nouveau tarif d'achat est également entré en vigueur en juillet 2012, à 0,42€/kWh<sup>13</sup>, ce qui en fait l'un des plus élevés du monde.

<sup>10</sup> Les évolutions des politiques incitatives sur les principaux marchés sont présentées dans EPIA, Solar Generation VI, 2012. Les développements de la publication sont repris ici.

<sup>11</sup> BSW Solar, EEG Amendment 2012 : What will change as of 1st January 2012 ?

<sup>12</sup> D'après Eurobserv'er, Baromètre photovoltaïque, Le journal du photovoltaïque, Hors-Série, n°7, avril 2012.

<sup>13</sup> D'après Tecsol : [http://tecsol.blogspot.com/mon\\_weblog/2012/07/nouveau-tarif-dachat-au-japon-panasonic-anticipe-une-hausse-de-30-de-la-production-de-ses-panneaux-h-1.html](http://tecsol.blogspot.com/mon_weblog/2012/07/nouveau-tarif-dachat-au-japon-panasonic-anticipe-une-hausse-de-30-de-la-production-de-ses-panneaux-h-1.html)

### d) Aux Etats-Unis

Les Etats-Unis ont subi de plein fouet la crise en 2008-2009. Le soutien au développement de la filière photovoltaïque est une des mesures de redressement de l'économie.

Le plafonnement du crédit d'impôt sur l'investissement a été supprimé en 2009, et le crédit d'impôt fédéral de 30% pour les installations PV résidentielles et commerciales a été prolongé jusqu'en 2016. Mais les schémas incitatifs sont également propres à chaque état. Ainsi, entre septembre 2008 et septembre 2009, une quarantaine de nouveaux programmes incitatifs ont été mis en place dans 19 états :

- 14 prenaient la forme de soutien à la production ;
- 11 étaient des tarifs d'achat ;
- 14 étaient des programmes de certificat énergie renouvelable.

### e) En Chine

Contrairement aux autres systèmes présentés jusqu'à présent, le schéma incitatif développé en Chine était timide jusqu'en 2011. Il y avait des initiatives régionales et des tarifs locaux d'achat de l'électricité ont été instaurés dans certaines provinces, mais aucun mécanisme national de soutien à la filière n'a été mis en place.

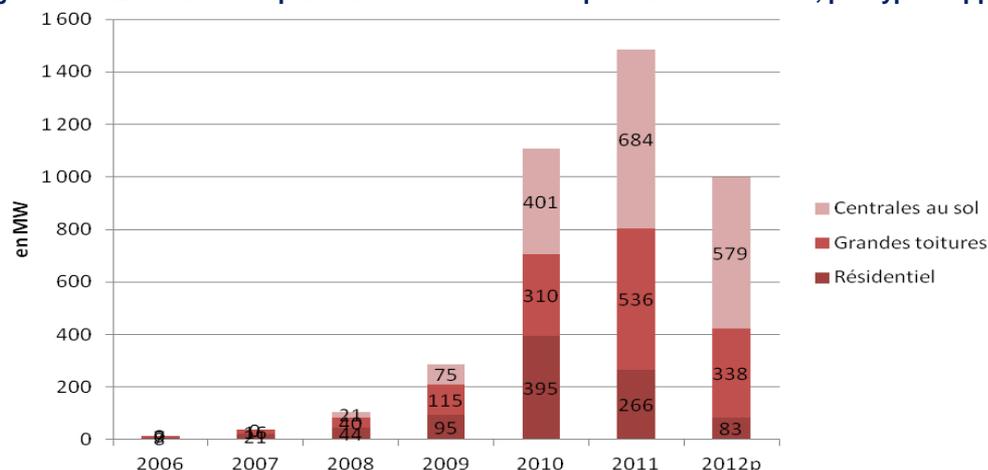
Le pays présente aujourd'hui l'un des plus importants potentiels de développement pour le marché mondial du PV, et un mécanisme national de soutien à la filière a été mis en place en août 2011 avec notamment l'instauration d'un tarif d'achat de l'électricité à 0,14€/kWh et l'objectif d'installer 20GW de PV d'ici 2020. Les deux principaux fabricants de modules, Suntech et Trina Solar prévoient ainsi pour 2012 4 à 5 GW d'installations.

## III.3. LE MARCHÉ FRANÇAIS

### III.3.1. Puissances installées

En juin 2012, en France, 263 000 installations photovoltaïques représentent une puissance installée de 3,6 GW<sup>14</sup>. Ce parc est actuellement très morcelé, avec 88% d'installations de moins de 3 kW, ne représentant que 18% des puissances installées. Les grandes centrales au sol, peu nombreuses (824 de plus de 250 MW) fournissent 43% des puissances installées.

**Figure 3. Evolution des puissances installées chaque année en France, par type d'application**



Source: In Numeri, d'après données SOeS<sup>15</sup>, 2012 : prévision

En 2010 et 2011, on a assisté à une explosion de nouvelles installations. Celles-ci représentent une capacité supplémentaire de 1,1 GW en 2010, 1,6 GW en 2011. En 2012, le parc additionnel installé devrait encore représenter près d'1 GW.

Pour les prochaines années, la cible annuelle de la politique énergétique est de 500 MW pour les installations souhaitant bénéficier des mécanismes de soutien : 100 MW pour les installations résidentielles jusqu'à 36 kW intégrées au bâti, 100 MW pour les installations de 36 à 100 kW, 120 MW pour les installations entre 100 et 250 kW et 180 MW pour les installations de plus de 250kW.

<sup>14</sup> Tableau de bord Eolien photovoltaïque – 2<sup>ème</sup> trimestre 2012 – Commissariat général au développement durable.

<sup>15</sup> Les installations sont estimées à partir des raccordements, en supposant un délai minimum d'un trimestre entre installation et raccordement, délai aggravé à partir de 2010 et estimé à partir de la file d'attente publiée par le SOeS.

Depuis la mise en place du moratoire et la baisse de tarif d'achat de 5% en moyenne par trimestre, le marché s'est restructuré, avec la chute des installations résidentielles au profit des grandes toitures en 2011 et des centrales au sol. La baisse et l'incertitude quant aux tarifs d'achat résidentiels qui fluctuent chaque trimestre ont contribué à décourager les ménages à investir dans le photovoltaïque, malgré un niveau de tarif qui reste l'un des plus favorables en Europe. Une perte de confiance des particuliers envers les dispositifs de soutien pourrait donc être en partie à l'origine du déclin observé.

La politique de soutien pose également le problème de l'acceptabilité de son financement : la CSPE augmente les prix à la consommation. La CRE estime le montant de la CSPE lié au soutien de la filière PV à 1 Md € en 2011 et 1,6 Md€ en 2012, soit trois fois le coût de l'éolien.

### III.3.2. Le marché du photovoltaïque en France

**Tableau 1. Importations et production nationale par composante**

en millions d'euros

|                                 | 2 006      | 2 007      | 2 008      | 2 009        | 2 010        | 2 011        | 2012p        |
|---------------------------------|------------|------------|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>Valeur de marché globale</b> | <b>126</b> | <b>301</b> | <b>794</b> | <b>1 785</b> | <b>5 851</b> | <b>3 839</b> | <b>2 335</b> |
| <b>Importations</b>             | <b>86</b>  | <b>202</b> | <b>362</b> | <b>742</b>   | <b>2 556</b> | <b>1 771</b> | <b>1 119</b> |
| Cellules                        | 13         | 32         | 145        | 175          | 249          | 361          | 496          |
| Modules                         | 52         | 127        | 104        | 310          | 1 517        | 718          | 207          |
| Matériel électrique             | 15         | 32         | 84         | 196          | 596          | 532          | 319          |
| Structure                       | 5          | 11         | 28         | 60           | 193          | 160          | 96           |
| <b>Production nationale</b>     | <b>156</b> | <b>248</b> | <b>665</b> | <b>1 256</b> | <b>3 641</b> | <b>2 469</b> | <b>1 752</b> |
| Modules (y.c export)            | 123        | 160        | 294        | 255          | 334          | 440          | 536          |
| Matériel électrique             | 4          | 9          | 24         | 55           | 168          | 150          | 90           |
| Structure                       | 5          | 10         | 26         | 56           | 178          | 148          | 88           |
| Etudes                          | 6          | 13         | 50         | 120          | 437          | 438          | 284          |
| Installation                    | 18         | 56         | 271        | 771          | 2 524        | 1 293        | 754          |

**Source:** In Numeri, 2012 : prévision

Le marché du photovoltaïque en France est évalué à partir des puissances installées et des prix des systèmes. La production nationale est déduite de la valeur du marché, des importations et des exportations, en supposant que les études et installations sont réalisées entièrement par des entreprises françaises.

Le marché du photovoltaïque a atteint près de 6 Mds€ en 2010, pour revenir à 3,8 Mds€ en 2011. Il devrait rester en-deçà de 3 Mds€ en 2012, conséquence de la forte diminution des installations résidentielles en 2012, dont le marché devrait être divisé par trois par rapport à 2010. En 2011, les applications résidentielles représentaient un marché de 1 Md€, les applications industrielles, un marché de 1,4 Mds€, identique à celui des centrales au sol.

**Tableau 2. Emploi pour chaque composante de la chaîne de valeur**

|                     | 2006         | 2007         | 2008         | 2009          | 2010          | 2011          | 2012p         |
|---------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| <b>Emplois</b>      | <b>1 264</b> | <b>2 478</b> | <b>5 277</b> | <b>10 384</b> | <b>32 291</b> | <b>28 280</b> | <b>16 727</b> |
| Matériaux solaires  | 26           | 41           | 110          | 207           | 600           | 407           | 289           |
| Equipementiers      | 29           | 46           | 124          | 235           | 680           | 461           | 327           |
| Modules             | 351          | 456          | 838          | 727           | 952           | 1 254         | 1 528         |
| Matériel électrique | 21           | 42           | 103          | 226           | 640           | 537           | 304           |
| Autres composants   | 26           | 52           | 137          | 288           | 921           | 753           | 442           |
| Installation        | 781          | 1 775        | 3 713        | 8 095         | 26 190        | 22 574        | 12 361        |
| Etudes              | 32           | 66           | 253          | 607           | 2 307         | 2 294         | 1 476         |

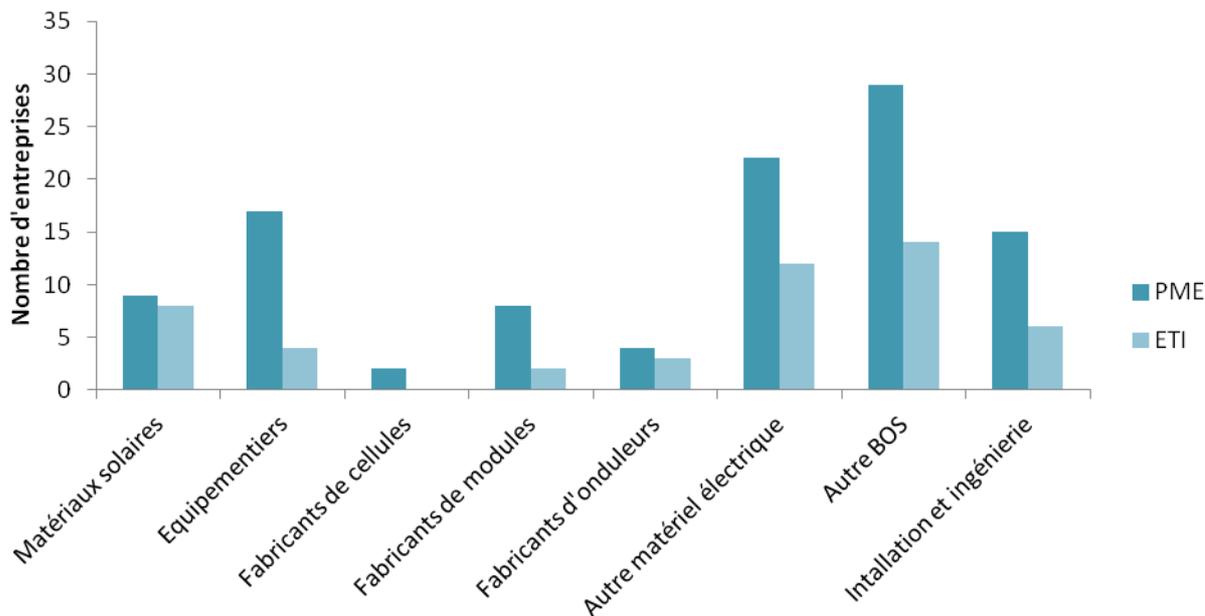
**Source:** In Numeri

L'installation est actuellement le principal vivier d'emplois directement liés au photovoltaïque. En 2010, sur les 32000 emplois correspondant à la production française, 28000 étaient liés à l'installation des systèmes ou aux études. Compte tenu du recul des applications résidentielles, les installations ne devraient plus représenter que 14000 emplois en 2012.

Les emplois industriels sont évalués à quelques milliers : 2000 en 2009, 4000 en 2010. La fabrication des modules, cœur de métier du photovoltaïque, emploie environ 1000 personnes, voire 1500 en 2012.

### III.3.3. Les entreprises Françaises du photovoltaïque

**Figure 4. Répartition des entreprises du photovoltaïque par segment de marché selon leur taille, hors petits installateurs**



Source : annuaire SER-SOLER, [www.societe.com](http://www.societe.com)

S

Selon l'annuaire du SER-SOLER, complété par des informations issues des entretiens, environ 160 entreprises ont une activité liée plus ou moins directement au photovoltaïque en France. A ces 160 entreprises s'ajoutent de nombreux petits installateurs, au minimum 4 500 fin 2010 si l'on ne prend en compte que les entreprises certifiées QualiPV.

Les entreprises intervenant sur le marché photovoltaïque en France sont majoritairement des PME, deux fois plus nombreuses que les entreprises de taille intermédiaire. Mais certaines sont des filiales de grands groupes.

**Tableau 3. Les entreprises Françaises intervenant dans le marché photovoltaïque, hors petits installateurs**

| Segment de marché         | Nombre d'entreprises | Spécialisation PV            | Exports/VA | VA 2010 (M€) | Emploi 2010 | Emploi PV 2010 | Filière PV           |
|---------------------------|----------------------|------------------------------|------------|--------------|-------------|----------------|----------------------|
| <b>Matériaux solaires</b> | 17                   | Faible, PV<15% du CA         | 46,6%      | 472          | 6 943       | 600            | c-Si, couches minces |
| <b>Équipementiers</b>     | 21                   | faible: PV<10% CA            | 74%        | 250          | 2 540       | 680            | c-Si                 |
| <b>Cellules</b>           | 3                    | 100%                         | 8%         | 0            | 17          | 17             | c-Si, couches minces |
| <b>Modules</b>            | 15                   | 100%                         | 8,2%       | 53           | 1 005       | 952            | c-Si                 |
| <b>BOS électrique</b>     | 44                   | Très faible <5% du CA        | 34%        | 1 704        | 17 301      | 640            | c-Si                 |
| <b>Autre BOS</b>          | 50                   | Faible                       | 18%        | 808          | 9 365       | 921            | c-Si                 |
| <b>Installation</b>       | 22                   | Importante : 30% à 80% du CA | 9%         | 11           | 1 449       | -              | c-Si, couches minces |

Source : In Numeri d'après données [www.societe.com](http://www.societe.com) et annuaire SER-SOLER

Les fournisseurs de **matériaux solaires** sont souvent des filiales de grands groupes, avec des acteurs importants au niveau mondial, comme Air Liquide ou Saint-Gobain Solar. Ces entreprises sont largement tournées vers l'exportation (à 47%). La part de leur activité liée au photovoltaïque est faible et difficilement quantifiable. Une quinzaine d'entreprises sont recensées dans l'annuaire du SER-SOLER; elles emploient près de 7 000 personnes, mais seulement 600 emplois sont liés au photovoltaïque en 2010.

Les **équipementiers** proviennent également de branches industrielles variées, comme l'industrie textile ou la sérigraphie. Le photovoltaïque représente moins de 10% de leur chiffre d'affaires. Une vingtaine d'entreprises fournissent aujourd'hui les équipements de la filière Silicium, leur activité se fait essentiellement à l'export. Le SER-SOLER estime que 680 emplois sont liés à l'activité d'équipementiers du photovoltaïque en 2010.

La **fabrication de cellules** est très peu développée en France, seules trois entreprises sont présentes sur ce segment, pour les filières Silicium et couches minces.

L'**assemblage de modules** est plus développé, avec une quinzaine d'entreprises. Leur activité est essentiellement tournée vers le marché intérieur, même si dans le passé, l'activité des opérateurs historiques (Tenesol) était destinée à l'exportation. L'emploi sur ces segments de marché est estimé à 1 000 personnes environ<sup>16</sup>, les estimations du SER en 2010 sont de 2 000 emplois.

Les fournisseurs de **BOS électrique** sont des entreprises du secteur de l'électricité, pour qui le photovoltaïque n'est pas une activité centrale. Les fabricants d'onduleurs sont un peu plus tournés vers ce secteur, même s'il n'est selon toute vraisemblance pas majoritaire dans leur activité. C'est l'un des segments de marché les plus développés en France. L'annuaire SER-SOLER permet de recenser 44 entreprises, ce qui est probablement sous-estimé. Les emplois liés au photovoltaïque sont estimés à approximativement 1 700 personnes, si l'on suppose qu'ils représentent 10% des emplois déclarés par les entreprises.

Une cinquantaine d'entreprises interviennent sur la fabrication et la fourniture **d'éléments de BOS autres qu'électriques** (composants de structure). Certaines d'entre elles, des PME à rayonnement régional ont développé leur propre système d'intégration. Des interactions importantes existent entre ce segment de marché et le secteur du BTP, nombre d'entreprises de ce secteur s'étant lancées dans la pose d'ombrières de parking, par exemple. Il est probable que toutes les entreprises issues du BTP n'ont pas été recensées.

Enfin, l'**installation** est le segment de marché le plus développé en France et générant le plus grand nombre d'emplois. Ce segment est partagé en deux tissus : le premier est constitué de petits artisans locaux, très nombreux (l'annuaire QualiPV en recense 4 500 fin 2010) mais ne réalisant que quelques installations par an. Le second segment est constitué par la vingtaine de grands installateurs qui dominent

<sup>16</sup> En supposant une production de 310 k€ par emploi.

le marché, 22 grands installateurs et bureaux d'études en 2010, dont l'activité est tournée vers l'ingénierie-conception pour les applications sur grandes toitures et les centrales au sol.

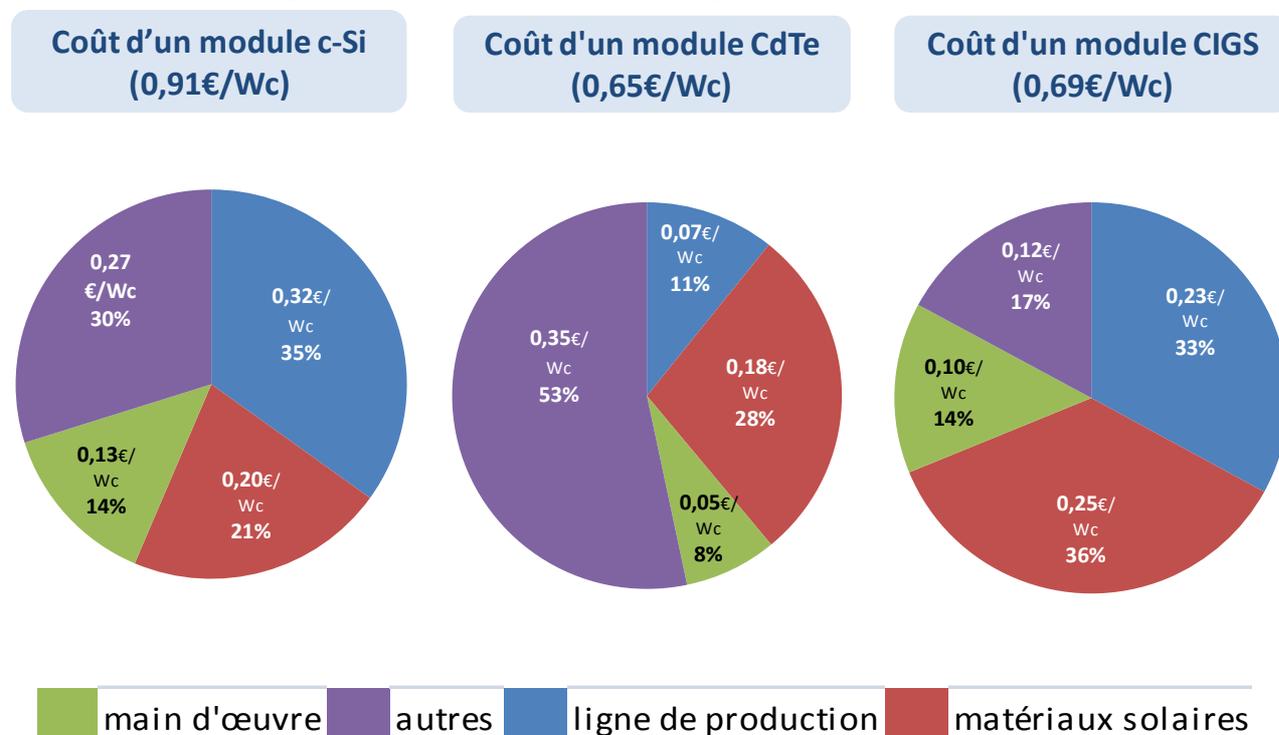
Les grands installateurs exercent des activités d'ingénierie-conception. Ce sont également des exploitants d'installations, et ils mettent au point diverses formes de partenariats permettant le financement des installations, comme par exemple la location des terrains ou des toitures. Pour les installations résidentielles, ils montent des partenariats avec des sociétés de crédit.

### III.4. DÉCOMPOSITION DU COÛT DE PRODUCTION EN 2012

La décomposition du coût de production a été réalisée séparément pour l'amont et pour l'aval de la chaîne de valeur : d'une part la production du module, d'autre part le cadre, le raccordement électrique (BOS) et la pose. Cette décomposition du coût repose à la fois sur des sources bibliographiques et sur des entretiens d'experts. Dans le cas des modules, ce coût correspond au coût d'un module « occidental », fabriqué en France ou en Europe. Les prix des modules chinois se situent environ 20% à 30% en-dessous de ce niveau.

#### III.4.1. Décomposition du coût du module

Figure 5. Décomposition du coût de production d'un module en 2012

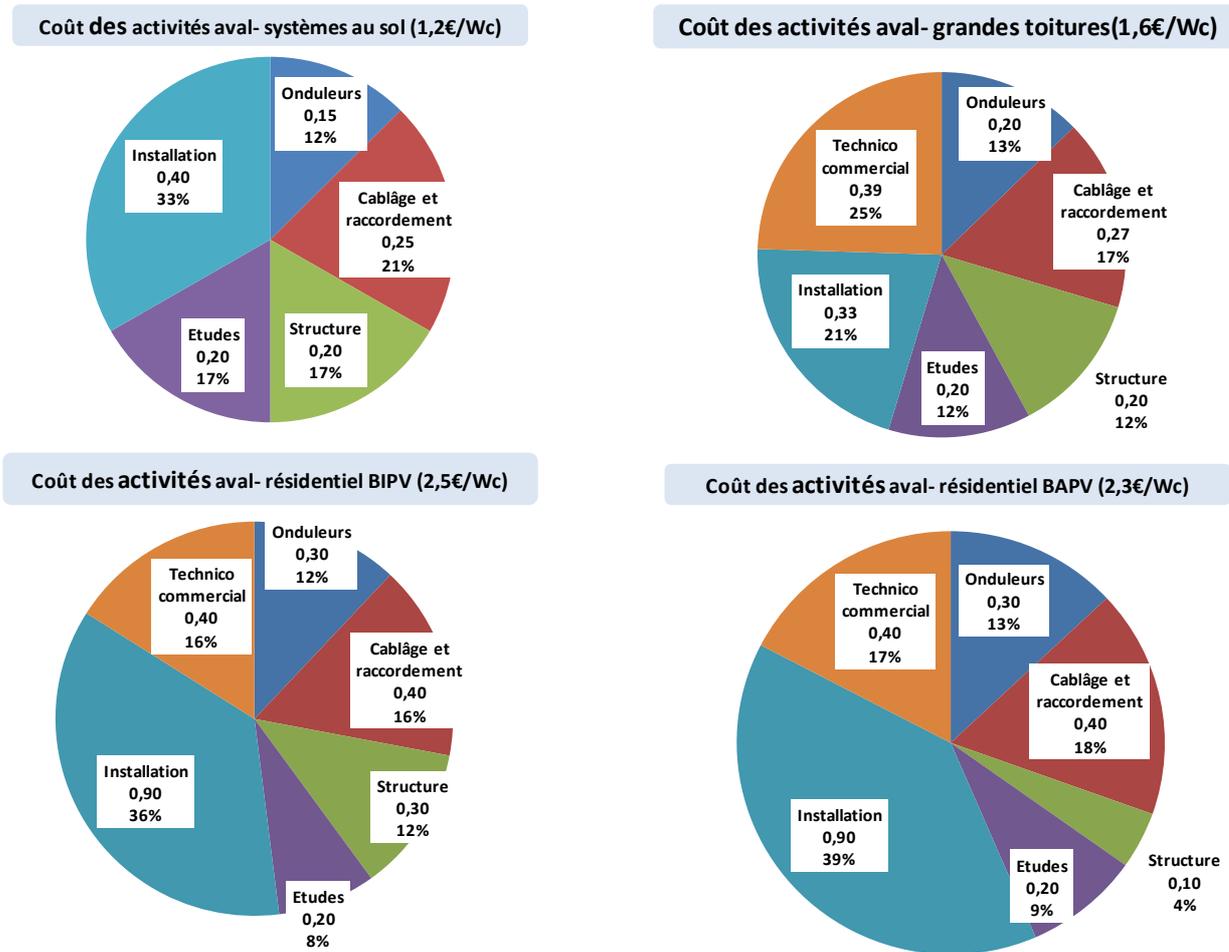


Source : In Numeri d'après données I Care Environnement

En 2012, le coût de production d'un module varie de 0,91€/W pour la filière du silicium cristallin à moins de 0,65 – 0,69€/W pour les filières couches minces. Les processus de production sont relativement intensifs en capital, les équipements représentent plus du tiers des coûts : 35% dans le cas du Silicium cristallin et 33% pour la filière CIGS. Le poids de la main d'œuvre est faible, il ne dépasse pas 14% du coût de production des modules, quelle que soit la filière. La majeure partie du coût est liée aux consommations intermédiaires. Les matériaux solaires représentent entre 20 et 36% du coût de production.

### III.4.2. Décomposition du coût de l'assemblage et de l'installation des modules

Figure 6. Décomposition du coût de production des activités aval en 2012



Source : In Numeri d'après données I Care Environnement et SER.

La partie aval de la chaîne de valeur se caractérise par son intensité en main d'œuvre. L'installation et le raccordement représentent approximativement la moitié du coût des systèmes résidentiels et des grandes toitures, et moins de 30% du coût des systèmes au sol. C'est le premier élément de différenciation des coûts entre les applications, passant de 0,20€/W pour les systèmes au sol à 0,9€/W pour les systèmes domestiques. Le coût des câblages varie également fortement : 0,25€/W pour les systèmes professionnels, 0,40€/W pour les systèmes résidentiels. Ces différences reflètent les économies d'échelle réalisées pour les applications industrielles. Le surcoût du BIPV sur le BAPV porte principalement sur la structure, trois fois plus chère dans le cas du BIPV, Les différences de coût d'installation et de câblage sont négligeables<sup>17</sup>

<sup>17</sup> Conformément à la décomposition des coûts fournie par le SER.

### III.4.3. Structure du coût total

Figure 7. Structure de coût des systèmes résidentiels en 2012

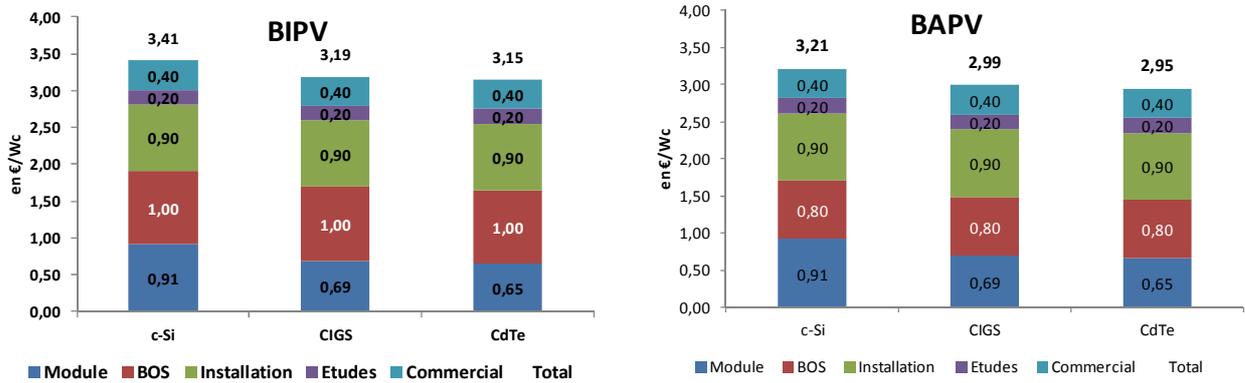
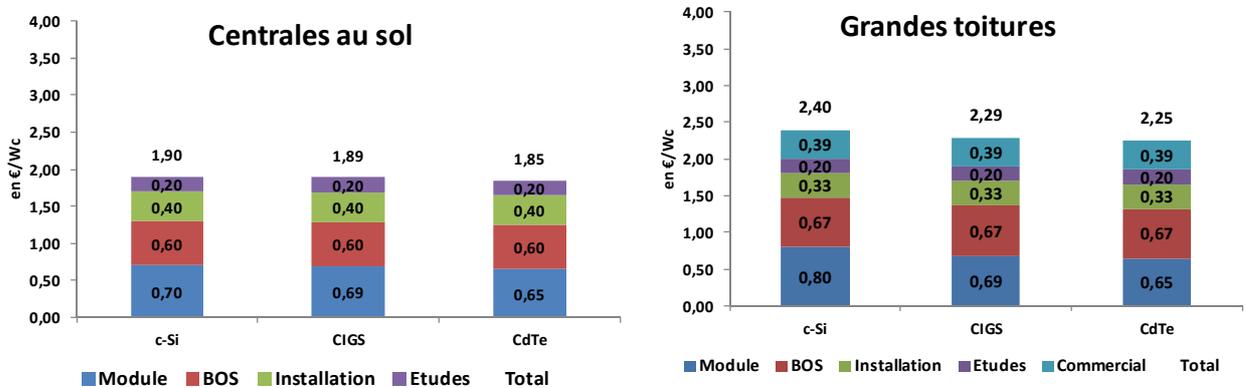


Figure 8. Structure de coût des systèmes grandes toitures et au sol en 2012



Source : In Numeri d'après données I Care Environnement. Note : pour les systèmes résidentiels, la différence de compatibilité des modules BIPV et BAPV a été prise en compte à travers les coûts de structure.

Les structures de coût ci-dessus prennent en compte des coûts de modules un peu moins élevés pour les centrales au sol que pour les systèmes résidentiels, selon les prix constatés par le SER.

## IV. IMPACTS DES INNOVATIONS SUR LES COÛTS

Les innovations présentées n'ont pas vocation à recouvrir l'ensemble des innovations en cours dans la filière. Elles ont été choisies en tenant compte de l'état actuel du marché et de l'existence d'acteurs français. Cela a conduit à une description plus détaillée des innovations dans la filière sur silicium cristallin, en retenant notamment davantage d'innovations de nature incrémentale dans cette filière. Les innovations relatives à la filière des couches minces ne sont pas négligées, mais sont moins détaillées.

### IV.1. TYPOLOGIE DES INNOVATIONS

Les innovations retenues dans le cadre de l'étude ont été regroupées selon plusieurs critères : leur position dans la chaîne de valeur (amont/aval), leur type (incrémental ou rupture), la baisse de coût potentielle. Les innovations sont également regroupées selon l'origine de leur développement : elle est française lorsque les acteurs français bénéficient d'une position très favorable sur le développement de l'innovation en question, étrangère lorsque les acteurs français ne sont pas impliqués dans le développement de l'innovation, et mixte lorsque l'innovation est développée à la fois par des acteurs français et étrangers.

**Tableau 4. Synthèse du nombre d'innovations recensées par origine et étape de production**

| Etape        | Filière/Application | Nombre d'innovations | Origine Française | Origine mixte | Origine étrangère |
|--------------|---------------------|----------------------|-------------------|---------------|-------------------|
| Amont        | Silicium cristallin | 22                   | 7                 | 11            | 4                 |
|              | CIGS                | 7                    | 3                 | 4             | 0                 |
|              | CdTe                | 4                    | 0                 | 0             | 4                 |
| Aval         | Systemes au sol     | 6                    | 1                 | 0             | 5*                |
|              | Grandes toitures    | 2                    | 0                 | 0             | 2*                |
|              | Résidentiels        | 2                    | 0                 | 0             | 2*                |
| <b>Total</b> |                     | <b>43</b>            | <b>11</b>         | <b>15</b>     | <b>17</b>         |

**Source :** In Numeri d'après données I Care Environnement. \* : innovations dont l'origine n'a pas pu être déterminée.

Les innovations technologiques retenues sont essentiellement concentrées sur l'amont de la chaîne de valeur, (33 innovations sur les 43 recensées), et la filière Silicium cristallin (22 innovations sur les 33 de l'amont). Cette typologie ne reflète pas le potentiel d'innovation de chacune des filières mais plutôt leur part actuel sur le marché français. Les innovations de la filière Silicium cristallin sont à la fois des innovations de rupture et des innovations incrémentales, alors que les innovations des filières couches minces sont principalement des innovations de rupture. Notons parmi les innovations non prises en compte ici, les recherches concernant l'usage du silicium dans la technologie des couches minces.

La grande majorité des innovations recensées sont développées par des équipementiers et des fournisseurs de consommables, dans une moindre mesure par les fabricants de cellules et modules. Les laboratoires de recherche jouent un rôle important dans le développement des innovations, en appuyant les industriels dans leur démarche.

Le quart des innovations recensées est d'origine française. Cette forte proportion est partiellement liée à la méthodologie employée, les acteurs interrogés étant des acteurs français. Nonobstant ce biais, les acteurs français sont relativement bien positionnés sur le développement d'innovations.

En outre, ils sont présents sur des innovations présentant un important potentiel de baisse de coût, comme le montre le tableau suivant. Dans celui-ci, figurent les 10 innovations présentant les potentiels de baisse de coût les plus importants parmi celles recensées. Les acteurs français sont présents sur la moitié de ces innovations.

**Tableau 5. Récapitulatif des innovations présentant le plus important potentiel de baisse de coût**

| Etape | Innovation                                                             | Baisse coût €/W | En % amont/aval | En % du coût total (selon filière / application) |
|-------|------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|--------------------------------------------------|
| Aval  | Modules clipsables BAPV                                                | -0,36           | 16%             | <b>11 à 13%</b>                                  |
| Aval  | Modules prêts à poser BIPV                                             | -0,27           | 11%             | <b>9 à 15%</b>                                   |
| CIGS  | Hausse rendement modules CIGS ( <i>acteurs français</i> )              | -0,173          | 25%             | <b>4 à 8%</b>                                    |
| C-Si  | Augmentation capacités fours de cristallisation (c-Si)                 | -0,16           | 18%             | <b>5 à 10%</b>                                   |
| CIGS  | Procédés atmosphériques (CIGS) ( <i>acteurs français</i> )             | -0,159          | 23%             | <b>5 à 12%</b>                                   |
| c-Si  | Développement produits monolike (c-Si)                                 | -0,15           | 16%             | <b>4 à 9%</b>                                    |
| C-Si  | Architecture innovante des cellules (c-Si) ( <i>acteurs français</i> ) | -0,15           | 16%             | <b>4 à 9%</b>                                    |
| C-Si  | Développement cellules hétérojonction (c-Si)                           | -0,15           | 16%             | <b>4 à 9%</b>                                    |
| Aval  | Hausse rendement onduleurs (BIPV)                                      | -0,15           | 6%              | <b>4-5%</b>                                      |
| Aval  | Hausse rendement onduleurs (BAPV)                                      | -0,15           | 7%              | <b>5%</b>                                        |
| C-dTe | Hausse rendement modules CdTe                                          | -0,134          | 21%             | <b>4 à 10%</b>                                   |

**Source :** In Numeri d'après données I Care Environnement. Note de lecture : lorsque l'innovation intervient sur l'aval de la chaîne de valeur, le pourcentage de baisse de coût de l'ensemble du système PV a été calculé pour chaque filière de production. La baisse de coût liée aux modules préfabriqués représente 17% des coûts dans la filière PV et 25% des coûts de la filière CIGS. Lorsque l'innovation intervient sur l'amont, le pourcentage a été calculé pour chaque type d'application : la hausse de rendement des modules de la filière CIGS représente 6% du coût résidentiel et 13% du coût des centrales au sol.

Les innovations intervenant sur l'aval de la chaîne de valeur présentent un important potentiel de baisse de coût : dans le cas des installations résidentielles, le développement de modules prêts à poser<sup>18</sup> pourrait réduire le coût du système posé de 11% à 15% selon la technologie de production du module et le type de système résidentiel (la réduction de 15% concerne les systèmes avec un module en silicium cristallin).

Les innovations recensées sur les filières de production en couches minces sont moins nombreuses que pour le Silicium cristallin car, pour les couches minces, le recensement des innovations a surtout porté sur les innovations de rupture alors que de nombreuses innovations incrémentales ont été recensées dans la filière du Silicium cristallin.

Les innovations de la filière des couches minces présentent un potentiel individuel<sup>19</sup> de réduction de coût plus important : les innovations concernant la hausse de rendement des modules CIGS et la mise en place de procédés atmosphériques représentent respectivement 25 et 23% du coût de production du module en 2012, et 5 à 12% du coût total d'un système (en fonction de l'application). Les innovations au potentiel le plus important pour la filière silicium cristallin représentent 18% du coût de production du module en 2012 et 5 à 10% du coût total du système.

## IV.2. IMPACTS DES INNOVATIONS RETENUES SUR LES COÛTS DE PRODUCTION DES SYSTÈMES

### IV.2.1. Méthodologie utilisée

A partir de la consolidation des baisses de coût précédentes, on calcule un potentiel global de baisse des coûts lié aux innovations retenues.

Pour cela, pour chaque innovation, on fait une hypothèse sur la date de sa mise en production, avant 2015 ou entre 2015 et 2020. On ne retient que celles qui ont de fortes chances d'aboutir d'ici 2020. On ne somme ensuite que les baisses liées à des innovations non concurrentes dans le process de production.

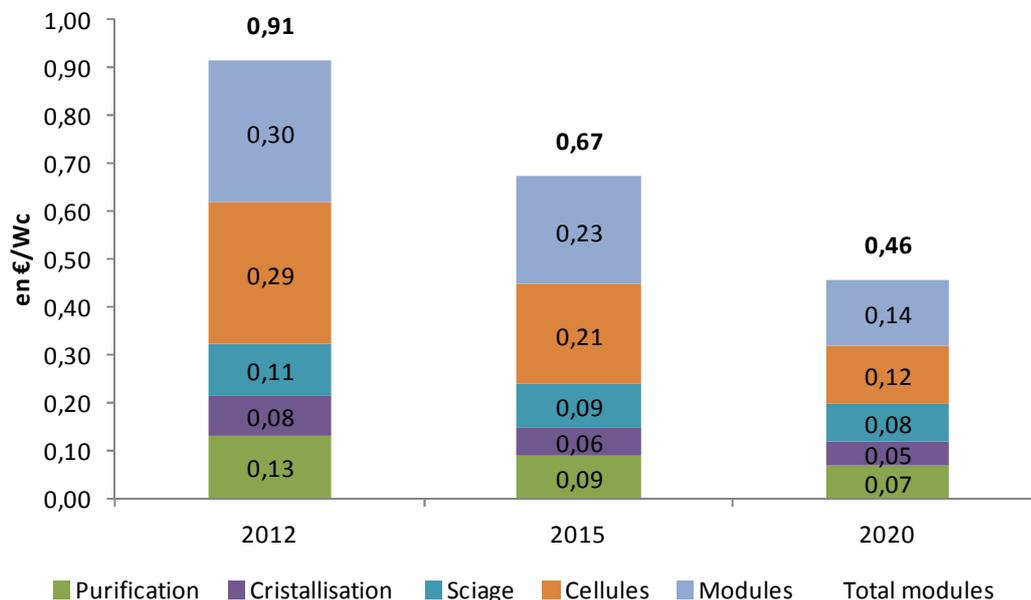
<sup>18</sup> On entend par là des modules livrés avec le cadre de structure intégré, de type panneaux-toitures.

<sup>19</sup> La baisse totale de coût liée aux innovations est plus importante pour la filière de production Silicium cristallin que pour les filières de production en couches minces en raison des interactions entre les innovations.

## IV.2.2. Potentiel de baisse de coût des modules

### a) Sur la filière Silicium cristallin

Figure 9. Effets des innovations sur la structure de coût des modules c-Si



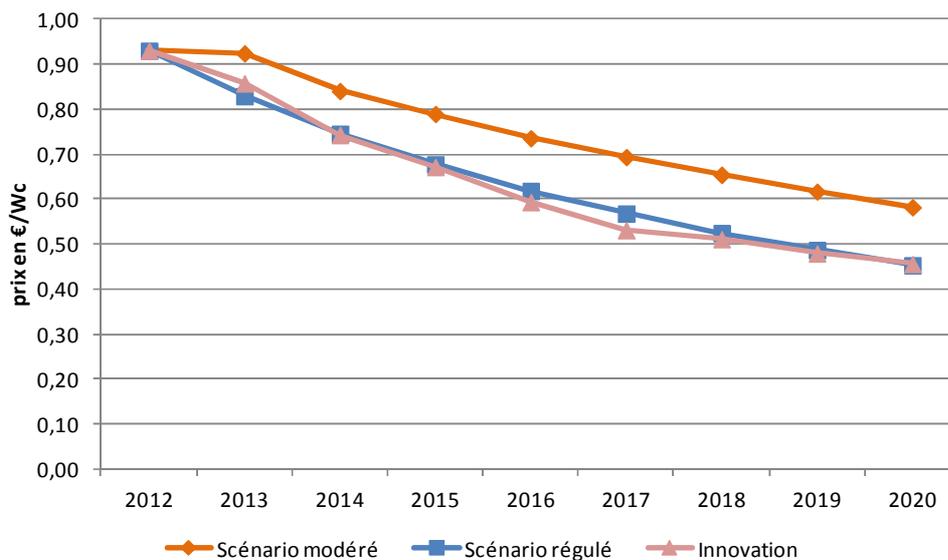
Source : In Numeri d'après données I Care Environnement

En ne tenant compte que du seul effet des innovations retenues, le coût de production d'un module avec la technologie silicium cristallin pourrait baisser de 0,45€/W, passant de 0,91€/W en 2012<sup>20</sup> à 0,46€/W en 2020. Les baisses concerneront principalement une amélioration du rendement des équipements et des matériaux solaires. Les gains sur les coûts de la main d'œuvre seront peu importants.

On notera qu'à l'horizon 2015, les seules innovations retenues dans le cadre de l'étude représentent un potentiel de baisse des coûts proche de l'écart actuel entre les prix des modules occidentaux et chinois ou coréens (-0,24€/W contre un écart de prix de 0,30€/W au premier trimestre 2012). Même si l'on supposait que l'intégralité de ces innovations ne bénéficiaient qu'aux acteurs français, cela ne leur permettrait pas d'être compétitifs sur le marché international. Cela leur permettrait en revanche d'être davantage présents sur le marché français, notamment pour les applications résidentielles.

<sup>20</sup> Le coût de production estimé en 2012 est cohérent avec le prix de vente d'un module Silicium cristallin d'origine occidentale (allemande ou japonaise) sur les marchés, néanmoins comme pour toute estimation, une marge d'erreur subsiste.

**Figure 10. Evolutions comparées des innovations et de la courbe d'expérience**



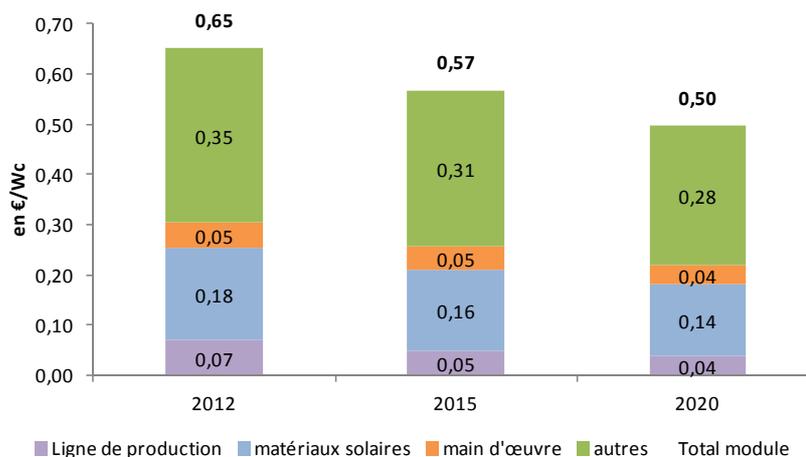
Source : In Numeri d'après données I Care Environnement et EPIA

Il est également intéressant de comparer la baisse de coût liée à l'innovation à celle que l'on peut attendre de la courbe d'expérience, qui matérialise l'effet combiné du développement des innovations, des économies d'échelles et de l'effet d'apprentissage, quand la production augmente. D'ici 2020, la baisse de prix liée à la courbe d'expérience varie entre 30c€/W et 45c€/W selon les hypothèses de croissance du marché retenues. Avec 47c€/W, le potentiel de baisse de coût représenté par les innovations est comparable aux effets de la courbe d'expérience. Même si cette situation représente un maximum réalisable en termes d'innovations, cela marque vraisemblablement la **saturation des effets d'échelle** et d'apprentissage dans les futures baisses de prix, et le rôle prépondérant que jouera l'innovation.

### b) Sur les filières de production en couches minces

L'impact des innovations retenues sur la filière des couches minces est beaucoup plus réduit que dans le cas du Silicium cristallin. Cela ne reflète pas le potentiel des baisses de coût global de ces filières mais le fait que les innovations choisies relevaient moins souvent de cette filière, reflétant les parts de marché actuelles des différentes filières. Il est probable que le potentiel de baisse de coût lié aux innovations dans ces filières soit beaucoup plus conséquent.

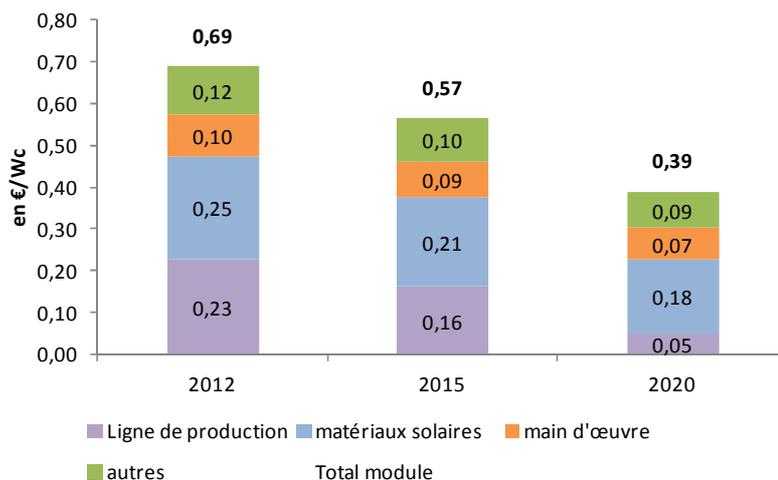
**Figure 11. Effet des innovations retenues sur la structure de coût des modules CdTe**



Source : In Numeri d'après données I Care Environnement

Pour la filière CdTe, les innovations retenues dans le cadre de l'étude représentent une baisse de coût du module de 0,15€/W entre 2012 et 2020, soit 23%.

**Figure 12. Effets des innovations retenus sur la structure de coût des modules CIGS**



**Source :** In Numeri d'après données I Care Environnement

Pour la technologie, les innovations retenues représentent une baisse de coût de 0,39€/W d'ici 2020, soit 43% du coût actuel. La baisse concerne principalement le coût des équipements, qui ne représenteraient que 0,05€/W en 2020 contre 0,23€/W actuellement.

#### IV.2.3. Potentiel de baisse de coût pour l'aval

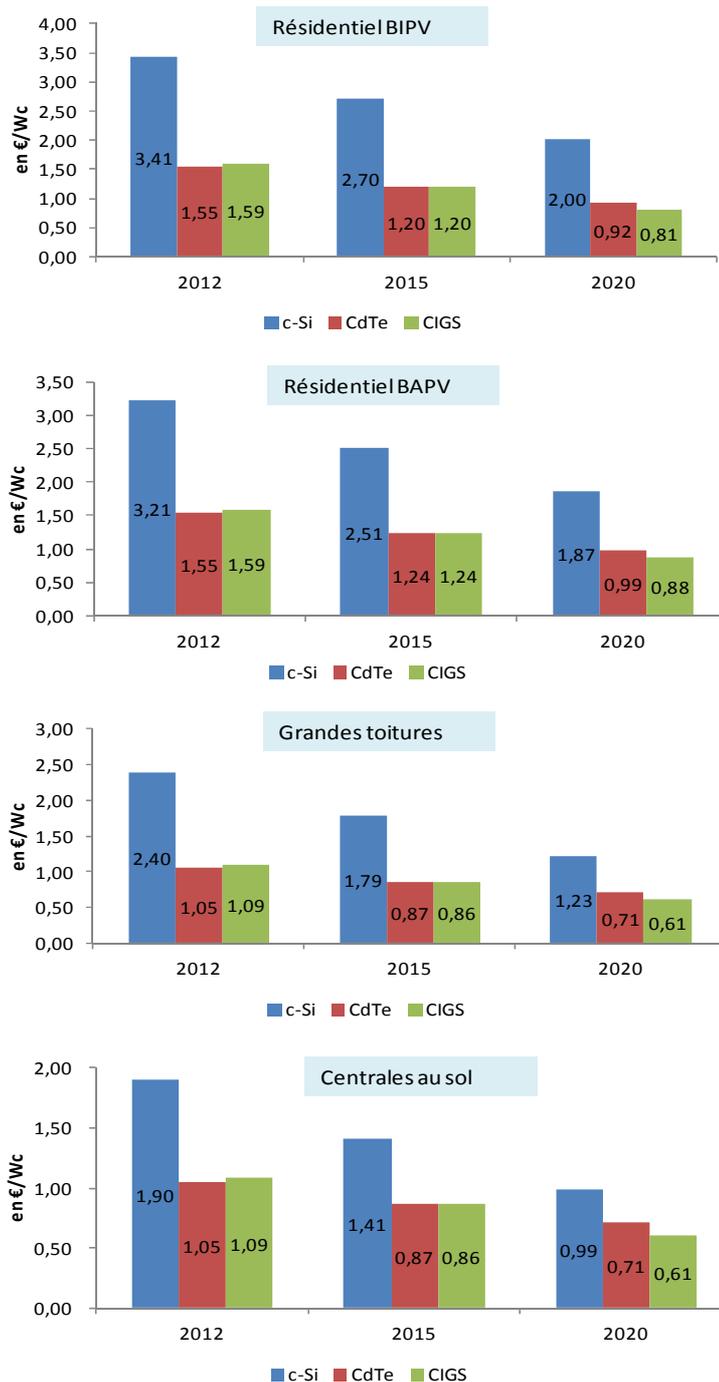
Sur l'aval de la chaîne de valeur, l'une des innovations centrales prises en compte est le développement de modules prêts à poser, quel que soit le type d'application considéré.

Pour les applications résidentielles, la réduction de coût est très importante, de l'ordre de 0,48€/W entre 2012 et 2020 pour les installations résidentielles BIPV et 0,41€/W pour les installations BAPV, faisant passer le coût de l'installation BIPV de 0,90€/W en 2012 à 0,42€/W en 2020.

Pour les grandes toitures et les centrales au sol, les coûts d'installation seront également sensiblement réduits. Pour les applications sur grandes toitures, les coûts d'installation baisseront de 45% à horizon 2020 (passage de 0,4€/W à 0,22€/W).

#### IV.2.4. Baisses de coût liées aux innovations étudiées sur l'ensemble des systèmes photovoltaïques

Figure 13. Effet consolidé des innovations retenues sur le coût total des systèmes



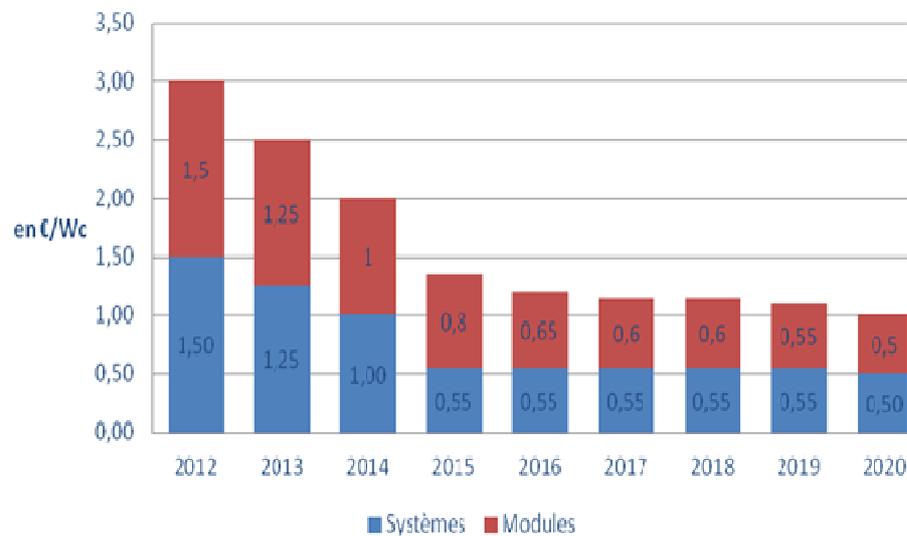
Source : In Numeri d'après données I Care Environnement

Au final, le coût total des systèmes photovoltaïques pourrait être réduit de plus de 1€/W pour les systèmes résidentiels, du seul fait des innovations, si celles-ci se réalisaient, soit une baisse des coûts de 30%. Pour les applications sur grandes toitures et la filière c-Si, la baisse de coût serait de 0,8€/W, pour les centrales au sol, de 0,7€/W. En 2020, l'écart de prix entre les différentes filières est très faible, mais cela n'est que la conséquence du fait que peu d'innovations ont été prises en considération pour les filières couches minces.

#### IV.2.5. Baisses de coûts attendues pour la filière CPV

La filière CPV étant très récente, il n'est pas possible d'obtenir une décomposition de coût aussi précise que pour les autres filières de production. Le coût de production de l'ensemble d'un système est estimé à 3€/W en 2012, et le développement des innovations devrait permettre de le réduire d'environ 0,8€/W.

L'augmentation des capacités de production devrait permettre d'atteindre un coût des systèmes autour de 1,35€/W en 2015 et 1€/W en 2020.



Source : Fabricant

### IV.3. IMPACTS SUR LE COÛT DE PRODUCTION DE L'ÉLECTRICITÉ PV (€/MWh)

Le coût de production de l'électricité est calculé de manière normalisée, selon la formule du LCoE. Ce coût est celui qui permet d'égaliser l'ensemble des recettes et des dépenses réalisées pendant la durée de vie de l'installation, dépenses et recettes actualisées à la date d'installation.

#### IV.3.1. Hypothèses utilisées

Dans ce calcul, les dépenses incluent :

- Les dépenses d'installation (CAPEX)
- Les coûts de maintenance : 0,3€/W pour les installations résidentielles et les centrales au sol (avec une baisse pour ces dernières), 0,2€/W pour les installations sur grandes toitures,
- Le remboursement de la dette, (avec endettement de 80% du coût d'investissement).

Les quantités d'électricité vendues sont calculées en tenant compte

- du niveau d'ensoleillement des régions, tiré des données du Joint Research Center,
- de la durée de vie des modules (25 ans en 2012, 30 ans en 2015 et 35 ans en 2020),
- du ratio de performance des systèmes, estimé à 80%,
- du niveau de dégradation annuelle, estimé à 0,05% (hypothèse EPIA)<sup>21</sup>.

Le taux d'actualisation est fixé à 7% pour les centrales au sol et les grandes toitures et à 5% pour les systèmes résidentiels (hypothèses de l'EPIA).

L'évolution des prix des systèmes a été déterminée en tenant compte de l'impact des innovations retenues et en supposant que les coûts d'études/commercialisation diminuaient. Selon les données du SER, l'action commerciale et les marges représentaient en 2011 de l'ordre de 38% des autres coûts des systèmes résidentiels. On fait l'hypothèse que ces coûts représenteront 25% des autres coûts en 2012 et dans les années suivantes.

<sup>21</sup> Les garanties de performance des fabricants donnent une perte de 20% sur 25 ans, contre 12% avec le taux utilisé dans l'étude. Ce taux, peut-être optimiste, est néanmoins cohérent avec d'autres études.

**Tableau 6. Hypothèse sur l'évolution du prix des systèmes c-Si**

|                                     | 2012 | 2015 | 2020 |
|-------------------------------------|------|------|------|
| Systèmes au sol                     | 1,90 | 1,43 | 1,00 |
| Systèmes professionnels             | 2,40 | 1,85 | 1,31 |
| Systèmes domestiques neuf           | 3,41 | 2,67 | 1,90 |
| Systèmes domestiques réhabilitation | 3,14 | 2,52 | 1,78 |

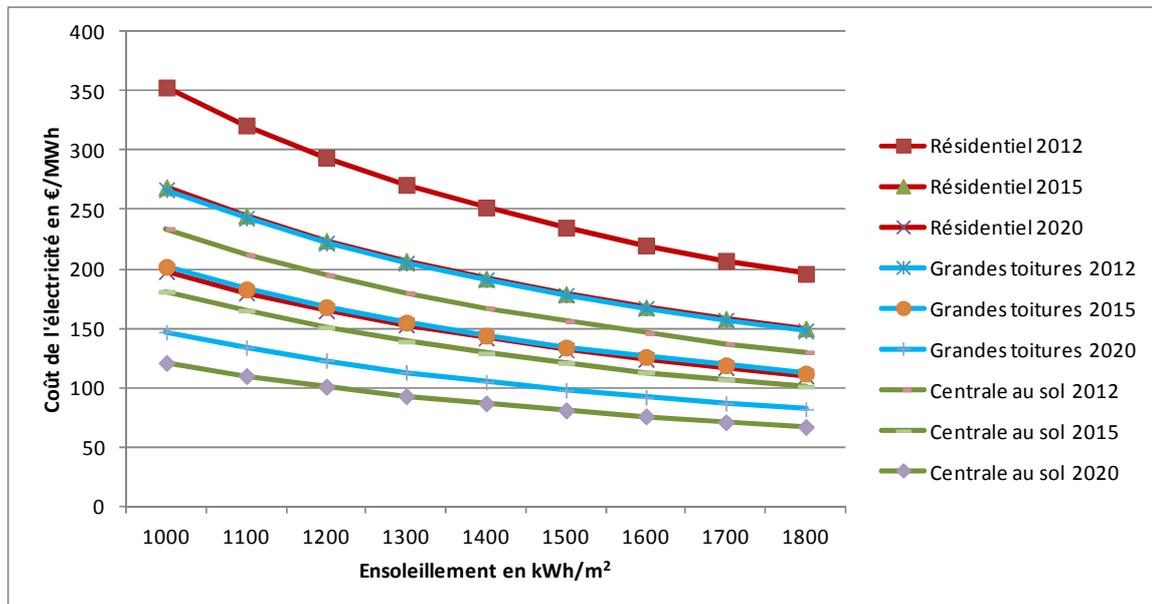
Etant donnée la prépondérance du Silicium cristallin sur le marché actuel, le LCoE de chaque application n'a été calculé que pour cette filière.

**IV.3.2. Evolution des coûts de l'électricité**

**Tableau 7. Baisse du coût de l'électricité de la filière c-Si liée à l'impact des innovations retenues selon l'ensoleillement et le type d'application, en €/MWh**

| ensoleillement<br>kWh/m <sup>2</sup> | Installations résidentielles<br>BIPV |            |            | Grandes toitures |            |            | Centrales au sol |      |            |
|--------------------------------------|--------------------------------------|------------|------------|------------------|------------|------------|------------------|------|------------|
|                                      | 2012                                 | 2015       | 2020       | 2012             | 2015       | 2020       | 2012             | 2015 | 2020       |
| 1000                                 | 353                                  | 269        | <b>198</b> | 267              | 203        | <b>149</b> | 234              | 181  | 123        |
| 1100                                 | 321                                  | 245        | <b>180</b> | 243              | 184        | <b>135</b> | 212              | 165  | 112        |
| 1200                                 | 294                                  | 224        | <b>165</b> | 222              | 169        | <b>124</b> | 195              | 151  | <b>102</b> |
| 1300                                 | 271                                  | 207        | <b>153</b> | 205              | 156        | <b>115</b> | 180              | 139  | <b>95</b>  |
| 1400                                 | 252                                  | 192        | <b>142</b> | 191              | 145        | <b>106</b> | 167              | 129  | <b>88</b>  |
| 1500                                 | 235                                  | 179        | <b>132</b> | 178              | 135        | <b>99</b>  | 156              | 121  | <b>82</b>  |
| 1600                                 | 220                                  | 168        | <b>124</b> | 167              | 127        | <b>93</b>  | 146              | 113  | <b>77</b>  |
| 1700                                 | 207                                  | 158        | <b>117</b> | 157              | <b>119</b> | <b>88</b>  | 137              | 107  | <b>72</b>  |
| 1800                                 | 196                                  | <b>150</b> | <b>110</b> | 148              | <b>113</b> | <b>83</b>  | 130              | 101  | <b>68</b>  |

**Figure 14. Variation du LCoE selon l'ensoleillement en 2012, 2015 et 2020, par type d'application**



En France, les moyennes régionales d'ensoleillement varient de 1 147 kWh/m<sup>2</sup> dans le Nord à 1 800 kWh/m<sup>2</sup> en région PACA. L'impact sur le coût de l'électricité produite est sensible. Pour les systèmes résidentiels, en 2012, ce coût passe de 353 €/MWh pour les régions à faible ensoleillement à 196 €/MWh pour les régions à fort ensoleillement (sans tenir compte du crédit d'impôt)

Les innovations retenues permettraient de diviser approximativement par deux les coûts de production de l'électricité photovoltaïque, quelles que soient les applications. En 2020, une centrale au sol pourrait produire de l'électricité à 62€/MWh.

### IV.3.3. Date d'atteinte de la parité réseau

La détermination de la date d'atteinte de la parité réseau se fait en comparant le LCoE et le prix de l'électricité. Le LCoE pour chaque type de système (centrale au sol, grandes toitures, système résidentiel) est comparé au prix de l'électricité correspondant. Trois niveaux de prix ont été retenus : le prix de détail pour les consommateurs résidentiels (heures pleines, TTC, hors abonnement), le prix pour des utilisateurs professionnels et le prix de gros fixé par le prix de la solution de remplacement en pointe (Cycle Combiné au Gaz). L'hypothèse retenue est celle d'une croissance annuelle de 5% du prix (hypothèse EPIA):

**Tableau 8. Niveaux de prix de l'électricité et évolutions envisagées d'ici 2020**

|                           | 2011 | 2012 | 2015 | 2020 |
|---------------------------|------|------|------|------|
| Prix de détail            | 129  | 136  | 157  | 200  |
| Professionnel             | 102  | 107  | 124  | 158  |
| Prix de gros (pointe) CCG | 65   | 68   | 79   | 101  |

Source : In Numeri

Les prix de l'électricité ci-dessus sont des prix « de pointe ». Pour comparer le LCoE avec le prix de l'électricité, il faudrait également tenir compte de l'adéquation entre les courbes de production par période et de la demande de pointe. Le prix de vente d'une électricité intermittente comme le photovoltaïque restera inférieur à celui des sources d'électricité « permanentes », comme les barrages et ou le cycle combiné au gaz. Il est vraisemblable que la prise en compte de cette décote retarderait la date d'atteinte de la parité.

Des systèmes de valorisation de l'électricité d'origine photovoltaïque combinant autoconsommation et ventes des excédents, ainsi que la problématique du stockage devraient également être examinés.

**Tableau 9. Date d'atteinte de la parité réseau par région et application, en conséquence de la baisse de coût potentielle liée aux innovations retenues**

|                          | Ensoleillement | Sol  | Professionnel | Résidentiel |
|--------------------------|----------------|------|---------------|-------------|
| Provence-Alpes-Côte Azur | 1 798          | 2017 | 2015          | 2016        |
| Corse                    | 1 736          | 2017 | 2015          | 2016        |
| Languedoc-Roussillon     | 1 690          | 2018 | 2016          | 2016        |
| Midi-Pyrénées            | 1 555          | 2018 | 2016          | 2017        |
| Aquitaine                | 1 498          | 2019 | 2017          | 2017        |
| Poitou-Charentes         | 1 486          | 2019 | 2017          | 2017        |
| Rhône-Alpes              | 1 472          | 2019 | 2017          | 2017        |
| Limousin                 | 1 457          | 2019 | 2017          | 2017        |
| Auvergne                 | 1 455          | 2019 | 2017          | 2017        |
| Pays de la Loire         | 1 418          | 2019 | 2017          | 2017        |
| Centre                   | 1 350          | 2020 | 2018          | 2018        |
| Bretagne                 | 1 339          | 2020 | 2018          | 2018        |
| Bourgogne                | 1 333          | 2020 | 2018          | 2018        |
| Basse-Normandie          | 1 300          | 2020 | 2018          | 2018        |
| Franche-Comté            | 1 299          | 2020 | 2018          | 2019        |
| Ile-de-France            | 1 271          | 2020 | 2018          | 2019        |
| Champagne-Ardenne        | 1 240          | 2020 | 2018          | 2019        |
| Haute-Normandie          | 1 236          | 2020 | 2018          | 2019        |
| Alsace                   | 1 218          | 2020 | 2018          | 2019        |
| Lorraine                 | 1 215          | 2020 | 2018          | 2019        |
| Picardie                 | 1 194          |      | 2019          | 2019        |
| Nord-Pas-de-Calais       | 1 147          |      | 2019          | 2019        |

Source : In Numeri

Dans l'hypothèse des baisses de prix induites par les innovations retenues, la première parité réseau sera atteinte dans le Sud de la France pour les systèmes sur grandes toitures. Toutes les régions auront atteint la parité sur ce type d'application d'ici 2019. Les systèmes résidentiels seront la seconde application à atteindre la parité réseau, toujours dans le Sud de la France dès 2016 ; toutes les régions auront atteint la parité sur cette application d'ici 2020<sup>22</sup>. Enfin, la première date de parité pour les centrales au sol sera 2017, dans une grande partie du Sud de la France. A horizon 2020, toutes les régions n'auront pas atteint la parité sur ce type d'application.

<sup>22</sup> On suppose que les installations résidentielles sont majoritairement des installations BIPV.

## V. IMPACTS DES INNOVATIONS SUR LES MARCHÉS

### V.1. SCÉNARIOS DE DÉVELOPPEMENT

#### V.1.1. Monde

Le développement des puissances installées dans le monde utilisé dans le cadre de cette étude est directement repris des scénarios élaborés par l'EPIA dans sa publication *Global outlook market until 2016* (mai 2012). Les scénarios n'étant élaborés que jusqu'en 2016, les tendances ont été prolongées jusqu'en 2020 pour les besoins de l'étude. Deux scénarios sont envisagés par l'EPIA : un scénario modéré et un scénario régulé.

Le **scénario modéré** suppose un comportement pessimiste en termes de mécanismes de soutien du marché : pas de renforcement des dispositifs de soutien voire réduction de ces dispositifs. Dans les pays proches de la transition, les consommateurs réagissent mal au développement d'un marché sans tarif d'achat. Les installations se feraient au rythme de 32 GW/an en 2015 et 75 GW/an en 2020.

Le **scénario régulé** quant à lui suppose la continuation ou l'introduction de mécanismes de soutien adéquats. Il suppose également l'abolition des barrières administratives superflues et la rationalisation des procédures de raccordement. Les installations se feraient au rythme de 62 GW/an en 2015 et 148 GW/an en 2020.

#### V.1.2. France

Un scénario de développement du marché français a été construit pour les besoins de l'étude. Ce scénario repose sur une étude de la parité réseau à partir du LCoE.

##### a) Hypothèses utilisées

Deux périodes ont été considérées. La première est totalement régulée et régie par la réglementation en vigueur (appels d'offres annuels et tarifs d'achat), avec un objectif de 500MW installés par an. Cette première période est sensée prendre fin lorsque l'électricité photovoltaïque deviendra compétitive.

La seconde période pourrait démarrer en 2016 et permettrait de mettre fin aux mécanismes publics de soutien au développement du PV. Le niveau du marché annuel dépend alors du rythme auquel la parité réseau est atteinte dans les différentes régions et pour les différentes applications.

Le potentiel de marché est estimé sous les hypothèses suivantes :

- **Centrales au sol** : on part des superficies de landes ; on considère que 2% peuvent être utilisées pour le PV et qu'elles seront équipées à raison de 5% par an dès lors que le LCoE devient inférieur au prix de gros en pointe.
- **Professionnel** : on part des superficies de locaux non résidentiels construits chaque année, on prend 70% de la somme (bâtiments agricoles + entrepôts + 20% des autres bâtiments), dès lors que le LCoE devient inférieur au prix de l'électricité pour les professionnels. Pour les bâtiments existants, on utilise les superficies couvertes de bâtiments « bas » (classification TERUTI), estimées en 2010 à 760 000 hectares, desquels on soustrait les maisons individuelles (180 000 hectares). On suppose que 5% de la surface restante peut être équipée, à un rythme annuel de 5%.
- **Résidentiel** : on prend 30 m<sup>2</sup> pour chaque logement individuel construit chaque année et 50 m<sup>2</sup> de 20% des logements collectifs construits chaque année (hypothèses 5 étages en moyenne), dès lors que le LCoE devient inférieur au prix de détail de l'électricité pour les particuliers. Pour les bâtiments existants, on utilise les réfections de toitures, estimées en 2010 à 254 000 (OPEN 2012).

##### b) Résultats

A partir du moment où la parité réseau est atteinte, le potentiel de marché par application est le suivant :

**Tableau 10. Potentiel de marché français à partir de 2015 (MW)**

|                   | 2015 | 2016 | 2017  | 2018  | 2019  | 2020  |
|-------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| sol professionnel | 81   | 234  | 662   | 1 230 | 1 354 | 1 354 |
| résidentiel       |      | 119  | 462   | 600   | 828   | 828   |
| total             | 81   | 353  | 1 875 | 3 339 | 3 690 | 4 014 |

Source : In Numeri

Les Etats généraux du solaire et le SER ont fixé un objectif de 20 GW en 2020. Le tableau ci-dessous compare les résultats obtenus à partir de la parité par région et deux cheminements permettant d'aboutir à cet objectif. On considère que jusqu'en 2015 les installations suivront le rythme suggéré par la réglementation actuelle (500 MW par an).

L'approche proposée conduit à un niveau et une évolution des installations annuelles légèrement inférieures à ce qui serait nécessaire pour aboutir à l'objectif de 20 GW.

**Tableau 11. Comparaison de l'approche par la parité et des scénarios EGS-PV et SER (en GW)**

| en GW | Cheminement exponentiel |      | Cheminement linéaire    |      | Approche par la parité  |      |
|-------|-------------------------|------|-------------------------|------|-------------------------|------|
|       | Installations annuelles | Parc | Installations annuelles | Parc | Installations annuelles | Parc |
| 2011  |                         | 2,7  |                         | 2,7  |                         | 2,7  |
| 2012  | 1                       | 3,7  | 1                       | 3,7  |                         | 2,7  |
| 2013  | 0,5                     | 4,2  | 0,5                     | 4,2  |                         | 2,7  |
| 2014  | 0,5                     | 4,7  | 0,5                     | 4,7  |                         | 2,7  |
| 2015  | 0,5                     | 5,2  | 0,5                     | 5,2  | 0,1                     | 2,8  |
| 2016  | 0,8                     | 6,0  | 1,3                     | 6,5  | 0,4                     | 3,1  |
| 2017  | 1,4                     | 7,4  | 2,1                     | 8,7  | 1,9                     | 5,0  |
| 2018  | 2,3                     | 9,7  | 3,0                     | 11,6 | 3,3                     | 8,3  |
| 2019  | 3,9                     | 13,6 | 3,8                     | 15,4 | 3,7                     | 12,0 |
| 2020  | 6,4                     | 20,0 | 4,6                     | 20,0 | 4,0                     | 16,1 |

Source : In Numeri

## V.2. IMPACTS DES INNOVATIONS SUR CHAQUE MARCHÉ

L'impact des innovations a été analysé pour chaque segment de la chaîne de valeur. Etant donné le poids actuel de la filière c-Si au niveau mondial (environ 90% du marché), et l'attention plus particulière portée aux innovations sur cette filière, les conclusions présentées s'appliquent surtout à ce secteur.

Actuellement, la France est très peu présente sur certains segments du marché en amont de la fabrication de cellules. La création d'une industrie spécialisée dans ces productions paraît peu vraisemblable, même en s'appuyant sur des innovations performantes. Le scénario le plus plausible pour que les innovations dans ces domaines bénéficient aux entreprises françaises est le développement d'une filière intégrée, soit par le biais du développement d'acteurs existants, fabricants de modules, voire installateurs avec des stratégies de remontées de filières pour maîtriser les coûts et approvisionnements, soit par le biais de la création de partenariats.

Pour chaque marché, deux types d'impacts ont été identifiés : l'un s'appuyant sur le développement du marché actuel avec éventuellement des prises de part de marché du fait des innovations, l'autre supposant l'existence d'une filière intégrée.

### V.2.1. Les équipements de production

Les équipementiers bénéficient d'un positionnement très favorable sur quatre des innovations recensées pour la filière c-Si : l'augmentation de la capacité des fours de cristallisation, l'utilisation de creusets au revêtement innovant, l'utilisation de thermoplastiques innovants, et la réduction de l'épaisseur des plaquettes et l'utilisation de fil diamanté pour le sciage. La baisse moyenne de coût de ces innovations représente environ 10% du coût de production d'un module c-Si en 2012. Toutes ces innovations sont en outre en phase d'industrialisation ou de mise en œuvre : les équipementiers français bénéficient d'un

avantage par rapport à leurs concurrents, qui peut se traduire par une meilleure visibilité à l'international, et le gain de marchés comme cela a été le cas fin 2011.

Actuellement, la production des entreprises françaises représente environ 2% du marché mondial. On peut faire l'hypothèse que les entreprises françaises augmentent leur part de marché ; si cette part se montait à 5%, les exportations seraient portées à 3 Mds€, le simple maintien se traduisant par des exportations sur le marché mondial de 1 Mds€.

Cependant, le marché intérieur ne doit pas être totalement négligé car certains équipementiers sont impliqués dans les projets de fabrication de Silicium en France, comme PV20. En outre, le faible coût de l'électricité en France peut attirer les fabricants de Silicium sur le territoire.

### V.2.2. Les fabricants de matériaux solaires

Les innovations recensées dans l'étude conduisent à réduire l'utilisation des matériaux solaires, même si les matériaux utilisés sont de meilleure qualité. Le marché des matériaux solaires s'élèvera en 2020 à 143 000 €/MW installé contre 356 000 €/MW en 2011.

Le marché mondial des matériaux solaires est estimé à 10,5 Md€ en 2011. Pour la même année, la production française est de l'ordre de 133M€ pour 400 emplois directs. Compte tenu de la quasi-absence de débouchés en France pour les matériaux solaires, on peut supposer que la totalité de cette production est exportée.

Si certaines innovations portent sur l'utilisation des matériaux solaires, aucune ne semble en mesure d'avantager spécifiquement les acteurs français. L'impact des innovations se ferait donc essentiellement par le développement des marchés. Avec le scénario régulé de l'EPIA, on pourrait envisager une multiplication par 2,5 des effectifs, et gagner 1 200 emplois sur cette activité essentiellement destinée à l'exportation.

Si une filière intégrée française se développait à hauteur de 1 GW, pour une valeur totale de la production de modules de 460 millions d'euros (0,46 €/W en silicium cristallin) **le marché des matériaux solaires correspondant représenterait** 170 millions d'euros à l'horizon 2020 (0,17 €/W de matériaux solaires en 2020 sur la filière silicium).

### V.2.3. Les lingots et wafers

Les équipementiers sont positionnés assez fortement sur deux innovations : l'augmentation de la taille des fours de cristallisation, et le développement de creusets au revêtement innovant. Ils travaillent également, parmi d'autres acteurs, à l'utilisation de fil diamanté pour le sciage des wafers. Les baisses de coût envisagées pour les innovations sur lesquelles travaillent les équipementiers français sont relativement importantes : 75% du coût en 2012 de l'étape de cristallisation pour les fours, 21% du coût en 2012 de la purification pour les creusets, et 40% du coût en 2012 du sciage pour le fil diamanté.

Même si pour l'instant la capacité de production de lingots et wafers est peu développée en France, le positionnement des équipementiers sur des innovations à fort contenu en baisse de coût de production peut servir de socle pour le développement de l'activité. Cela peut être l'un des éléments qui permette de développer une filière intégrée française, et de créer ou solidifier les liens entre les acteurs des différents segments de la chaîne de valeur : équipementiers, fabricants de lingots, de cellules, de modules etc ...

En utilisant une approche quantités-prix, la valeur du marché mondial des lingots est estimée pour 2012 entre 4,4 Mds€ et 8,7 Mds€ (216 000€/MW installé). Suivant le scénario régulé de l'EPIA et en tenant compte des baisses de coûts liées aux innovations, cette valeur pourrait monter à 17 Mds€ en 2020. Pour les wafers, le marché mondial pourrait passer de 6,5 à 13 Mds€ en 2012, à 27 Mds€ en 2020.

Il est illusoire toutefois de prévoir une évolution de la production française de lingots et wafers, deux entreprises seulement exerçant cette activité à l'heure actuelle, Emix et Photowatt International. Le développement de cette industrie est conditionné par la mise en place d'une filière intégrée, qui permettrait d'assurer des débouchés pour l'ensemble des étapes de production. Pour le cas particulier des lingots et wafers, la présence limitée de cette activité sur le territoire français s'explique par l'absence de débouchés aval (cellules et modules). Si l'on suppose une filière intégrée produisant 1GW, la production lingots pourrait être estimée à 110M€ et celle de wafers à 180M€.

#### V.2.4. Les cellules

Cinq des innovations recensées sur l'amont de la filière silicium cristallin et prises en compte dans la modélisation de baisse des coûts ont lieu directement à l'étape de fabrication des cellules. Les acteurs français ne sont pas en position de leader sur ces innovations, mais ils travaillent dessus parmi d'autres acteurs. Pour tirer avantage de l'innovation et gagner en part de marché, il faudrait qu'ils soient les premiers à développer l'innovation en question.

Le marché mondial des cellules se situera en 2012 aux alentours de 25 Mds€ (scénario régulé de l'EPIA), soit 618 k€/MW installé. Compte tenu des baisses de coût liées aux innovations retenues, le marché se montera à 48Md€ (soit 320k€/MW installé) en 2020, toujours selon le scénario de développement régulé.

Fin 2012, la production de cellules est négligeable en France, les fabricants de modules préférant importer les cellules plutôt que les fabriquer. Ce faible niveau d'activité à l'heure actuelle ne permet pas d'envisager un développement avec un objectif de compétitivité et de gains de marché orientés sur le marché mondial.

Les innovations retenues sur l'étape de fabrication de la cellule représentent une baisse de coûts de 17c€/W en 2020. A elle seule, cette baisse de coût ne permet pas de compenser les écarts de prix avec la concurrence asiatique. Le développement de la fabrication de cellules n'est envisageable que dans le cadre d'une filière intégrée, à destination du marché national, permettant des synergies entre les différents métiers.

#### V.2.5. Les modules

Les modules étant l'élément central de tout système photovoltaïque, les fabricants seront concernés par une grande partie des innovations utilisées dans la modélisation de la baisse des coûts, qu'elles se situent sur l'amont ou sur l'aval de la chaîne de valeur. L'analyse de l'impact des innovations sur l'activité des fabricants de modules doit également tenir compte du contexte actuel sur ce marché (baisse artificielle des prix, surcapacités de production).

Les innovations situées sur l'amont de la chaîne de valeur ont toutes pour objectif final de réduire le coût de production du module. Elles sont la plupart du temps développées par des équipementiers et concernent peu les fabricants français. Leurs capacités de production étant vraisemblablement sous-utilisées à hauteur de 30%, les équipements de production ne sont pas encore arrivés au stade du renouvellement. Ils ne peuvent bénéficier des innovations développées par les équipementiers qu'aux prix d'investissements importants.

La réalisation des innovations sur l'amont de la chaîne de valeur réduira la part des modules dans le coût total d'un système photovoltaïque, quelle que soit la filière de production ou le type d'application considéré. Pour la filière Silicium cristallin, le module représente 37% du coût moyen d'un système photovoltaïque, toutes applications confondues, en 2012. Cette part devrait passer à 35% en 2015 et 32% en 2012, soit des baisses respectives de 5 et 14%. Pour la filière CIGS, le constat est le même : la part du module dans le coût total d'un système toutes applications confondues baissera de 4% entre 2012 et 2015 et 15% entre 2012 et 2020.

Certaines des innovations développées sur l'aval de la chaîne de valeur vont avoir un impact direct sur la production des fabricants de modules, comme le développement de modules prêts à poser. L'effet se manifestera par l'apparition de nouveaux produits sur le marché et l'augmentation de l'activité des fabricants. Le développement de ces innovations n'est encore qu'au stade de la recherche, leur réalisation et l'impact qu'elles auront sur la production de modules photovoltaïques prendra donc encore quelques années à se concrétiser.

L'activité française de fabrication de modules, à l'origine destinée à l'exportation, s'est retournée depuis 2008-2009 vers le marché intérieur. Les opérateurs les plus récents ont également vocation à travailler sur le marché européen.

La production française de modules est évaluée à environ 500 millions d'euros pour 2012, pour 1500 emplois (soit environ 500 000€/MW installé avec un marché 2012 à 1GW). En 2020, compte tenu des baisses de coût potentielles sur les modules, la valeur du marché français sera de 1,8 Md d'euros pour 4GW installés. En supposant que les fabricants français de modules maintiennent leur part de marché à environ 30% du marché français, et qu'ils parviennent à bénéficier des baisses de prix des cellules

achetées ou des équipements innovants, leur production pourrait se monter à 500M€ en 2020, pour 2500 emplois.

Notons cependant que, si le parc installé en France n'est que de 500 MW par an jusqu'en 2016, les fabricants français de modules ne pourront pas se contenter du marché intérieur.

### V.2.6. Le BOS

Au niveau mondial, le développement des puissances installées prévu dans le scénario régulé de l'EPIA fera passer la valeur de marché des onduleurs à 14 Mds€ en 2015 et 34 milliards en 2020.

Les entreprises françaises fabricantes d'onduleurs ne sont pas à l'origine du développement des innovations retenues dans l'étude. Leurs débouchés étant essentiellement nationaux, l'impact des innovations sur le développement de leur activité sera lié au développement du parc installé en France.

La production des onduleurs représente environ 58 millions d'euros en 2011, pour une valeur de marché de l'ensemble du BOS électrique de 682 millions d'euros (soit 8,5% du marché). Le SER ne donne pas d'estimation des emplois spécialement dédiés à la fabrication d'onduleurs, mais estime à 537 les emplois consacrés à la fabrication de matériel électrique en 2010, dont 200 pourraient concerner la fabrication d'onduleurs.

Si le parc installé annuellement en 2020 s'élève à 4 GW, la valeur de marché de l'ensemble du matériel électrique s'établirait aux alentours de 1,3 Mds€. Les onduleurs représenteront, grâce au développement des innovations, 26% de l'ensemble du matériel électrique. Si l'on suppose le ratio entre la production et le marché intérieur constant, la production française d'onduleurs en 2020 s'établirait à 100 millions d'euros. L'emploi suivrait une tendance similaire, soit environ 600 emplois.

### V.2.7. L'installation

Les innovations développées sur l'aval de la chaîne de valeur auront pour effet principal de réduire considérablement le poids de l'installation. Toutefois, cette activité devrait rester le principal vivier d'emplois de la filière photovoltaïque.

Le niveau d'emploi dans l'installation dépend du type d'application vers laquelle se tourne le marché. Les ratios emploi/MW installé estimés pour chaque application sont les suivants : 28 emplois/MW pour les systèmes résidentiels, 18 emplois/MW pour les systèmes sur grandes toitures et 8 emplois/MW en 2011 pour les centrales au sol. En 2011, les centrales représentaient 5 500 emplois, les systèmes sur grandes toitures 9 600 et les installations résidentielles 7 400 emplois.

Compte tenu des baisses de coût des installations, qui porteront en partie sur les emplois, en 2020, pour 4GW installés annuellement, les installations représenteraient 8 000 emplois pour les centrales au sol (soit 50 000€/emploi), 13 000 emplois pour les grandes toitures (soit 18 500€/emploi) et 11 000 emplois pour les systèmes résidentiels (soit 32 000€/emploi). La valeur du marché des installations se monterait à 1 milliard d'euros, soit 250 millions d'euros par MW installé.

### V.2.8. La filière CPV

En attendant la phase de commercialisation, la filière est pour l'heure en phase de démonstration, et une partie des installations se fait en France, dans les régions à fort ensoleillement<sup>23</sup> : les centrales CPV retenues dans le dernier appel d'offre de la CRE sont situées en région PACA ou Languedoc-Roussillon.

Les prévisions de puissances installées et d'emplois présentées ci-dessous ont été élaborées par des professionnels .

**Tableau 12. Prévisions de développement pour le CPV à horizon 2015**

|                                   | 2013     | 2014      | 2015       |
|-----------------------------------|----------|-----------|------------|
| <b>puissances installées (MW)</b> | <b>8</b> | <b>50</b> | <b>200</b> |

<sup>23</sup> Certaines installations de démonstration de fabricants français sont également situées à l'étranger (Afrique du Sud notamment)

|                          |           |            |            |
|--------------------------|-----------|------------|------------|
| <b>emploi total</b>      | <b>97</b> | <b>293</b> | <b>812</b> |
| dont recherche           | 15        | 10         | 10         |
| dont conception, études  | 25        | 56         | 91         |
| dont production          | 45        | 200        | 663        |
| dont technico commercial | 11        | 25         | 46         |
| dont administratif       | 1         | 2          | 2          |

|                               |             |             |             |
|-------------------------------|-------------|-------------|-------------|
|                               | <b>2013</b> | <b>2014</b> | <b>2015</b> |
| <b>Ratio emploi/puissance</b> | <b>12</b>   | <b>5</b>    | <b>4</b>    |
| dont recherche                | 2           | 0,2         | 0,1         |
| dont conception, études       | 3           | 1           | 0,5         |
| dont production               | 6           | 4           | 3           |
| dont technico commercial      | 1           | 0,5         | 0,2         |
| dont administratif            | 0,1         | 0,04        | 0,01        |

Source : I Care

L'entreprise mise donc sur un développement extrêmement rapide des puissances installées : en moins de 2 ans, les capacités de production seraient multipliées par 25, l'emploi par quasiment 9. En utilisant la décomposition du coût des systèmes présentée au point IV.2.5, les productions correspondantes seraient de 24 millions d'euros en 2013, 125 millions en 2014 et 400 millions en 2015. Le développement de la filière entraînera également un glissement des emplois vers les activités de production, d'action commerciale et d'études.

Etant donnée la date à laquelle le CPV atteindra la parité réseau, en 2019 dans le meilleur des cas, le développement de la filière et des installations en France se fera essentiellement au travers des appels d'offres. Les hypothèses de prévisions des puissances installées présentées ci-dessus semblent dans ce cas très optimistes : dans le dernier appel d'offre de la CRE sur les installations de plus de 250kW, le CPV représente au total 59GW de projets, sur les 520MW de projets retenus au total (soit 11% du total).

Comme le potentiel de marché se situe davantage dans les pays de la Sunbelt, il est possible que le LCoE d'une centrale CPV sur son marché de destination baisse plus rapidement que pour le marché français, en raison du meilleur ensoleillement, qui permet une production du système plus importante. Cela signifierait alors que la plus grande partie des puissances installées ne seraient pas situées en France.

Enfin, sur le marché français, durant la phase de développement, les centrales CPV peuvent modifier la composition du parc des centrales au sol. Les prévisions de développement des installations françaises n'ont pas pris cet effet en compte.

### V.3. CONCLUSION

Les innovations, par le potentiel de baisse de coût qu'elles présentent, seront un facteur de différenciation stratégique important. Pour la filière du silicium cristallin, le cumul des baisses de coût liées aux innovations est en effet équivalent à ce que l'on peut attendre de la courbe d'expérience.

Le potentiel de réduction de coût lié au développement des innovations pour les filières de production en couches minces, est également non négligeable, le cumul des innovations recensées permettant une baisse de 43% par rapport au coût actuel. Enfin, pour la filière de production en CPV, qui aborde seulement sa phase de développement industriel, le coût des systèmes devrait être divisé par 3 d'ici 2020. Le rôle de l'innovation est plus difficilement séparable de celui des effets d'échelle.

Ces baisses de coût permettent d'envisager une production d'électricité photovoltaïque sans politique de soutien dès 2016-2018, selon les régions et les applications considérées. Le marché annuel pourrait être de l'ordre de 4 GW en 2020.

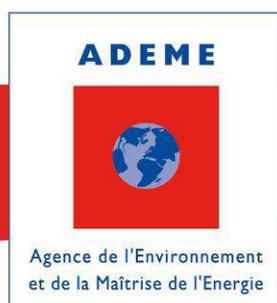
Dans la chaîne de valeur du photovoltaïque, les acteurs les plus susceptibles de profiter du développement des innovations sont les équipementiers. Leurs débouchés se situent pour l'instant essentiellement à l'exportation, mais le marché intérieur n'est pas à négliger.

Le potentiel d'emploi le plus important dans la filière photovoltaïque se situe sur le segment de l'installation : d'environ 10 000 emplois en 2012, les effectifs de la filière pourraient atteindre 30 000 en 2020 en supposant que les coûts du photovoltaïque continuent à intégrer les progrès des innovations.

## L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) est un établissement public sous la triple tutelle du ministère de l'Ecologie, du Développement durable, des Transports et du Logement, du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche et du ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie. Elle participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable.

Afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale, l'agence met à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, ses capacités d'expertise et de conseil. Elle aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

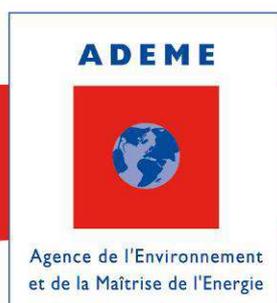


## ABOUT ADEME

The French Environment and Energy Management Agency (ADEME) is a public agency under the joint authority of the Ministry for Ecology, Sustainable Development, Transport and Housing, the Ministry for Higher Education and Research, and the Ministry for Economy, Finance and Industry. The agency is active in the implementation of public policy in the areas of the environment, energy and sustainable development.

ADEME provides expertise and advisory services to businesses, local authorities and communities, government bodies and the public at large, to enable them to establish and consolidate their environmental action. As part of this work the agency helps finance projects, from research to implementation, in the areas of waste management, soil conservation, energy efficiency and renewable energy, air quality and noise abatement.

[www.ademe.fr](http://www.ademe.fr).



ADEME  
20, avenue du Grésillé  
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

[www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)