

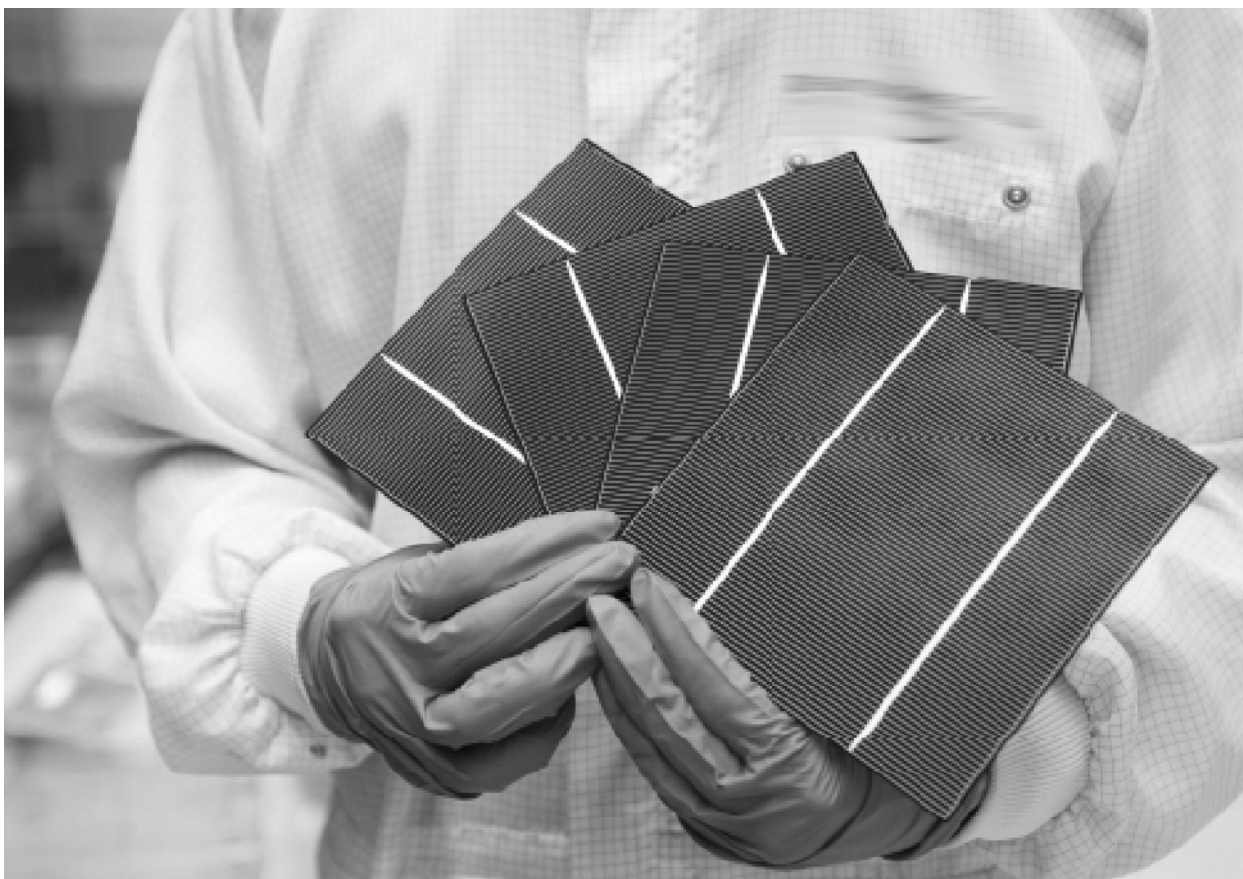
Allemagne : un développement fulgurant de l'industrie solaire, que soutiennent des efforts significatifs en matière de recherche

Le développement de l'industrie solaire en Allemagne depuis moins d'une dizaine d'années a donné tort à ses détracteurs, qui disaient cette énergie trop chère et le pays peu adapté et d'un climat trop froid pour être en mesure d'en exploiter le potentiel. Ce développement, comme celui des énergies renouvelables dans leur ensemble, est dû au soutien du Gouvernement fédéral et des *Länder*, tant sur le plan des moyens investis en R&D que de la mise en place de conditions-cadres permettant l'essor de la filière industrielle. Celle-ci se voit toutefois malmenée par la crise économique, ainsi que par l'émergence de nouveaux concurrents asiatiques. La tendance est cependant bien ancrée, et c'est désormais vers l'Afrique du Nord que se tournent les intérêts des industriels allemands, ainsi que l'a démontré le lancement, très médiatisé, du plan DESERTEC, le 13 juillet 2009, à Munich.

par **Jean-François DUPUIS***, **Claire VAILLE** et **Nicolas CLUZEL****

* Conseiller pour la Science et la Technologie à l'Ambassade de France en Allemagne.

** Chargés de mission au Service scientifique de l'Ambassade de France en Allemagne.



© Bernhard Classen/SIPA

Cellules photovoltaïques.

PRÉSENTATION DU PAYSAGE ALLEMAND DE L'INDUSTRIE SOLAIRE

Le photovoltaïque : un secteur en pleine croissance malmené par la crise économique

L'industrie photovoltaïque (PV) allemande a été jusqu'à l'année dernière en pleine croissance. Le marché a particulièrement crû depuis 2000, le chiffre d'affaires ayant été multiplié par 35 en 8 ans. Avec 25 % de part de marché, l'Allemagne est aujourd'hui le premier acteur du marché mondial du PV (en termes de puissance installée), devant le Japon. La moitié environ du chiffre d'affaires (53 %), soit 6,51 milliards d'euros en 2007, est réalisée à l'export.

Les 75 entreprises de production installées en Allemagne, dont plusieurs d'entre elles sont d'envergure internationale (parmi lesquelles Q-Cells et Solarworld), employaient en 2008, avec leurs sous-traitants, environ 48 000 personnes. C'est dans les *Länder* de l'ex-Allemagne de l'Est qu'environ 60 % des emplois industriels ont été créés dans ce secteur. La branche PV allemande est ainsi aujourd'hui un puissant moteur économique qui génère de nombreux emplois.

Les panneaux solaires plans installés sur les toits dominent largement le marché allemand des systèmes PV : ils représentent 89 % du marché, contre 10 % pour les fermes solaires et seulement 1 % pour les panneaux intégrés au bâti.

Les capacités de production d'énergie PV installées en Allemagne atteignaient, en 2008, 5 300 mégawatts-crête (MWc), pour une énergie produite de 4 300 GWh (soit 0,4 Mtep). En 2007, l'énergie PV produite en Allemagne représentait 4 % de la consommation d'électricité produite à partir d'énergies renouvelables, soit 0,6 % de la consommation d'électricité totale.

Les cellules PV les plus répandues dans la production industrielle sont constituées de semi-conducteurs, principalement à base de silicium.

Néanmoins, la demande en silicium excède actuellement l'offre, ce qui contribue au développement de technologies alternatives.

Dans le domaine de la recherche, les efforts actuels se concentrent sur le rendement des cellules photovoltaïques, ainsi que sur l'étude de nouveaux matériaux. Grâce à l'optimisation des produits et à la collaboration exemplaire entre la recherche, les fabricants et les artisans, la branche a atteint une qualité qui définit des normes au niveau international.

Les recherches actuellement menées sur la prochaine génération de cellules PV poursuivent essentiellement deux buts : l'amélioration du rapport prix/performance (réduction des coûts) et l'amélioration de l'efficacité des matériaux (hausse du rendement).

De nouvelles technologies photovoltaïques à couches minces (PVCm), qui semblent recueillir les suffrages de l'industrie, sont actuellement expérimentées en complément des technologies traditionnelles à base de silicium. Même si leur rendement est plus faible, elles utilisent un volume de matériau moins important pour une production d'électricité équivalente, et elles recèlent ainsi un potentiel de développement exploitable, notamment en ce qui concerne les cellules à couche mince au silicium et les semi-conducteurs CIGS (1). Les industriels estiment que les couches minces pourraient représenter de 20 à 30 % du marché mondial futur.

Le solaire thermique à concentration CSP (2) : au seuil de la commercialisation

Dans le domaine du solaire thermique à concentration (CSP), aussi appelé solaire thermique à haute température (HT), les entreprises et les instituts allemands occupent une position de leader à l'échelle internationale. Le soutien à la recherche apporté par le ministère fédéral de l'environnement (BMU) contribue au maintien et à la consolidation de cette avance technologique. A moyen terme, les centrales CSP devraient devenir compétitives avec les centrales thermiques conventionnelles dans les zones fortement ensoleillées.

Les entreprises allemandes produisent tous les composants essentiels nécessaires à la production d'électricité héliothermique et elles fournissent des prestations d'ingénierie pour la conception, la construction et l'exploitation de centrales thermiques solaires ; elles ont notamment acquis une expérience notable dans la technologie des concentrateurs cylindro-paraboliques, grâce à des projets dirigés par l'Allemagne (ou dans lesquels elle s'est impliquée), en particulier dans le Sud-ouest des Etats-Unis, en Afrique du Nord et en Espagne. Actuellement, différentes méthodes de stockage de chaleur sont testées outre-Rhin, ainsi que des méthodes efficaces de combinaison avec des centrales thermiques conventionnelles. Une tour solaire expérimentale a été construite à Jülich (au Sud-ouest de Düsseldorf), dont le récepteur solaire a été développé et breveté par le Centre de recherche aérospatiale allemand (DLR). La tour a été mise en phase d'essai pour une durée de six mois en janvier 2009, sa mise en service régulier est intervenue en août de cette année (elle sera suivie de deux ans de fonctionnement expérimental). A l'issue du projet, cette tour continuera à être exploitée pour la production d'électricité solaire. Au total, 1 000 MWh devraient être ainsi produits et injectés dans le réseau électrique, chaque année.

L'héliothermie à basse température : une croissance durable

Sur une surface exploitable totale de 2 300 km², environ 9,6 km² de surfaces collectrices étaient installés sur des toits allemands en 2007, ce qui représente une capacité globale du solaire thermique à basse température (BT) de 6 698 MW. L'énergie finale produite atteint 3,7 TWh. Elle a permis d'éviter l'émission de 857 000 tonnes de CO₂.

Le Gouvernement fédéral allemand encourage l'extension des surfaces de collecteurs par des mesures de soutien, qui ont généré un doublement de la surface totale installée au cours des cinq dernières années.

Le développement fulgurant des dernières années a assuré une croissance durable du chiffre d'affaires de la branche en Allemagne, qui a atteint 740 M€ en 2007. La réduction de moitié des frais de fabrication d'une installation héliothermique au cours des dix dernières années, accompagnée d'une énorme augmentation du degré d'efficacité, a également concouru au développement de la branche.

L'héliothermie trouve une large application dans les foyers privés, l'industrie et les bâtiments publics. Les collecteurs sont notamment utilisés dans les foyers privés, où ils constituent une composante fixe des installations de chauffage. Les collecteurs à tube vide peuvent représenter une solution alternative aux collecteurs usuels, grâce à un degré d'efficacité supérieur, associé à un poids réduit. Les solutions systèmes pour les installations solaires offrent une grande variété de choix allant du réchauffement de l'eau industrielle à la climatisation solaire, en passant par le chauffage de locaux. Les produits en verre et les couches d'absorbants déposés sur des tubes à vide sont deux exemples des produits qui ont porté l'industrie allemande aux premiers rangs mondiaux en matière d'héliothermie.

L'exploitation des espaces libres devrait entraîner une poursuite du développement technique des produits héliothermiques, notamment grâce à la combinaison de collecteurs et de réservoirs de chaleur : il est ainsi possible d'obtenir de grandes quantités de chaleur et de réaliser la liaison avec les bâtiments au moyen d'un réseau de chaleur de proximité.

UN CADRE POLITIQUE FAVORABLE

La loi de soutien aux énergies renouvelables EEG

Le développement très rapide des technologies PV en Allemagne est le fait d'une politique industrielle volontariste qui s'appuie sur un système de soutien simple et

(1) CIGS : couche mince poly-cristalline : cuivre, indium, gallium et sélénium.

(2) CSP : *Concentrating Solar Power*.

précurseur, dans le cadre de la loi EEG (3), qui, adoptée en 2000, a été revue en 2004, puis en 2008.

Celle-ci impose à l'opérateur de réseau le rachat obligatoire, à un tarif fixé et sur une durée de 20 ans, de l'électricité produite à partir de sources d'énergie renouvelables (EnR), dont le photovoltaïque. Les subventions accordées dans le cadre de l'EEG prennent en compte le montage, l'intégration en façade et l'installation sur des surfaces libres. La loi offre, en outre, des garanties en termes de planification, qui permettent des investissements se chiffrant en milliards d'euros.

Le tarif d'achat de l'électricité produite dépend de l'année de mise en fonction de l'installation, afin de tenir compte du progrès technologique et de la situation du marché. Ces tarifs sont réévalués tous les quatre ans.

Le tarif d'achat, en induisant un surcoût pour l'ensemble des consommateurs d'électricité, rentabilise l'installation de panneaux solaires. Pour l'ensemble des EnR, le surcoût total atteint 4,3 milliards d'euros par an, soit un centime d'euro par kWh. Hormis des prêts à taux réduits accordés par la Banque publique allemande pour la reconstruction (KfW), aucun autre dispositif d'aide à l'investissement, notamment de nature fiscale, n'est prévu.

Ce soutien public est allé de pair avec une concentration des unités de production dans les nouveaux *Länder*, des régions industriellement peu développées et se caractérisant par un fort taux de chômage, ce qui a contribué à l'effort général de reconstruction économique de l'ex-RDA. Cependant, la plupart des sous-traitants et des entreprises de gros dans le domaine PV sont implantés dans le sud de l'Allemagne, à proximité des zones de débouchés.

La loi sur la chaleur EEWärmeG

La loi sur la chaleur (adoptée en 2004, puis modifiée en 2008) rend également possible le soutien à l'utilisation thermique de l'énergie solaire. L'objectif de la loi sur la chaleur est la poursuite de l'augmentation de la proportion d'EnR intervenant dans la production de chaleur. Elle stipule qu'au plus tard en 2020, 14 % de la chaleur produite en Allemagne devra provenir des énergies renouvelables. Elle instaure notamment une obligation d'exploitation (les propriétaires de bâtiments construits récemment doivent exploiter les EnR pour l'approvisionnement en chaleur desdits bâtiments), un soutien financier (les moyens à disposition de l'utilisation des EnR s'élèveront jusqu'à 500 M€ par an) et un renforcement des réseaux de chauffage.

LES EFFORTS DE RECHERCHE DANS LE DOMAINE DE L'ÉNERGIE SOLAIRE

Outre le système légal de soutien à la filière PV, la R&D dans ce secteur est subventionnée à hauteur de

plus de 70 M€ par an par l'Etat fédéral allemand. Le ministère fédéral de l'Environnement (BMU) y consacre notamment plus de 40 % de ses crédits de recherche. 241 brevets ont été déposés depuis 2004. L'investissement privé en R&D est estimé à environ 180 M€ par an. Cet effort soutenu de recherche permet aux constructeurs de diminuer le coût de l'énergie PV d'environ 20 % à chaque doublement du volume de la production du secteur.

Sur la période 1996-2005, les subventions attribuées à la recherche sur les EnR dans le cadre du 4^e programme de recherche se sont élevées à 536,8 M€, soit une moyenne annuelle d'environ 54 M€.

La Stratégie *High Tech* et le 5^e programme de recherche sur l'énergie

Le Gouvernement fédéral a lancé en 2006 un programme national en faveur de la recherche et de l'innovation, la Stratégie *High-tech*, qui doit permettre à l'Allemagne d'atteindre les objectifs de Lisbonne. Sur les 17 champs thématiques prioritaires, l'Energie représente le 2^e secteur le mieux doté. Dans le cadre de cette stratégie, les fonds du BMU consacrés à la R&D dans le domaine des EnR ont été rehaussés de 5 M€ par an jusqu'en 2009 (4). Jusqu'à 10 M€ supplémentaires par an sont prévus par le Gouvernement, dans le cadre de l'« initiative pour la protection climatique » (400 M€/an), financée par les recettes dégagées par la vente des permis d'émission de CO₂. Le budget du BMU destiné au financement public des activités de R&D dans les EnR a atteint 103 M€ en 2008 et 110 M€ en 2009 (voir le graphique 1).

Le ministère fédéral de l'Enseignement et de la Recherche (BMBF) a également renforcé en 2008 le budget consacré aux projets de recherche sur les EnR et l'efficacité énergétique. Le montant des financements sur projet passe ainsi à 125 M€ en 2008 (à comparer à 90 M€ en 2007 et à environ 60 M€ en 2006). Le budget total alloué à l'énergie s'élève ainsi à 325 M€ pour l'année 2008 (5). L'augmentation globale s'inscrit dans le cadre d'un nouveau concept intitulé « Recherche fondamentale Energie 2020+ », qui vise à renforcer les liens entre la recherche fondamentale et l'industrie.

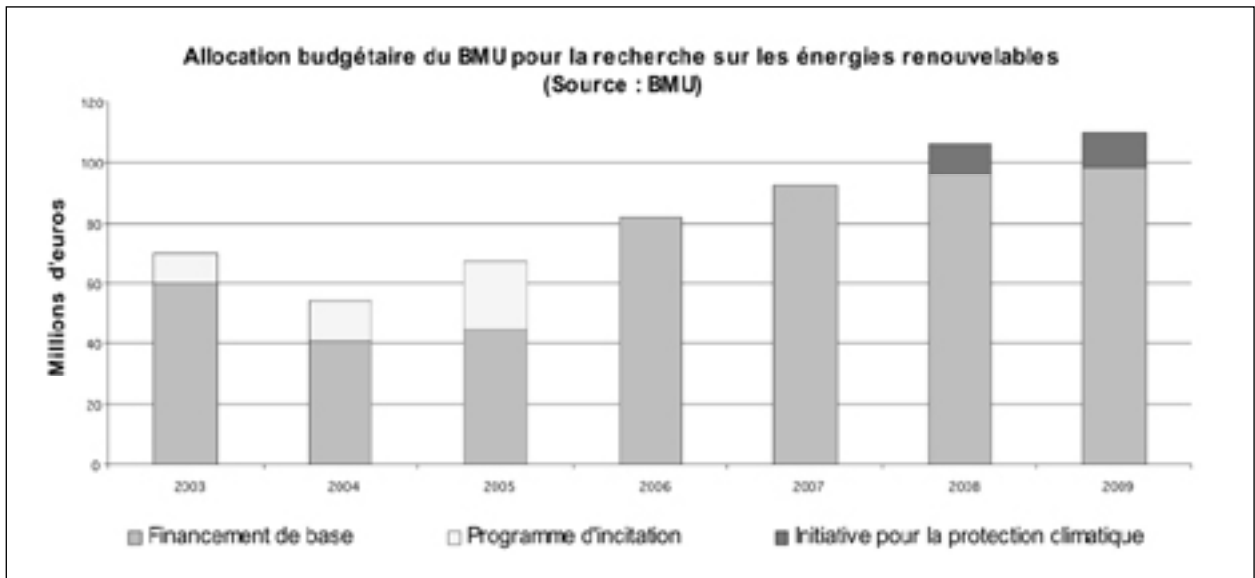
Une importante participation industrielle aux projets de recherche publique

En 2007, 55 % des fonds ont servi à financer des projets dans lesquels des entreprises étaient impliquées. La participation financière d'entreprises dans les projets de R&D sur les EnR a été retenue par le BMU comme un

(3) EEG : *Erneuerbare Energien Gesetz*.

(4) Fonds BMU : 83 M€ en 2006, 88 M€ en 2007 et 93 M€ en 2008.

(5) Le budget de base de la recherche sur l'énergie, qui bénéficie exclusivement aux centres de recherche Helmholtz, reste quant à lui inchangé en 2008, à hauteur de 200 millions d'euros par an.



Graphique 1.

critère important de sélection, car elle rend plus probable une future application industrielle des résultats de recherche obtenus.

Répartition du financement, par filière renouvelable

Voir le graphique 2.

LES ACTEURS PUBLICS DE LA RECHERCHE SOLAIRE EN ALLEMAGNE

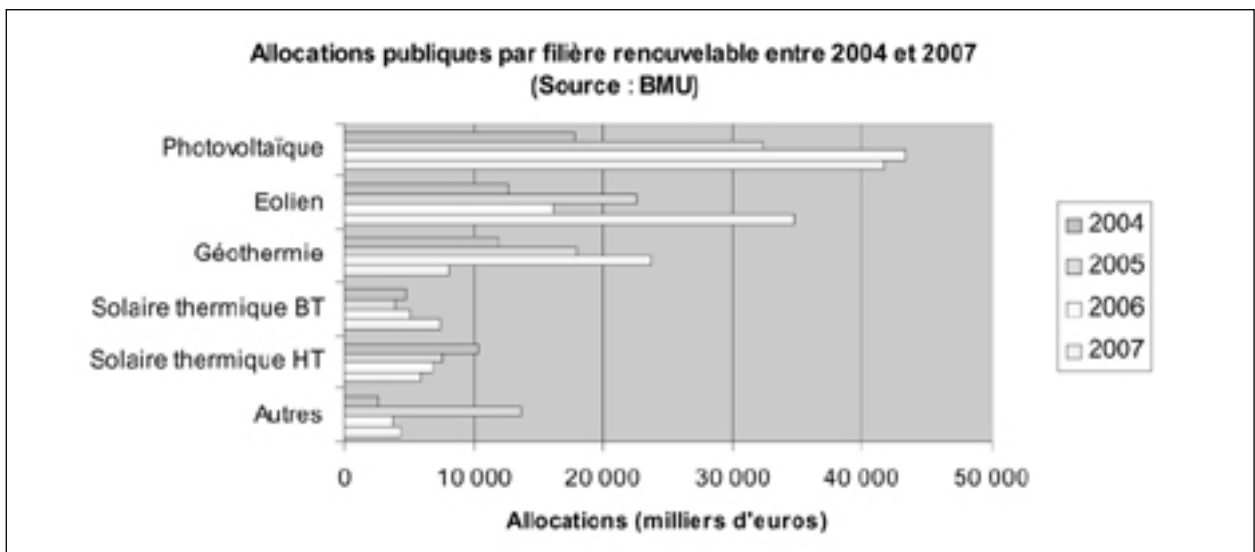
La recherche photovoltaïque est placée sous la responsabilité de deux ministères, le BMU (environnement) et le BMBF (recherche).

Parmi les grands organismes de recherche publics, on compte :

- le Centre Helmholtz de Berlin (HZB), qui se consacre aux cellules photovoltaïques à couches minces et aux matériaux semi-conducteurs ;
- l'Institut Fraunhofer ISE de Freiburg, qui s'attache davantage aux modules cristallins multi-jonctions ;
- et le Centre Helmholtz de Jülich (FZJ), qui concentre sa recherche sur les cellules à couche mince à base de silicium (amorphe ou microcristallin).

Des coopérations existent également dans le secteur PV avec les universités.

Dans le domaine du solaire à concentration, la recherche publique est prise en charge, en particulier, par le Centre allemand de recherche aérospatiale (DLR).



Graphique 2.

Le Centre de recherche Helmholtz de Berlin (HZB) en structure de la matière et énergie

La division « Énergie » du HZB se concentre sur la recherche fondamentale et sur le développement technologique de prototypes, en vue d'applications industrielles. Les recherches actuellement menées sur la prochaine génération de cellules photovoltaïques poursuivent essentiellement deux buts : la réduction des coûts et la hausse du rendement. Ces études concernent, d'une part, les aspects scientifiques et technologiques de la conception de différents types de cellules photovoltaïques à couches minces et de matériaux semi-conducteurs et, d'autre part, la recherche de nouvelles combinaisons de matériaux, à partir d'éléments usuels qui soient respectueux de l'environnement.

En coopération avec l'Université technique de Berlin (TU Berlin) et huit partenaires industriels, le HZB a inauguré récemment un Centre de compétences pour les technologies en couches minces et les nanotechnologies pour le photovoltaïque sur le site de Berlin-Adlershof. Le HZB emploie, au total, 1 100 collaborateurs, et dispose d'un budget annuel de plus de 100 M€ (chiffres 2008).

L'Institut Fraunhofer des systèmes énergétiques solaires (ISE) de Freiburg

L'ISE développe, en particulier, des systèmes, matériaux et procédés dans les domaines du silicium photovoltaïque, ainsi que des technologies PV alternatives :

- les cellules solaires multi-jonctions hautement performantes ;
- les systèmes PV à haute concentration (CPV).

L'institut ISE possède des antennes, réparties sur le territoire allemand, qui se consacrent également au développement de cellules PV et de matériaux semi-conducteurs :

- le Centre de service et de laboratoire LSC, à Gelsenkirchen (Ouest) ;
- le Centre de photovoltaïque à partir de silicium CSP, à Halle/Saale (Est) ;
- le Centre technologique de matériaux semi-conducteurs THM, à Freiberg (Sud-est).

L'ISE, qui travaille depuis des années avec des clients et représentants de diverses branches et entreprises, est intégré dans un réseau de coopérations nationales et internationales. Il emploie 830 personnes et dispose d'un budget de près de 40 M€ (chiffres 2008).

Le Centre Helmholtz de recherche de Jülich (FZJ)

Au sein du FZJ, l'Institut pour la recherche énergétique (IEF) analyse des technologies modernes de transformation de l'énergie, afin de les développer et de les

améliorer, en vue d'un approvisionnement en énergie durable et sûr.

Le FZJ n'est pas seulement un très grand centre interdisciplinaire de recherche en Allemagne. Sa longue expérience en matière de participation à des réseaux et à des programmes nationaux et internationaux en fait également un maillon important de la recherche européenne.

Ainsi, le bureau de transfert de technologie du FZJ recense environ 2 700 partenariats en 30 ans, qu'il s'agisse de contrats industriels, services et coopérations en matière de R&D ou encore de licences de brevets, en particulier dans le domaine du photovoltaïque. Il travaille notamment avec le Laboratoire de recherche et d'applications en technique des plasmas (FAP) de Dresde (Est).

Les grands centres Helmholtz (HZB, FZJ, DLR...), et plus particulièrement celui de Jülich, ont également pour fonction de servir de point d'ancrage pour la participation allemande à des programmes internationaux. Des coopérations régulières sont menées avec près de 500 partenaires internationaux en Europe, aux USA, en Russie et en Chine. Le FZJ peut ainsi faire valoir de multiples participations à des projets européens, et plusieurs coordinations. Il emploie plus de 4 400 personnes et dispose d'un budget de 436 M€ (chiffres 2007) pour l'ensemble de ses domaines de recherche.

Le Centre allemand de recherche aérospatiale (DLR)

Le DLR n'est pas uniquement le centre de recherche allemand de référence dans les domaines de l'aéronautique et de l'espace, il a également développé depuis de nombreuses années des compétences dans le domaine des transports et de l'énergie.

A court terme, l'objectif du DLR dans le domaine énergétique est de mettre ses capacités de R&D à la disposition de l'industrie allemande, afin de favoriser et de garantir l'introduction des technologies solaires à concentration (CSP) sur le marché européen. La poursuite du développement de ces technologies doit viser à réduire les coûts de production de l'électricité solaire et à créer les conditions économiques favorables à une plus large commercialisation. A long terme, les systèmes thermo-solaires doivent contribuer à la production à faible coût de combustibles (hydrogène, par exemple). Ces objectifs font partie du programme de recherche sur l'énergie de la communauté Helmholtz.

Au sein du DLR, une unité de 90 employés développe et teste des composants pour des systèmes CSP, réalise des études de faisabilité technique et économique, et analyse des collecteurs et d'autres systèmes optiques et thermiques, pour le compte des ministères de tutelle et de l'industrie.

Ainsi, dans le cadre de l'étude européenne de faisabilité Désertec, concept visant à évaluer la sécurité de l'éner-

gie, de l'eau et du climat en EU-MENA (6), le DLR a réalisé plusieurs études (7) à partir de données satellites qui visent à analyser le potentiel des technologies CSP dans les pays du pourtour de la Méditerranée. Elles ont montré qu'en occupant moins de 0,3 % de la surface entièrement désertique de la région MENA, des centrales thermiques solaires pourraient produire assez d'électricité et d'eau douce pour satisfaire aux demandes actuelles et futures de l'EU-MENA. Ces études ont servi de base pour la définition des grandes lignes du projet, dont le lancement a été officialisé le 13 juillet 2009 à Munich.

LES PRINCIPAUX ACTEURS PRIVÉS DE L'INDUSTRIE SOLAIRE EN ALLEMAGNE

Les fournisseurs de matériaux PV

Parmi les principaux fournisseurs de matériaux PV, on compte l'entreprise Q-Cells, SolarWorld AG ou encore RWE Schott Solar GmbH :

- Q Cells : premier fabricant mondial de cellules PV (silicium mono- et poly-cristallin) ; 2 000 salariés ; chiffre d'affaires de 859 M€ ; production de 389,2 MWc (chiffres 2007) ;
- SolarWorld AG : silicium mono- et poly-cristallin ; 2 095 salariés ; chiffre d'affaires de 699 M€ ; production de 151,4 MWc (chiffres 2007) ;
- RWE Schott Solar GmbH : modules à silicium poly-cristallin et amorphe et modules à couche mince ; 1 400 collaborateurs ; chiffre d'affaires de 223 M€ ; production de 84 MWc (chiffres 2007).

Les exploitants

La plupart des exploitants allemands dans le domaine solaire sont des *start-up* ou des *spin-off* issues de centres de recherche, parmi lesquels on peut citer : Concentrix Solar, Sulfurcell, Azur Space, Inventux, Geosol, etc.

(6) Europe, Moyen-Orient (*Middle-East*) et Afrique du Nord (*North Africa*).

CONCLUSION

L'Allemagne est considérée comme le marché photovoltaïque le plus attractif au monde. Ces dernières années, l'acceptation de la société et du milieu politique, ainsi qu'un cadre législatif favorable, ont permis une augmentation constante de la capacité photovoltaïque installée en Allemagne. Les entreprises ont tiré profit de ces conditions pour réaliser des investissements importants, en particulier dans l'élargissement des capacités de production. 75 entreprises sont actuellement en activité dans ce secteur en Allemagne.

Parmi les énergies renouvelables, le solaire PV est davantage considéré comme une source à moyen terme que comme une source à court terme. La tendance anticipée par l'Association allemande de l'industrie solaire (BSW), à l'horizon 2020, est une couverture de 7 % de la consommation allemande d'électricité par le PV. Cette anticipation s'appuie sur la perspective d'une parité réseau entre 2012 et 2016, selon les installations, tant du fait de l'augmentation du prix de l'électricité que du progrès technologique.

À court terme, l'industrie PV connaît néanmoins une crise conjoncturelle aux raisons multiples (surcapacité de production, baisse des aides publiques, rationnement du crédit et conjoncture générale). À moyen terme, le renforcement de la concurrence internationale (notamment asiatique) et le manque potentiel de personnels suffisamment qualifiés (ingénieurs) risquent, en outre, de limiter la croissance du secteur.

Afin de garantir la sécurité des investissements, il est néanmoins nécessaire de mettre en place des cadres réglementaires tarifaires nationaux pour la production d'électricité thermo-solaire. C'est seulement par ce biais qu'il sera possible de réaliser rapidement et durablement le potentiel de croissance des centrales thermodynamiques et le potentiel de réduction des coûts, *via* le développement technologique. Enfin, la création de mécanismes tels que le commerce des certificats d'émission de gaz à effet de serre est également essentielle, aux yeux des industriels, pour encourager les investissements.

(7) TRANS-CSP en 2005, MED-CSP en 2006 et AQUA-CSP en 2007.