

Le Solaire Photovoltaïque

Enjeux

La France s'est donnée pour objectif de porter la part d'énergie renouvelable à 23% de la consommation finale d'énergie d'ici 2020 (+20Mtep par rapport à 2005), et à plus long terme (2050), de diviser par 4 ses émissions de gaz à effet de serre. Si la filière éolienne apparaît aujourd'hui comme la plus mature, le solaire photovoltaïque (PV) représente une composante indispensable pour atteindre ces objectifs.

La contribution initialement attendue du photovoltaïque était de 0,5 Mtep, soit une puissance nominale installée de 5 400 MW¹, en 2020. Cet objectif devrait toutefois être dépassé. Les efforts actuels d'innovation visent à baisser les coûts, et à structurer la filière industrielle en France afin d'en faire une technologie mature et incontournable au-delà de 2020.

Définition ou description

L'énergie solaire photovoltaïque permet la production directe d'électricité. Elle est à distinguer de l'énergie solaire thermique, visant à produire de la chaleur pour l'eau chaude sanitaire ou le chauffage. Elle se distingue également des centrales solaires thermodynamiques, qui emploient des miroirs pour chauffer des fluides alimentant un générateur électrique.

L'effet photovoltaïque produit dans les cellules solaires photovoltaïques permet de convertir l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité. Sous l'effet de la lumière, le matériau semi-conducteur composant la cellule génère des charges électriques qui se déplacent et créent un courant circulant d'une cellule à l'autre via des rubans métalliques. Les cellules photovoltaïques sont assemblées pour former des modules qui peuvent eux-mêmes être interconnectés pour former un « champ photovoltaïque ». Ce champ photovoltaïque produit un courant continu (DC) qui peut dans certains cas être transformé par un onduleur en courant alternatif (AC). Le semi-conducteur le plus communément utilisé est le Silicium, deuxième matériau le plus abondant sur Terre.²

¹ Couramment appelée « puissance crête », la puissance nominale correspond à la valeur de la puissance maximale du dispositif photovoltaïque mesurée aux conditions normales d'essai (STC).

² Les difficultés d'approvisionnement en silicium relayées par la presse pendant la période 2004-2007 étaient liées à une production insuffisante et conjoncturelle de silicium purifié (nécessaire aux industries des semi-

On distingue plusieurs technologies de cellules selon les procédés de fabrication utilisés : les cellules en Silicium cristallin (monocristallin ou multicristallin) et les cellules en couches minces, à base de Silicium amorphe, de Tellure de Cadmium (CdTe) ou de Diséléniure de Cuivre, d'Indium et éventuellement de Gallium (CIS ou CIGS). Une autre technologie de cellules, basée sur l'utilisation de matériaux organiques, se situe encore au stade de la R&D.

En résumé

Points forts :

- une source d'énergie inépuisable : l'énergie solaire ;
- un temps de retour énergétique et des émissions de CO₂ faibles ;
- une technologie pouvant être déployée presque partout, facilement modulable. Sa pose, sur les bâtiments, permet un déploiement sans emprise au sol ;
- un secteur générateur de valeur ajoutée et d'emplois en France.

Points faibles :

- une énergie fluctuante, bien que relativement prévisible ;
- un coût encore trop élevé mais qui diminue rapidement et de façon ininterrompue depuis plus de 20 ans et qui sera comparable au prix de vente de l'électricité résidentielle entre 2015 et 2020, et au prix de gros vers 2030.
- certains procédés de fabrication peuvent être polluants (CdTe) s'ils ne sont pas bien gérés ;
- concurrence pour l'usage des sols dans le cas des fermes PV.

conducteurs et au photovoltaïque) et non à un problème d'épuisement de cette ressource minérale.

Les rendements de conversion photovoltaïque³ des modules commerciaux sont compris entre 7 et 12% pour les « couches minces », 13 et 20% pour les technologies Silicium, et de l'ordre de 30% pour les technologies à haute concentration⁴, faisant l'objet d'opérations de démonstration préindustrielle.

L'effet photovoltaïque peut être utilisé pour diverses applications, qui se distinguent notamment par leur raccordement ou non au réseau électrique.

Les systèmes raccordés injectent sur le réseau une partie non utilisée ou la totalité de leur production électrique. Ces systèmes peuvent être posés en toiture de maisons privées. On trouve aussi des systèmes de taille plus grande, posés sur de grandes toitures (centaines de kW) ou au sol (de l'ordre du MW ou de la dizaine de MW, représentant une surface au sol de 2 à 3 ha pour 1 MW)⁵.

Les systèmes autonomes ne sont pas connectés au réseau. En France, ils contribuent notamment à l'électrification de sites dits « isolés » car éloignés du réseau, comme par exemple les refuges et les bergeries, ou encore des postes de télécommunication en zones montagneuses. Dans certaines régions du monde, principalement rurales, les systèmes autonomes pallient un réseau électrique parfois peu développé.

Chiffres clés

La production d'électricité photovoltaïque connaît une croissance importante au niveau mondial depuis plusieurs années. En 2012 le marché annuel est évalué à 77,5 milliards de dollars⁶, soutenant approximativement 900 000 emplois⁷. La puissance mondiale cumulée est supérieure à 100 GW⁸, soit une production annuelle d'électricité de 120 TWh. Les prévisions d'installation annuelle du marché mondial, selon les scénarios de développement envisagés, vont de 27 à 47 GW (50-70 milliards d'euros d'investissement) en 2015 et de 59 à 135 GW (79-129 milliards d'euros d'investissement) en 2020⁹. En Europe, près de 17GW ont été raccordés au réseau en 2012, pour une puissance cumulée de l'ordre de 69 GW¹⁰. Le PV produit plus de 2,5% de la demande en électricité en Europe.

En France, le marché du PV a représenté 3 milliards d'euros d'investissements en 2011 pour une production de 2 TWh et un total de 18 800 emplois¹¹. Fin décembre 2012, le parc photovoltaïque français connecté au réseau est estimé à 4 GW environ¹², contre 2,9 GW fin décembre 2011. En Allemagne, il est de plus de 32 GW.

Avantages/inconvénients

Avantages

Bénéfices environnementaux

Le PV peut jouer un rôle majeur dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre en offrant une énergie sans émissions directes de gaz à effet de serre, et des émissions indirectes faibles. Sur l'ensemble de sa durée de vie, un système PV¹³ installé en France métropolitaine, émet 20 à 80 g de CO₂ équivalent par kWh produit¹⁴, selon le type de système, la technologie de modules et l'ensoleillement du site. Ces résultats dépendent fortement du mix électrique du pays dans lequel les cellules et modules sont produits. Ils sont à comparer aux émissions moyennes de la production d'électricité qui sont en France de 86g CO₂ équivalent par kWh équivalent (et de 565gCO₂éq/kWh au niveau mondial)¹⁵. L'empreinte carbone des nouveaux systèmes PV décroît régulièrement, d'une part grâce à l'utilisation pendant la fabrication de procédés et de matériaux générant moins de CO₂, d'autre part grâce à l'amélioration des rendements et enfin, grâce au recyclage des déchets de fabrication.

Les technologies de recyclage, dont les rendements et l'empreinte environnementale restent encore à améliorer, existent déjà pour la plupart des produits PV. La filière du recyclage se structure d'ores et déjà à l'échelle européenne et nationale. Les premiers systèmes PV ont été installés dans les années 90 et le recyclage de modules en fin de vie interviendra à grande échelle à partir de 2020.

³ rapport de la puissance électrique maximale de sortie à la puissance lumineuse incidente mesurée dans les conditions normales d'essai (STC).

⁴ Le principe est alors de concentrer la lumière à l'aide de dispositifs optiques en amont de la cellule photovoltaïque.

⁵ La plus grande centrale au sol française début 2013 est la centrale de Toul-Rosières, de 115 MW pour une surface au sol de 367 ha.

⁶ Estimation du cabinet américain IHS

⁷ D'après EPIA, 30 emploi équivalent temps plein sont créés par MW (emplois directs et indirects)

⁸ Market Report 2012, EPIA

⁹ Source : Solar 6 generation, EPIA

¹⁰ EPIA : Market Report 2012

¹¹ [rapport](#) éolien et photovoltaïque du Ministère du Redressement productif et du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Énergie, Sept 2012

¹² Sources : SOeS (tableau de bord éolien et photovoltaïque)

¹³ Système PV : système incluant la génération, la transformation, la distribution, voire le stockage d'énergie électrique obtenue par conversion photovoltaïque de l'énergie solaire

¹⁴ Résultats issus du projet ESPACE (www.espace-pv.org) avec un mix électrique moyen européen. Les émissions de CO₂ dépendent fortement du mix électrique dans lequel les cellules et modules sont produits.

¹⁵ Source : AIE : CO₂ Emissions from Fuel Combustion, 2012

Bénéfices énergétiques

L'énergie nécessaire à la fabrication d'un système PV est restituée au bout d'un à trois ans d'exploitation¹⁶ selon la technologie de module et sa région d'installation en France. Les avancées techniques attendues dans les prochaines années permettront de réduire ce "temps de retour énergétique" à moins d'un an dans le Sud de l'Europe pour les principales catégories de modules. Pendant les 30 ans de sa vie, un système PV produira donc entre 10 et 30 fois l'énergie dépensée tout au long de son cycle de vie.

Modularité des systèmes photovoltaïques

Les technologies photovoltaïques peuvent être utilisées dans une grande variété d'applications, comprenant les petits systèmes dans le secteur résidentiel, les systèmes de moyenne puissance sur toitures agricoles¹⁷, industrielles ou commerciales, les parcs photovoltaïques au sol de grande puissance¹⁸ et les systèmes de puissance variable, non connectés au réseau, situés dans des sites isolés.

Intégration dans l'enveloppe du bâtiment

Différents procédés permettent de poser les systèmes photovoltaïques en toiture, valorisant ainsi des surfaces ensoleillées, sans conflit d'usage.

Les modules photovoltaïques intégrés au bâti se substituent aux éléments de construction traditionnels des maisons et immeubles, ils ne sont pas montés en surimposition mais intégrés. Ils sont alors considérés comme matériaux de construction produisant de l'électricité. Plus esthétiques, ils ont aussi l'avantage, sur des constructions neuves, d'accroître la rentabilité du projet, car ils viennent se substituer aux matériaux traditionnels. Enfin, le marché des produits de construction PV est un marché sur lequel les industriels français du bâtiment et du photovoltaïque peuvent se positionner en valorisant leur savoir-faire. Son développement dès aujourd'hui permet de préparer la filière française du bâtiment à répondre aux exigences de la réglementation thermique 2020, date à laquelle tout nouveau bâtiment, sauf exceptions, devrait produire plus d'énergie qu'il n'en consomme.

Investissement local dans les énergies renouvelables et mobilisation citoyenne

Le photovoltaïque, grâce à sa modularité, permet aux citoyens de contribuer directement à la production d'énergie renouvelable et à l'atteinte des objectifs nationaux dans le domaine. Les installations individuelles, dont la production annuelle d'électricité est comparable à

la consommation d'un foyer (hors chauffage)¹⁹, peuvent être un levier de sensibilisation des ménages à la maîtrise de leur consommation d'électricité.

Le déploiement du photovoltaïque crée de la valeur et des emplois en France

Le prix des équipements baisse bien plus rapidement que les coûts, moins compressibles, de la main d'œuvre nécessaire à la pose. Par conséquent, les activités en aval de la filière (installation, études, commercialisation) prennent **une part croissante dans la chaîne de valeur** du photovoltaïque : de 33% en 2007, elles sont passées à 54% en 2012²⁰. La part de la valeur ajoutée créée en France augmente donc, même si une proportion importante des modules est importée. En 2011, le secteur employait **27 500 personnes** (hors R&D), dont 22 500 non délocalisables (installateurs)²¹. Par ailleurs, la production de modules ou de cellules représente une **opportunité de diversification ou de relais de croissance** pour de nombreuses entreprises françaises oeuvrant dans le développement de technologies de fabrication innovantes (cellule, module ou électronique de puissance). Le positionnement stratégique de certaines entreprises françaises leur permet par ailleurs de viser des marchés en croissance à l'export.

Inconvénients

Caractère fluctuant de la production photovoltaïque et impact sur le réseau

La quantité d'électricité produite par un système photovoltaïque fluctue au cours de la journée. Or, dans tout système électrique, la production et la consommation d'électricité doivent à tout moment être équivalentes pour ne pas déséquilibrer le réseau. Le gestionnaire de réseau doit donc anticiper et compenser ces variations pour assurer l'équilibre. Le développement des réseaux intelligents (permettant notamment un meilleur pilotage de la consommation), des interconnexions et des solutions de stockage permettra à terme d'assurer plus facilement l'équilibrage en temps réel de la demande et de la production importante des énergies fluctuantes telles que le PV. Les outils de prévision sont également de plus en plus fiables.

Actuellement, en cas d'implantation forte des systèmes PV dans les zones rurales, les fluctuations peuvent avoir

¹⁹ Un foyer moyen consomme 3300 kWh/an hors chauffage et eau chaude sanitaire et la production d'une installation PV de 3 kW produit en moyenne 3000 kWh par an (à Paris).

²⁰ Source : Etude Marchés et emplois liés à l'efficacité énergétique et les EnR, ADEME – In Numeri.

²¹ Source : Etude Marchés et emplois liés à l'efficacité énergétique et les EnR, ADEME – In Numeri

¹⁶ Résultats issus du projet ESPACE (www.espace-pv.org)

¹⁷ Voir avis ADEME serres photovoltaïques

¹⁸ Voir avis ADEME des centrales PV au sol

un impact sur le « plan de tension²² » assuré par le gestionnaire du réseau de distribution, en générant des surtensions ou des baisses de tension temporaires. Les fabricants d'onduleurs travaillent actuellement sur des solutions pilotables par le gestionnaire de réseau permettant de résoudre en partie ce problème, en faisant participer les installations photovoltaïques au maintien du plan de tension.

Malgré son caractère fluctuant, le PV pourrait contribuer à niveler le pic secondaire de demande diurne observé habituellement (pointe de mi-journée). En effet, dans beaucoup de cas, l'électricité produite par un système PV installé sur le toit d'un bâtiment pourrait être consommée localement, par exemple lorsque l'air conditionné fonctionne pleinement à midi en été. Cette consommation d'électricité sur le lieu de production pourra être augmentée grâce à des dispositifs de stockage, qui font actuellement l'objet de nombreux développements.

L'occupation des sols des centrales au sol

Pour être rentables, les centrales photovoltaïques au sol nécessitent une certaine surface, ce qui peut entraîner des conflits d'usage avec des terres agricoles ou forestières. Par exemple, le déboisement d'une forêt, lieu de stockage du CO₂, pour un projet de centrale solaire au sol pourra avoir un impact négatif en termes de bilan carbone. Afin de prévenir ces conflits, le choix d'implantation doit se porter en priorité sur des surfaces non forestières et impropres à l'agriculture (friches industrielles, anciennes carrières, sites présentant une pollution antérieure, zones industrielles ou artisanales...). Les projets de centrales photovoltaïques peuvent, par ailleurs, intégrer une mixité des usages. Ainsi, certaines sites de productions animales (élevage extensif de volailles, d'ovins ou de caprins) et végétales (cultures maraîchères, production de fourrage...) sont compatibles avec les centrales photovoltaïques au sol.

Une technologie encore trop coûteuse

Le coût de production de l'électricité photovoltaïque reste largement supérieur au coût de production de l'électricité provenant des filières conventionnelles. Mais le prix des systèmes PV baisse continûment avec une accélération ces dernières années, grâce à la réduction des coûts de production des divers composants, aux économies

²² Sur un réseau électrique, chaque point de consommation a pour effet de faire baisser le niveau de tension localement. Pour garantir que la tension reste en tout point du réseau dans un intervalle de +/- 10% par rapport à sa valeur nominale, le gestionnaire du réseau de distribution a donc mis en place un « plan de tension ». Or, les générateurs PV présents sur les réseaux de distribution peuvent induire des sur-tensions locales qui n'étaient pas prévues dans le plan de tension.

d'échelle²³, au retour d'expérience, et à l'innovation. A l'inverse, les coûts de production de l'électricité provenant des filières conventionnelles augmentent de manière régulière. Dans ce contexte, le coût de production de l'électricité photovoltaïque devrait être comparable au prix de gros de l'électricité autour de 2030 et devrait être inférieur au prix de vente entre 2015 et 2020 selon les marchés²⁴.

Des précautions à prendre

Le mode de pose des systèmes PV en toiture peut entraîner l'échauffement des modules et donc une baisse de leur rendement électrique. Une bonne conception maximisant la ventilation naturelle, notamment en sous face, ou encore l'utilisation de capteurs solaires hybrides photovoltaïques thermiques, en développement, sont des solutions envisageables. De façon générale, la pose des systèmes nécessite une meilleure coordination des différents corps de métier (isolation, couverture, électricité) et le recours à des professionnels bien formés, notamment les professionnels bénéficiant de la mention « Reconnu Grenelle Environnement ».

Une industrie responsable de certains impacts environnementaux

A l'instar du secteur de la microélectronique, l'industrie du photovoltaïque requiert l'utilisation de gaz et de produits chimiques pour la fabrication des cellules photovoltaïques et génère un certain nombre de déchets de fabrication, malgré des améliorations des procédés. L'étape de purification du silicium, réalisée principalement par voie chimique, fait notamment l'objet de travaux de recherche afin de la remplacer par des procédés physiques à faibles impacts environnementaux. D'autres actions visent à récupérer le silicium présent dans les boues de sciage après l'opération de fabrication des plaquettes, ou bien encore à recycler les bains chimiques utilisés dans certaines technologies couches minces.

²³ Depuis 1976, les prix baissent de 20% à chaque fois que la capacité installée double au niveau mondial. Le prix de gros des modules photovoltaïques en technologies silicium cristallin et couches minces a encore marqué une baisse importante allant de 35% à 45%, entre fin 2010 et fin 2011, selon la technologie et le pays de fabrication. Cette baisse régulière des prix et l'évolution à la hausse du prix de marché de gros de l'électricité permettent d'envisager une électricité photovoltaïque produite à un coût inférieur au prix de vente résidentiel avant 2020 en France (dès 2015 dans les régions très ensoleillées et marquées par un prix de l'électricité élevé).

²⁴ Solar Generation 6, EPIA, 2011

Actions de l'ADEME

Soutien à la recherche et innovation

L'ADEME soutient le développement des composants, des produits et des applications de la filière photovoltaïque. Les programmes de recherche soutenus visent à baisser les coûts des composants, réduire leur impact sur l'environnement, augmenter leur fiabilité, et à les intégrer dans le bâtiment.

En particulier, le programme Energies Décarbonées des Investissements d'Avenir soutient les expérimentations préindustrielles et les plateformes technologiques, avec pour objectif la mise au point de démonstrateurs dont les performances sont suffisamment proches d'une version commercialisable. Parmi les projets financés dans le cadre de ce programme²⁵, trois se positionnent sur les technologies silicium cristallin, trois sur les technologies couches minces et hétérojonction, deux sur les technologies à concentration et un sur les matériaux d'encapsulation.

L'Agence travaille également sur des solutions techniques et économiques permettant une meilleure intégration de l'énergie solaire photovoltaïque au réseau électrique.

Qualité d'installation des produits photovoltaïques

L'ADEME soutient aussi l'amélioration de la qualité des produits au travers d'actions visant à adapter des normes actuelles aux spécificités du PV, en partenariat avec l'organisme de certification CERTISOLIS.

En novembre 2011, pour aider les particuliers à choisir des professionnels qualifiés pour entreprendre des travaux d'amélioration de la performance énergétique et/ou d'installation d'équipements utilisant une source d'énergie renouvelable, l'ADEME a mis en place avec le ministère en charge du logement, les professionnels et les organismes de qualification, la première étape d'une « reconnaissance Grenelle Environnement » des signes de qualité délivrés aux entreprises réalisant des travaux de maîtrise de l'énergie et d'installation d'énergies renouvelables. L'ADEME mène également des actions d'amélioration de la formation des professionnels.

Etude d'impact

Dans le contexte du développement des énergies renouvelables à Haute Qualité Environnementale, l'ADEME mène, avec ses partenaires, des études visant à comparer les **performances environnementales** des systèmes photovoltaïques²⁶. Elle met également en place un référentiel méthodologique afin de standardiser le calcul des indicateurs d'analyse de cycle de vie.

POUR EN SAVOIR PLUS

Publications

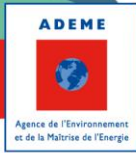
- [Feuille de route](#) sur l'électricité photovoltaïque
- Etude ESPACE : www.espace-pv.org
- [Avis de l'Ademe](#) sur les serres photovoltaïques et sur les centrales solaires au sol

Sites Internet

- Centre de ressources documentaires : www.photovoltaique.info
- Service Observation et Statistiques du MEDDE : www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/
- Collecte et recyclage des modules photovoltaïques : www.ceres-recycle.org/ <http://www.pvcycle.org/>

²⁵ Voir « investissements d'avenir » sur Ademe.fr

²⁶ Projet ESPACE



Avis de l'ADEME

La filière photovoltaïque progresse régulièrement et rapidement en termes d'efficacité et de baisse des coûts, grâce aux efforts de recherche en laboratoire et aux retours d'expérience du marché. En France, l'électricité photovoltaïque atteindra la compétitivité économique dans les prochaines années et se présente comme un élément de réponse durable à la demande d'électricité. Le soutien à la filière revêt donc un enjeu stratégique en termes d'approvisionnement énergétique, de développement industriel, d'emplois, de compétitivité et de lutte contre le changement climatique.

Le photovoltaïque est une composante incontournable des politiques énergétiques durables. Bien que son coût ne permette pas encore d'envisager une diffusion massive, l'ADEME estime que les objectifs à l'horizon 2020 pourraient être portés à 15 GW.

Même s'il semble prioritaire d'équiper les grandes toitures (entrepôts, bâtiments commerciaux), l'ADEME envisage également le déploiement des centrales au sol, sous réserve qu'il respecte des critères environnementaux stricts, en particulier concernant la concurrence avec d'autres usages des sols.

L'ADEME travaille aujourd'hui à l'émergence de solutions à la fois technologiques et économiques qui permettront au réseau électrique d'accueillir un nombre croissant d'installations photovoltaïques, notamment en encourageant les travaux visant à diminuer les effets de la variabilité du photovoltaïque.