



Le solaire photovoltaïque

Février 2016

Contenu

Enjeux.....	1
Description.....	2
Chiffres clés.....	2
Etat des connaissances	3
Points forts	3
Points faibles et recommandations	6
Actions de l'ADEME	7
Soutien à la recherche et innovation	7
Qualité d'installation des produits photovoltaïques	7
Promouvoir les technologies aux moindres impacts environnementaux	7
Avis de l'ADEME	9

Enjeux

Les énergies renouvelables, avec l'efficacité énergétique, constituent un des piliers de la transition énergétique et de la lutte contre le réchauffement climatique. Elles contribuent également à la sécurité d'approvisionnement, à limiter l'impact des fluctuations des prix des énergies fossiles et à la création d'emplois. A travers la loi de Transition énergétique pour la croissance verte du 17 août 2015, la France s'est donnée pour objectif de porter la part des énergies renouvelables à 23 % de la consommation finale brute d'énergie en 2020 et à 32 % de cette consommation en 2030 ; à cette date, pour parvenir à cet objectif, les énergies renouvelables doivent représenter 40 % de la production d'électricité. Avec 6,1 GW de puissance photovoltaïque installée fin 2015 (DOM inclus), l'objectif national de 5,4 GW installés en 2020, assigné lors du Grenelle de l'environnement en 2009, a d'ores et déjà été dépassé. Dans le cadre des travaux sur la programmation pluriannuelle de l'énergie, de nouveaux objectifs vont être fixés pour 2018 et 2023.

Le photovoltaïque est une des sources d'énergie qui devrait être la plus déployée à l'avenir dans le monde, avec des perspectives de croissance d'environ 40GW/an de 2015 à 2020. Cette apparente continuité dans la croissance du parc photovoltaïque est toutefois à mettre en perspective avec une mutation profonde de la structure de ce marché à l'horizon 2020 : d'un marché concentré sur l'Europe tiré par les politiques de soutien, la demande se déplace sur l'Asie (qui représentera un marché 3 fois plus important que l'Europe sur la période 2015-2020). Un modèle de marché du PV non subventionné devrait émerger dans un certain nombre de pays.

Au niveau mondial, l'appareil de production de la filière photovoltaïque s'est très fortement développé dans les années 2011-2012, pendant lesquelles la surcapacité de production a provoqué une forte baisse des prix. Sur cette même période, le marché s'est consolidé au niveau mondial, avec la réduction du nombre d'acteurs et l'apparition de quelques géants ayant des capacités de production annuelle supérieures à 1 GW. Dans ce contexte, où la majeure partie de la production est effectuée dans les pays asiatiques, comme pour d'autres activités du secteur de la micro-électronique, un nombre croissant de pays cherchent à relocaliser une partie de la production. Une part non négligeable de la

En résumé

Points forts :

- une énergie disponible partout, avec un fort potentiel de développement sans conflits d'usage ;
- un coût de revient du kWh qui diminue rapidement, même s'il est encore élevé dans certains cas. Dans certaines zones et pour certaines applications, le PV est déjà compétitif en France;
- un impact environnemental faible : temps de retour énergétique et émissions de CO₂ peu élevés ;
- une technologie facilement modulable : sa pose sur les bâtiments permet un déploiement sans emprise au sol ; l'installation de centrales au sol peut permettre de valoriser des zones de friches ;
- un secteur générateur de valeur ajoutée et d'emplois en France;
- une ressource énergétique locale pouvant être valorisée dans une perspective d'autoconsommation

Points faibles :

- une énergie fluctuante, bien que relativement prévisible ;
- un impact sur le réseau de distribution à anticiper pour des installations qui seraient mal dimensionnées ou mal positionnées ;
- certaines technologies, minoritaires, utilisent des métaux rares.

production asiatique alimentera directement ce marché dans les années à venir. En France, les efforts actuels d'innovation visent à baisser les coûts et à structurer la filière industrielle afin de lui permettre de se positionner sur un marché mondial en pleine croissance et sur un marché national qui devrait significativement progresser, notamment après 2020.

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 permet de convertir l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité. Concrètement, sous l'effet de la lumière, le matériau semi-conducteur composant la cellule génère des charges électriques qui se déplacent et créent un courant. Le semi-conducteur le plus communément utilisé est le Silicium, deuxième élément le plus abondant sur Terre¹. On distingue plusieurs technologies de cellules selon les procédés de fabrication utilisés : les cellules en Silicium cristallin (monocristallin ou multicristallin), qui représentent à ce jour plus de 90% du marché et les cellules en couches minces, à base de Silicium amorphe, de Tellurure 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. Les modules photovoltaïques actuellement sur le marché présentent des rendements² compris entre 10% et 14% pour les « couches minces », 13% et près de 22% pour les technologies Silicium cristallin et de l'ordre de 31% pour les technologies à haute concentration³.

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 localement ou la totalité de leur

production électrique. Ces systèmes peuvent être intégrés au bâtiment, posés en toiture ou au sol. Ils représentent aujourd'hui la quasi-totalité des installations.

Les systèmes autonomes utilisent toute l'électricité produite localement et 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 capacité installée de production d'électricité photovoltaïque connaît une croissance importante au niveau mondial depuis plusieurs années. A la fin 2014, le marché annuel était évalué à 82 milliards de dollars⁴, pour une augmentation de capacité installée de 40 GW. La puissance mondiale cumulée fin 2014 est de l'ordre de 177 GW, soit une production annuelle d'électricité estimée en 2015 à au moins 200 TWh⁵. Les prévisions d'augmentation annuelle de la capacité installée au niveau mondial, selon les scénarios de développement envisagés, vont de 47 à 86 GW en 2019⁶. Selon la Photovoltaic Market Alliance (PVMA⁷), 51 GW ont été installés dans le monde en 2015 contre 40 GW en 2014. La croissance du marché est portée par la Chine (+15 GW soit une augmentation de 37 % par rapport à 2014), le Japon (10 GW), les États-Unis (9,8 GW). En Europe, 8,5 GW ont été installés. Le PVMA estime également que tous les marchés émergents (Inde, pays asiatiques hors Chine) ont contribué significativement à la croissance globale du PV.

En France, après une période de forte croissance des installations photovoltaïques sous l'effet d'incitations publiques ambitieuses, le marché du PV est marqué depuis 2011 par un ralentissement des investissements. À la fin décembre 2015, la capacité totale disponible en France était de 6,2 GW soit une augmentation de 25% par rapport à l'année précédente avec une majorité (91%) de systèmes raccordés au réseau public de distribution. La production énergétique annuelle est estimée à 7,4 TWh et couvre en moyenne 1,6 % de la consommation nationale d'énergie électrique⁸. La filière représente 8 400 emplois directs, 5 200 emplois

¹ Les difficultés d'approvisionnement en silicium pendant la période 2004-2007 étaient liées à une production insuffisante et conjoncturelle de silicium purifié (nécessaire aux industries des semi-conducteurs et au photovoltaïque) et non à un problème d'épuisement de cette ressource minérale.

² Rapport de la puissance électrique maximale de sortie à la puissance lumineuse incidente mesurée dans les conditions normales d'essai (STC).

³ Avec un facteur de concentration de 500. Cette technologie utilise des lentilles optiques qui concentrent la lumière sur de petites cellules photovoltaïques à haute performance. Cette technologie doit être couplée à des trackers (dispositif faisant pivoter la cellule), afin qu'elle soit toujours face au soleil.

⁴ Source TRENDS 2015, IEA PVPS.

⁵ Snapshot of Global PV Market – EIA PVPS, 2015.

⁶ Global Market Outlook for Solar Power 2015-2019, SolarPower Europe, 2015.

⁷ [PVMA, janvier 2016](#)

⁸ Source : [panorama de l'électricité renouvelable 2015, SER et RTE, février 2016](#)

indirects (sous-traitants), et 3 200 emplois induits, soit 17 000 emplois au total⁹.

La plus grande partie des installations du parc correspond à des petits systèmes intégrés au bâti de puissance inférieure ou égale à 36 kW (97 % du nombre total d'installations) qui ne représentent toutefois que 25 % de la puissance totale. La tendance est aujourd'hui au déploiement de grandes installations, en toitures ou au sol : sur l'ensemble du parc français, la part en puissance des centrales au sol augmente depuis 2010. Si on prend également en compte les toitures de plus de 250kW, ces grandes installations représentent, fin décembre 2015, la moitié de la puissance du parc¹⁰.

Etat des connaissances

Points forts

Bénéfices environnementaux

Le PV permet d'offrir une énergie sans émissions directes de gaz à effet de serre, avec des émissions indirectes faibles. Sur l'ensemble de sa durée de vie (de sa fabrication à la gestion de sa fin de vie), un système PV¹¹ installé en France métropolitaine émet en moyenne 55 g de CO₂ équivalent par kWh produit¹², 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 relatives des mix électriques qui sont en France métropolitaine de 82 g CO₂ équivalent par kWh (et de 430 gCO₂éq/kWh au niveau mondial)¹³. L'empreinte carbone des nouveaux systèmes PV décroît régulièrement, d'une part grâce à l'utilisation pendant la fabrication de sources d'énergie, 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.

Par ailleurs, plus de 85% des matériaux constituant les systèmes photovoltaïques peuvent être recyclés. Les technologies de recyclage, dont les rendements et l'empreinte environnementale restent encore à améliorer, existent déjà pour la plupart des produits PV. En application de la directive européenne sur les DEEE¹⁴, les producteurs de modules PV ont l'obligation de prévoir leur recyclage. En France, « PV cycle » est l'éco-organisme en

charge de la collecte et du recyclage des modules en fin de vie. 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.

Bénéfices énergétiques

L'énergie nécessaire à la fabrication d'un système PV est restituée au bout d'un à trois ans d'exploitation¹⁵ 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 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 agricoles¹⁶, industrielles ou commerciales, les centrales photovoltaïques au sol de grande puissance et les systèmes de puissance variable, non connectés au réseau, situés dans des sites isolés.

Une technologie dont les coûts baissent très vite

Si les installations photovoltaïques de grande puissance et les centrales au sol dans le sud de la France fournissent déjà de l'électricité à des coûts compétitifs, ce n'est pas encore le cas pour toutes les installations. A titre d'exemple, dans le Sud de la France, on peut estimer que le coût de revient du kWh varie entre 23 c€ pour une petite installation intégrée au bâti d'une toiture résidentielle et 8 c€ pour une centrale au sol¹⁷. D'autre part, le coût de revient du kWh produit dans le Nord de la France est 57 % plus élevé que celui produit dans l'extrême Sud.

Dans la plupart des cas, le coût de production de l'électricité photovoltaïque reste encore assez élevé. Toutefois, 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 d'échelle¹⁸, au retour

⁹ Source : Etude BIPS ADEME, 2015.

¹⁰ Source Observer et panorama de l'électricité renouvelable, RTE.

¹¹ Système PV : système incluant la génération, la transformation, la distribution, voire le stockage d'énergie électrique obtenue par conversion photovoltaïque de l'énergie solaire.

¹² Sources : projet ESPACE (www.espace-pv.org) avec un mix électrique moyen européen et étude SmartGreenScan.

¹³ Base Carbone® ADEME.

¹⁴ Déchet d'équipements électriques et électroniques.

¹⁵ Résultats issus du projet ESPACE (www.espace-pv.org).

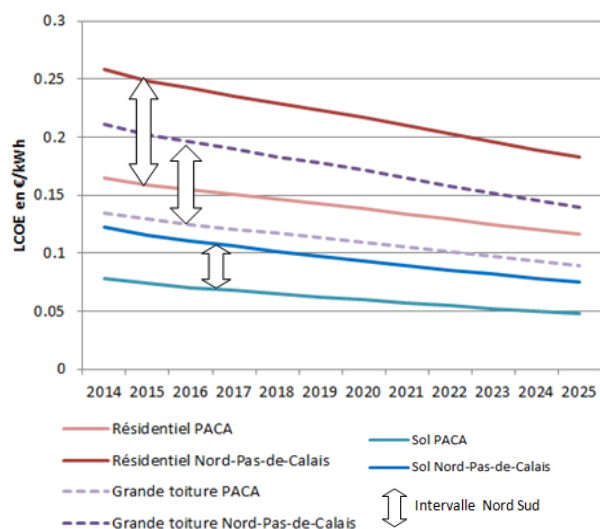
¹⁶ Voir fiche technique ADEME sur les serres photovoltaïques.

¹⁷ Source : étude BIPS, ADEME 2015 : respectivement pour une installation de 0-3 kW IAB et une centrale au sol. Calculés selon la méthode LCOE avec des taux d'actualisation respectifs de 5,46% et 5,34%

¹⁸ 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

d'expérience et à l'innovation. A titre d'illustration, les coûts d'investissement pour une centrale au sol ont été divisés par 6 entre 2007 et 2014. D'ici 2025, on estime que ces coûts vont encore baisser de façon significative : le coût d'investissement du PV devrait diminuer de 35 %¹⁹. A l'inverse, le prix de l'électricité, avec le mix électrique actuel, augmente 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 marchés²⁰. En France, les coûts de production devraient suivre une baisse similaire pour les différents types de systèmes, pour atteindre, par exemple, et comme explicité sur le graphique suivant²¹ moins de 5c€/kWh en 2025 pour une centrale au sol installée en région PACA.

Evolution du coût de production du kWh photovoltaïque (LCOE)



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. Ce mode d'intégration présente un surcoût par rapport aux panneaux surimposés, plus simples à installer mais moins esthétiques. Toutefois, dans le neuf, certains modules intégrés en toiture présentent une rentabilité

équivalente aux systèmes surimposés 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 future réglementation énergétique et environnementale multicritères de 2020, date à laquelle tout bâtiment neuf, sauf exceptions, devra présenter une consommation d'énergie renouvelable supérieure ou égale à sa consommation d'énergie non renouvelable.

Investissement local dans les énergies renouvelables et mobilisation des consommateurs

Le photovoltaïque 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)²², peuvent être un levier de sensibilisation des ménages à la maîtrise de leur consommation d'électricité.

Un secteur générateur de valeur ajoutée et d'emplois

Le nombre d'emplois directs a diminué depuis 2010 sous l'effet de la baisse du marché national mais aussi en raison du changement de nature des installations déployées : les centrales au sol, moins intenses en emplois, prennent le pas sur les installations résidentielles et les moyennes toitures, les installations inférieures à 3 kW disparaissent au profit des installations de 3 à 9 kW.

Le principal gisement d'emploi demeure l'installation : en 2014, ce segment représente à lui seul plus de la moitié (54 %) des emplois directs, soit environ 4 400 ETP. La maintenance quant à elle concentre 17 % (soit 1 400 ETP) des emplois directs : ce sont des emplois pérennes, dont le nombre est appelé à augmenter avec l'accroissement du parc installé.

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 30% en 2007, elles sont passées à 68% en 2014²³. La part de la valeur ajoutée

encore marqué une baisse importante allant de 35% à 45%, entre fin 2010 et fin 2011, selon la technologie et le pays de fabrication.

¹⁹ Etude BIPS, ADEME 2015

²⁰ Solar Generation 6, EPIA, 2011.

²¹ Etude BIPS, ADEME 2015

²² Un foyer moyen consomme 3 300 kWh/an hors chauffage et eau chaude sanitaire et la production d'une installation PV de 3 kW produit en moyenne 3 000 kWh par an (à Paris).

²³ [Etude Marchés et emplois liés à l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, ADEME – In Numéri, 2015.](#)

créée en France augmente donc fortement, même si une proportion importante des modules est importée.

On peut noter, par ailleurs, que les projets retenus lors de l'appel d'offres 2015 pour les installations de plus de 250 kW font appel à 50% de modules fabriqués en France.

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 - les équipementiers notamment - leur permet, par ailleurs, de viser des marchés en croissance à l'export.

L'autoconsommation

Le système de soutien actuel au photovoltaïque incite le producteur d'électricité à injecter sur le réseau la totalité de sa production et à acheter à son fournisseur l'intégralité de sa consommation.

L'autoconsommation, qui revient à consommer sa propre production peut pourtant avoir des avantages :

- Réduire la pression sur le réseau électrique, en incitant le développement d'installations PV là où l'énergie peut être consommée sur place,
- Diminuer les pertes de distribution et transport d'électricité grâce au rapprochement entre lieu de production et de consommation,
- Sensibilisation du producteur à sa consommation d'électricité,
- Proposer un mode de financement du PV complémentaire au dispositif historique, basé sur la revente totale de l'électricité produite.

Par ailleurs, l'autoconsommation se révèle particulièrement pertinente dans les zones où le réseau est contraint (Zones Non Interconnectées) et dans les bâtiments où la production et la consommation sont bien corrélées (supermarchés, entrepôts frigorifiques, certains bureaux...).

Dans les conditions actuelles, avec des prix de l'électricité relativement faibles, l'autoconsommation n'est pas rentable pour le producteur d'électricité. Un mécanisme de soutien et d'encadrement de l'autoconsommation ayant fait l'objet d'une concertation publique est actuellement étudié par le gouvernement français (voir sur [le site du ministère du développement durable](#)).

Pour l'ADEME, le mode de soutien doit être robuste au regard des enjeux suivants :

- Être suffisamment incitatif pour le déploiement du PV (niveau de rémunération, risque réduit, visibilité) et pour une utilisation efficace des superficies disponibles sur les bâtiments,
- Limiter les impacts sur le réseau du déploiement du PV,
- Ne pas induire d'incitation à la sur-consommation,
- Garantir la qualité et la productivité des installations,
- Proposer un système simple, lisible et opérationnel.

Points faibles et recommandations

Caractère fluctuant de la production photovoltaïque et impact sur l'équilibre offre-demande

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. Jusqu'à un certain niveau de développement du photovoltaïque (et de l'éolien), ces fluctuations ne sont pas supérieures à celles induites par les erreurs de prévisions de la demande. Toutefois, elles vont devenir de plus en plus importantes. 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 permettent de prédire, de façon de plus en plus fiable, la production photovoltaïque à court, moyen et long termes.

Malgré son caractère fluctuant, le PV pourrait contribuer à réduire la pointe de mi-journée de demande d'électricité. 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. Des études menées par l'ADEME sur la modélisation du réseau français métropolitain montrent ainsi que le développement du photovoltaïque jusqu'à 20 GW réduit le besoin de flexibilité journalière au niveau national, car il permet de contribuer à couvrir la pointe de consommation méridienne.

Un impact local sur le réseau de distribution à prendre en compte dans certaines configurations

Actuellement, en cas d'implantation forte des systèmes PV éloigné des postes de transformation dans des zones de faible consommation (souvent les zones rurales), la production PV peut avoir un impact sur le « plan de tension²⁴ » assuré par le gestionnaire du réseau de distribution, en générant des surtensions temporaires. Ces

²⁴ 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 initial.

contraintes nécessitent de recourir à un renforcement du réseau de distribution, présentant un surcoût pour le producteur ou le gestionnaire de réseau. Le choix de zones d'implantation propice ou le dimensionnement des installations au regard des niveaux de consommation locaux peut également permettre de diminuer cet impact. Des solutions techniques alternatives permettant de résoudre ces problèmes, comme la fourniture ou l'absorption de puissance réactive, sont d'ores-et-déjà utilisées dans certains pays, mais leur déploiement en France sur les installations de petite puissance nécessite une évolution de la réglementation. Pour les grandes installations raccordées en HTA, le gestionnaire de réseau peut envoyer des ordres aux producteurs pour régler à distance le niveau de puissance réactive des installations et ainsi mieux réguler le niveau de tension.

L'occupation des sols des centrales photovoltaïques

Pour être rentables, les centrales photovoltaïques au sol nécessitent une certaine surface (de 1 à 2 ha pour 1 MW²⁵), ce qui peut entraîner des conflits d'usage avec des terres agricoles ou forestières. 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, certains 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.

Ainsi, afin d'encadrer le développement de ces centrales, les projets d'une puissance supérieure à 250 kW sont soumis, depuis 2009²⁶, à un permis de construire, une étude d'impact et une enquête publique. En complément de cette réglementation spécifique, on peut souligner que les appels d'offres lancés par le gouvernement pour les centrales au sol octroient une notation préférentielle pour les candidatures proposant la réhabilitation ou la valorisation de friches.

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 de conversion. Une bonne conception maximisant la ventilation naturelle, notamment en sous face, ou encore l'utilisation de capteurs solaires hybrides photovoltaïques et thermiques sont des solutions envisageables. De façon

²⁵ La plus grande centrale au sol française en 2015 est la centrale de Cestas, de 300 MW pour une surface au sol de 300 ha.

²⁶ Décret 2009-1414 du 19 novembre 2009.

générale, la pose des systèmes nécessite une bonne coordination des différents corps de métier (isolation, couverture, électricité) et le recours à des professionnels bien formés, notamment les professionnels bénéficiant de la mention RGE (Reconnu Garant de l'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 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. Chaque technologie est caractérisée par des impacts très différents qu'il convient de prendre en compte dans leur globalité. A titre d'exemple, les filières couches minces peuvent se prévaloir d'un faible impact carbone liée à un procédé de fabrication peu consommateur d'énergie ; leur développement massif aurait toutefois un impact en termes d'utilisation de métaux rares (Tellure, Indium). Cette diversité des technologies PV permet toutefois à la filière PV d'envisager un développement pérenne dans la durée sans risquer un achoppement lié à une contrainte particulière d'approvisionnement en matériaux.

Les évolutions du dispositif de soutien en France

L'étude « Bilan, Prospective et stratégie pour la filière photovoltaïque », réalisée par l'ADEME en 2015 dresse un état des lieux de la politique de soutien française depuis 2002 et propose des pistes d'évolution. Le développement du PV devant progressivement s'avérer possible sans subvention autour de 2020, l'enjeu principal est de proposer une politique de soutien transitoire entre 2016 et 2020 qui permette une contribution significative au mix énergétique tout en limitant son coût pour la collectivité et en préparant les acteurs (équipementiers, industriels...) au marché « autonome » post-2020.

L'étude propose ainsi de mieux clarifier les objectifs des deux principaux outils utilisés jusqu'à présent : l'un, basé sur la CSPE, vise en premier lieu la production de volumes significatifs d'électricité à bas coût (via notamment les appels d'offres pour grandes installations); l'autre, basé sur un dispositif fiscal, vise le développement de filières à haute valeur ajoutée, à fort contenu en emplois locaux sur des niches de marché préfiguratrices du marché 2020 (par exemple produits à haute intégration énergétique au bâtiment).

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 "Démonstrateurs pour la Transition Energétique et Ecologique" 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 programme²⁷, trois se positionnent sur les technologies silicium cristallin, deux sur les technologies couches minces et hétérojonction²⁸, deux sur les technologies à concentration, un sur les matériaux d'encapsulation, un sur les systèmes de suivi de la course du soleil, deux sur les procédés d'intégration au bâti, et un sur la gestion de la puissance intégrée au module.

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

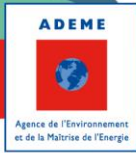
L'ADEME accompagne également la formation des professionnels pour garantir la bonne installation des systèmes PV. La mention RGE (Reconnu Garant Environnement), aide par ailleurs les particuliers à choisir des professionnels qualifiés pour l'installation d'équipements utilisant une source d'énergie renouvelable.

Promouvoir les technologies aux moindres impacts environnementaux

Dans le contexte d'un développement des énergies renouvelables à Haute Qualité Environnementale, l'ADEME mène, avec ses partenaires, des études visant à comparer les **performances environnementales** des technologies mises en œuvre au sein des systèmes

²⁷ Voir les fiches projets dans la rubrique « investissements d'avenir » du site ADEME : www.ademe.fr/investissements-davenir

²⁸ Technologie de cellule combinant un substrat en silicium cristallin et des couches minces de Silicium amorphe.



photovoltaïques²⁹. Ces études basées sur la méthodologie d'Analyse du Cycle de Vie, ont permis d'intégrer l'indicateur d'impact carbone comme un des critères d'évaluation des candidats aux appels d'offres de l'État pour la filière photovoltaïque. L'agence met également en place un référentiel méthodologique afin de standardiser le calcul des indicateurs d'analyse de cycle de vie. Elle participe actuellement aux travaux européens visant la mise en place d'un éco-label pour favoriser les modules PV éco-conçus dont l'empreinte environnementale sera la plus faible.

POUR EN SAVOIR PLUS

Publications

- [Etude technico-économique filière photovoltaïque française : bilan, perspectives et stratégie](#), ADEME, sept 2015
- [Le photovoltaïque en France en 2014](#), rapport rédigé pour le Programme photovoltaïque de l'Agence Internationale de l'énergie, ADEME, juin 2015
- [Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau. Guide de recommandations à destination des maîtres d'ouvrage](#). Avril 2015
- [Photovoltaïque et collectivités territoriales. Guide pour une approche de proximité](#). Octobre 2014
- [Feuille de route](#) sur l'électricité photovoltaïque, 2011

Sites Internet

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

²⁹ Projet ESPACE (www.espace-pv.org).

Avis de l'ADEME

Le photovoltaïque est une composante importante des politiques énergétiques et climatiques.

La filière progresse régulièrement et rapidement en termes d'efficacité et de baisse des coûts, grâce aux efforts de recherche et aux retours d'expérience du marché. La France dispose par ailleurs d'instituts à la pointe de la recherche et d'acteurs industriels parmi les leaders mondiaux sur leurs segments de 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. L'ADEME se positionne en outre pour un **renforcement de la coopération entre les acteurs européens**, afin d'accélérer la mise en œuvre des innovations et permettre un positionnement compétitif d'une offre industrielle intégrée européenne photovoltaïque.

Même si le soutien public aux **centrales au sol** dans le Sud de la France permet de mener une politique de déploiement du photovoltaïque à moindre coût pour la collectivité, leur développement doit s'envisager dans la durée et de façon concertée en prenant en compte l'emprise au sol de ces centrales, la capacité d'absorption du réseau ou encore les évolutions potentielles de perceptions et d'acceptabilité sociale. L'exploitation des grandes toitures (entrepôts, bâtiments commerciaux ou industriels) qui représentent un gisement très important, constitue à cet effet une alternative qui doit être également encouragée pour permettre l'atteinte des objectifs de puissance installée à moyen-long terme.

Si le développement du surimposé est privilégié dans la plupart des pays car il permet de limiter le coût de déploiement des installations, **l'intégration au bâti** a une pertinence économique dans le secteur du bâtiment neuf et constitue toujours une opportunité de créer de la valeur ajoutée de la conception à l'installation des procédés photovoltaïques spécifiques ; elle permet en outre aux industriels de se positionner dès aujourd'hui dans l'optique du Bâtiment à Energie Positive (BEPOS).

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 sur les **réseaux et systèmes électriques intelligents**.