



FICHE N° 4

PHOTOVOLTAÏQUE

## Photovoltaïque

### Présentation du photovoltaïque

#### Définition

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) est une énergie électrique produite à partir du rayonnement solaire (direct et diffus) à l'aide de panneaux PV. Ces panneaux sont constitués de cellules photovoltaïques connectées entre elles. Les cellules utilisent l'effet photovoltaïque pour convertir la lumière en courant électrique continu. Celui-ci doit ensuite être converti en courant alternatif par un onduleur avant son utilisation sur le réseau électrique.

#### Les technologies du photovoltaïque

Les cellules sont fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs et plusieurs technologies se distinguent :

- Les modules en silicium poly ou monocristallin, ou en ruban
- Les modules en couches minces avec d'autres matériaux : silicium amorphe, tellure de cadmium, alliages de Cuivre Indium Sélénium dans une moindre mesure au gallium et aux polymères organiques

Les modules silicium sont actuellement les plus répandus parmi les technologies photovoltaïques grâce à :

- un rendement supérieur aux autres technologies
- une durée de vie élevée allant jusqu'à 30 ans
- une maturité industrielle illustrée par une capacité de fabrication largement supérieure aux autres technologies. Cet avantage rassure particulièrement les investisseurs, qui cherchent des fabricants capables de livrer des panneaux en grande quantité.
- un coût de production bas, concurrencer seulement pas le CdTe. Cependant la filière CdTe souffre des deux inconvénients : le risque de toxicité lié à la présence du cadmium et une capacité de fabrication limitée à quelques producteurs au niveau mondial)

On distingue deux technologies de silicium :

- Les modules **polycristallins** : dont le matériau est bon marché, et le rendement de près de 15 %
- Les modules **monocristallins** : ayant des cellules élaborées à partir d'un bloc de silicium très pur, formé d'un seul cristal. Le procédé industriel pour l'obtenir est relativement consommateur d'énergie et coûteux, mais il permet d'obtenir des cellules à haut rendement (environ 20 %) <sup>89</sup>.

<sup>89</sup> Rapport entre la puissance électrique de sortie et la puissance lumineuse incidente



Jusqu'à récemment, le polycristallin offrait le meilleur coût de production unitaire d'un kWh électrique. Cependant, des améliorations sur le procédé de fabrication des cellules monocristallines ainsi qu'un effet d'échelle ont permis de réduire les coûts. Aujourd'hui, les deux types de module se partagent le marché grâce à des coûts de production d'électricité très proches.

La technologie de **couches minces** a été initialement développée comme alternative aux panneaux silicium coûteux à l'époque. Les modules en couches minces sont moins coûteux mais également moins performants. Le développement rapide de la filière silicium (réduction de coût et capacité de fabrication importante) ajouté à la difficulté d'augmenter les rendements des cellules en couches minces ont donné l'avantage coût au silicium. Les couches minces sont aujourd'hui limitées à des applications de niche (revêtement pour bâtiment, surface non-plate, etc.).

### **Les différentes installations en exploitations agricoles**

Différents types d'installations PV existent pour le secteur agricole et sont, des plus au moins répandues :

- Posées sur ou intégrées aux toitures des bâtiments agricoles (hangars par exemple) : on parle généralement des moyennes et grandes toitures allant de 3 kWc (~20 m<sup>2</sup>) à 100 kWc (~600 m<sup>2</sup>)<sup>90</sup>.
- Centrales au sol : Sauf exceptions, elles ne peuvent pas être installées sur des surfaces agricoles en production. Dans quelques cas, centrales PV et production agricole coexistent sur le même terrain ; Souvent la production agricole a été ajoutée à posteriori.
- Serres à parois fermées
- Serres à parois ouvertes (ou en filet ou film plastique).

On parle d'agrivoltaïsme lorsque le projet permet de coupler une production photovoltaïque secondaire à une production agricole principale en permettant une synergie de fonctionnement démontrable : les panneaux sur serre peuvent par exemple être munis d'un système de pilotage qui module la production photovoltaïque en fonction des besoins en ensoleillement des cultures.

### **Serres agricoles photovoltaïques<sup>91</sup> (parois fermées)**

Les projets de serres-PV consistent à intégrer, sur la structure d'une serre, des modules PV pour produire de l'électricité.

La mise en place de modules PV sur la serre, génère une baisse de l'intensité lumineuse à l'intérieur de la serre (10 à 40%) et donc une perte de rendement équivalente pour certaines cultures<sup>92</sup>. Il est a priori nécessaire de limiter les projets PV aux cultures avec des besoins en lumière réduits ou de réaliser des projets innovants couplant production agricole et production photovoltaïque (agrivoltaïsme). Des expérimentations ont été réalisées sur un axe Nantes-Bordeaux-Toulouse-Nice<sup>93</sup>. De nombreuses cultures ont montré un bon comportement sous serres PV : Courgettes, Aubergines, Poivrons, Concombres, Asperges, Navet, Brocolis, laitues batavia avec éventuellement des pertes de rendements mais faibles. Les melons ont montré des taux de sucres affaiblis et les essais sur tomates et laitues rouges n'ont pas été concluants.

Les serres existantes sont généralement incompatibles avec l'installation de panneaux PV :

- L'aération de la serre est un facteur important de productivité dans les serres, qu'il faut pouvoir maîtriser pour la gestion du chauffage et du climat et prévenir l'apparition de maladies. L'insertion de modules en toiture peut alors devenir un obstacle technique majeur pour la gestion des ouvrants.

<sup>90</sup> Considérant un rendement moyen théorique de 16% pour illustration seulement

<sup>91</sup> Serres agricoles photovoltaïques. Les avis de l'ADEME. Novembre 2010.

<sup>92</sup> Cockshull et al., Journal of Horticultural science, 1992.

<sup>93</sup> Serres photovoltaïques en France : premiers retours sur les productions électrique et agricole. Techniques serre photovoltaïque. CTIFL, 2016.

- Afin d'optimiser la production électrique, les modules doivent être orientés vers le sud, ce qui contraint l'exploitant à orienter sa serre en ouest-est. En région méditerranéenne, ce principe peut poser problème car les contraintes liées à l'aération et à la tenue de la structure au vent imposent une orientation nord-sud.
- Par ailleurs, les structures des serres existantes ne sont pas adaptées pour supporter la pose de panneaux.

Ainsi pour améliorer la synergie entre production agricole et photovoltaïque, des efforts de Recherche et développement sont encore nécessaires. Par exemple, Afin de laisser passer la lumière, les modules peuvent être « semi-transparents » : avec des cellules laissant passer une partie de la lumière entre elles, ou avec des couches minces en partie transparentes. Cette technologie doit être optimisée dans le cadre de la production agricole.

### **Centrales photovoltaïques et parcs agri-solaires**

Les centrales consistent en un alignement de panneaux PV standards au sol montés sur châssis fixes ou mobiles suivant alors la course du soleil.

Ces centrales nécessitent un investissement de taille, mais leur échelle permet de bénéficier de tarifs avantageux sur l'achat des capteurs (généralement moins de 1€/Wc). De plus leur technologie est mature et la bonne ventilation des capteurs du fait de leur installation permet une performance optimale. L'installation permet aussi une accessibilité et une maintenance facilitée, leur raccordement au réseau est optimisé.

Le développement de cette solution sur des terres agricoles est sujet à débat du fait de la mise en concurrence avec la production agricole ou forestière des terrains sur lesquels les centrales sont implantées. Néanmoins, elles peuvent l'être sur des terrains à faible valeur agronomique. Dans certains contextes pédoclimatiques elles peuvent bénéficier à la production, fourragère par exemple, de par l'ombre apportée, et permettre le maintien de l'activité de pâturage ou d'apiculture. Ainsi les cahiers des charges des trois AOs CRE, faisant référence à l'article L. 151-11 du code de l'urbanisme, indiquent clairement que « *les centrales au sol ne peuvent être autorisées que dès lors qu'elles ne sont pas incompatibles avec l'exercice d'une activité agricole, pastorale ou forestière sur le terrain sur lequel elles sont implantées et qu'elles ne portent pas atteinte à la sauvegarde des espaces naturels et des paysages* ». D'autre part, les cahiers des charges semblent favoriser toute activité complémentaire à la production photovoltaïque, dont l'activité agricole.

### **Les principales exploitations concernées**

Les exploitations agricoles concernées dépendent fortement du type d'installation PV :

- Les installations sur toitures : les exploitations agricoles disposent d'un gisement photovoltaïque conséquent grâce à des surfaces de toitures disponibles importantes. Par exemple, les exploitations en grandes cultures et polycultures disposent de hangars pour stocker les machines et les récoltes ; les exploitations d'élevages en général disposent de grands bâtiments pour les animaux en stabulation ou pour stocker le fourrage.
- Les centrales PV requièrent des surfaces importantes pour permettre des coûts de production intéressants. Elles sont rarement installées sur des surfaces à bonne valeur agronomique mais plutôt sur des zones de pâturages (tout type d'exploitations d'élevages sauf élevage hors sol). Quelques essais d'installation sur zone de vignoble sont à noter. Cependant, les centrales PV sont mal acceptées par le milieu agricole sauf sur des terres quasiment improductives (affleurements rocheux...). En zones méridionales ou en Outremer, des centrales – ombrières peuvent au contraire apporter un effet régulateur utile pour la culture.
- Les installations de serres PV concernent les filières de maraichage<sup>94</sup>.

### **Le rôle de l'agriculteur**

<sup>94</sup> Voir encadré « serres agricoles photovoltaïques »

L'agriculteur peut avoir deux rôles principaux dans le cadre d'installations PV :

- Il fait profiter de ses surfaces de terres ou de toits, moyennant un loyer, à une société projet qui exploite les panneaux PV installés
- Il est lui-même investisseur (généralement seul, anecdotiquement à plusieurs) et valorise directement l'électricité générée. La chaleur, coproduit de la production d'électricité peut en effet être utilisée, par exemple dans le cas de séchage de fourrage en grange.

S'il est investisseur, il sera très impliqué dans le montage du projet dont les étapes sont décrites figure ci desous.

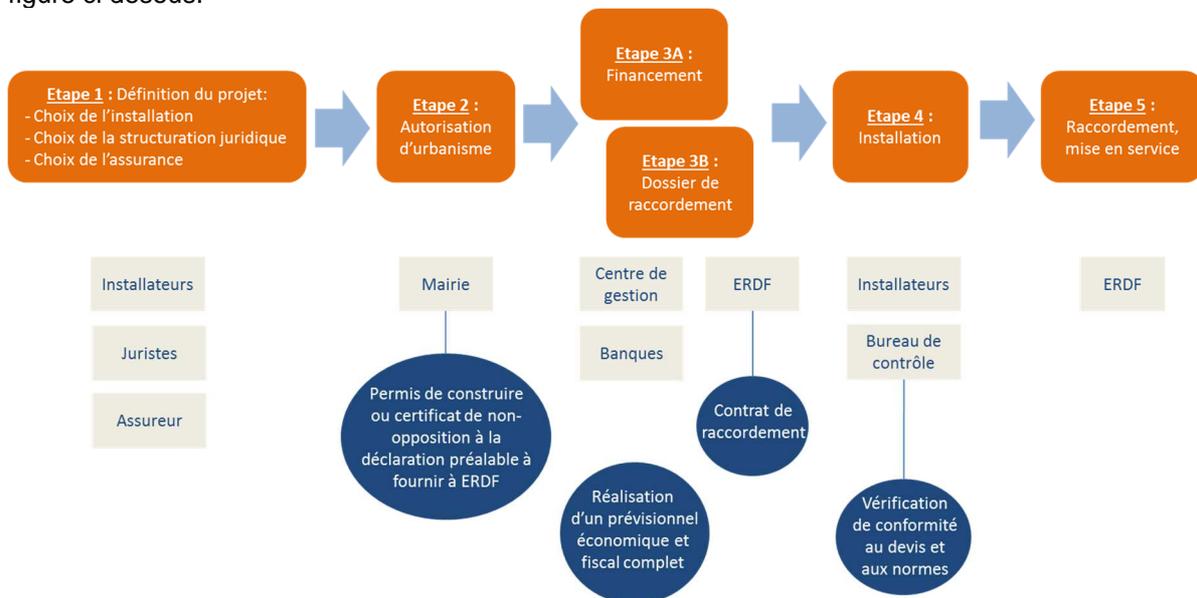


Figure 60 : Les étapes d'un projet d'installation de panneaux photovoltaïques<sup>95</sup>

### Chiffres clés du photovoltaïque en France et perspectives d'évolutions

En 2015, la puissance totale installée en solaire photovoltaïque a représenté 6 500 MW<sup>96</sup>, année choisie dans la première phase de chiffrage de cette présente étude (6 772 MW en fin 2016 selon RTE). La programmation pluriannuelle de l'énergie, basée sur une puissance installée de 5 300 MW en 2014, a prévu une augmentation de cette puissance à 10 200 MW en 2018 et à environ 19 200 MW en 2023. La production d'énergie photovoltaïque devrait donc augmenter fortement dans les prochaines années.

En 2015, le secteur agricole a été responsable de 13% de la production totale (cf. résultats chapitre 1). Ce secteur dispose d'un potentiel important de par sa surface importante de toiture sur les bâtiments d'élevages, de stockage de matériel, de foin... Le secteur possède un foncier important pouvant accueillir des centrales au sol photovoltaïques de grande puissance. L'installation de ces dernières est néanmoins contestée car elle entre en compétition avec la production alimentaire.

L'arrêté tarifaire publié le 10 mai 2017 a introduit deux changements majeurs pour les installations PV en toiture < 100 kWc :

- La suppression à court terme de la prime aux installations intégrées au bâti (IAB) et en contrepartie la création d'un tarif valable pour toutes installations sur bâtiment, y compris en surimposition (basée sur une revalorisation de l'ancien T5 qui était destiné à tout type d'installation mais largement en dessous du coût de production en toiture et même en petite et moyenne centrale au sol). Le surimposé étant moins complexe à mettre en œuvre et par conséquent moins cher à installer, cela devrait inciter les agriculteurs à investir dans le PV ;

<sup>95</sup> Guide ADEME « l'énergie photovoltaïque » 2012

<sup>96</sup> Tableau de bord : solaire photovoltaïque, SDES

- La création d'un cadre juridique et tarifaire pour l'autoconsommation. Ainsi, le producteur d'électricité photovoltaïque a le choix aujourd'hui de faire des économies de facture d'électricité grâce à sa production renouvelable et vendre le surplus non-autoconsommé au réseau à un tarif d'achat.

Ces changements multiplient les choix pour les agriculteurs et pourraient les inciter à investir prochainement dans des installations PV en toiture.

<b>Politiques d'incitation</b>			
<b>Régime d'aide</b>	<b>Type de mesure</b>	<b>Description de la mesure</b>	<b>Date de début et de fin de la mesure</b>
<b>Tarifs d'achat de l'électricité</b>	Financière	<p>L'Etat Français garantit l'achat de toute la production d'électricité renouvelable par EDF ou une entreprise locale de distribution à travers le principe d'obligation d'achat. De plus, l'électricité renouvelable est achetée à un prix supérieur à celui des énergies électriques conventionnelles afin de garantir la rentabilité des installations électriques renouvelables. La différence entre le prix d'achat élevé de l'électricité renouvelable et le prix moyen de l'électricité conventionnelle est financée par le budget de l'Etat, à travers le Compte d'Affectation Spéciale « transition énergétique », alimenté par la TICPE et la TICC (charbon)..</p> <p><i>L 314-1 du code de l'énergie, le décret n°2001-410 du 10 mai 2001</i></p>	2000 --> aujourd'hui
<b>Complément de rémunération</b>	Financière	<p>Dispositif qui vise à remplacer le tarif d'achat de l'électricité renouvelable pour les grandes installations (parc solaire de &gt; 500 kW) dans le cadre des appels d'offres notamment. Le principe reste le même, un dispositif d'aide garantit un prix d'achat supérieur au prix moyen du marché. La seule différence est que le producteur doit vendre son énergie directement sur le marché.</p>	2017--> aujourd'hui
<b>Appels à projets/appels d'offre</b>	Financière	<p>Dispositif qui vise à cadrer (inciter mais aussi contrôler les capacités installées dans l'absence d'un tarif d'achat dédié) le développement des grandes centrales photovoltaïques en attribuant à des projets lauréats un tarif d'achat (jusqu'à 500 kWc) ou un complément de rémunération. Le ministère de l'énergie lance un appel d'offre spécifiant les capacités demandées, les candidats proposent leurs projets ainsi que les prix qu'ils souhaitent recevoir pour leur production. La Commission de Régulation de l'Energie (CRE) instruit les dossiers de candidature et le ministre de l'énergie sélectionne ensuite les offres les plus adéquates principalement selon divers critères économiques, environnementaux, etc.</p>	2005 --> aujourd'hui

		Fin 2016, 353 projets ont par exemple été retenus dans le cadre du 3 <sup>e</sup> appel d'offres pour développer les installations PV de moyenne puissance (100 à 250 kilowatts crête). Ils bénéficieront en moyenne d'un tarif d'achat de 131,25 €/MWh.	
<b>Arrêté tarifaire</b>	<b>Financière</b>	Dispositif qui vise à inciter le développement des projets photovoltaïques de faible puissance (inférieure à 100 kWc), en leur attribuant un tarif d'achat de l'électricité produite. Les tarifs d'achat sont actuellement régis par l'arrêté tarifaire du 9 mai 2017.	2000 --> aujourd'hui
<b>Garantie d'origine</b>	Réglementaire	Les garanties d'origine sont un document électronique qui permet de prouver qu'une certaine quantité d'énergie est d'origine renouvelable. Depuis mai 2013, les producteurs peuvent émettre ces garanties auprès de Powernext, en sa qualité de gestionnaire du Registre national des garanties d'origine en France. Ce dispositif permet ensuite à des fournisseurs, indépendamment de leurs sources d'approvisionnement, de vendre des quantités d'énergie « vertes » à leurs clients en la rachetant auprès des producteurs d'énergie renouvelable. La vente des garanties d'origine constitue ainsi un revenu supplémentaire pour le producteur.  <i>Ordonnance n° 2011-1105 et arrêté du 15 janvier 2013</i>	2011 --> Aujourd'hui
<b>Amortissement dégressif</b>	Fiscale	Des équipements de production d'énergies renouvelables peuvent faire l'objet d'un amortissement dégressif. Le bien est amorti plus rapidement que dans le cas d'un amortissement linéaire (sur la durée de vie économique).  <i>Article 39 AA et 39 AB du code général des impôts (CGI)</i>	2002 --> aujourd'hui

Description des différents modèles d'affaires de photovoltaïques agricoles						
Type d'EnR	Type d'installation	Investissement	Exploitation	Valorisation	Nom du modèle	Développement du modèle
PV	Centrale au sol	Investissement extérieur	Société de projet	Location de terre et production agricole en parallèle	1-Centrale au sol - location terre	Assez répandu
		Agriculteur est l'un des actionnaires	Société de projet	Location de terre, production agricole en parallèle et dividendes	2-Centrale au sol - agriculteur investisseur	Peu répandu
	Moyenne/ Grande toiture	Agriculteur	Agriculteur	Vente d'électricité au réseau	3-Vente électricité, grande toiture	Très répandu
		Agriculteur	Agriculteur	Autoconsommation partielle	4-Autoconsommation, grande toiture	Peu répandu
		Investissement extérieur	Développeur/ installateur PV	Location de surface de toit	5-Location de grande surface de toit	Assez répandu
		Investissement extérieur	Développeur/ installateur PV	Construction de bâtiment par le développeur	6-Location de terrain	Assez répandu
	Petite toiture	Agriculteur	Agriculteur	Vente d'électricité au réseau	7-Vente électricité, petite toiture	Très répandu
		Agriculteur	Agriculteur	Autoconsommation partielle	8-Autoconsommation, petite toiture	Peu répandu
	Serre photovoltaïque	Agriculteur	Agriculteur	Vente d'électricité au réseau	9-Serre photovoltaïque	Peu répandu

**Tableau 17** : Listing des modèles d'affaires existants. Le modèle d'affaire surligné est étudié plus en détail par la suite.

Les différents modèles d'affaires existants pour le photovoltaïques sont d'abord distingués par le type d'installation : centrale au sol, sur toiture moyenne/grande et petite, serre photovoltaïque qui pourrait être considérée comme un sous-type d'installation de grande/moyenne toiture.

Pour les centrales au sol, soit l'agriculteur loue simplement sa terre substituant ou pas les cultures présentes (modèle 1) à la société de projet s'occupant du reste ; soit en plus de cela il investit dans la société de projet auquel cas il touche des dividendes en plus (modèle 2). Pour les installations sur toitures de moyennes/grandes surfaces : soit il vend l'électricité (modèle 3), soit il autoconsomme (modèle 4). Il peut également louer la surface de ses toits à une société de projet (modèle 5) ou louer son terrain à une société qui va construire le bâtiment et installer les panneaux, l'agriculteur bénéficiant alors des revenus de location et d'un bâtiment construit (modèle 6). Dans le cas d'installations de petites toitures, on retrouve les modèles de vente d'électricité (modèle 7) et d'autoconsommation (modèle 8). Enfin, existe un modèle d'installation de panneaux sur serres permettant la vente d'électricité (modèle 9).

Les modèles sur toitures sont assez répandus, en particulier les modèles de vente d'électricité (3 et 7). Les centrales au sol où l'agriculteur n'est impliqué que par son terrain (modèle 1) sont assez répandues, tandis que celles où il participe à l'investissement (modèle 2) le sont peu. Les modèles de serres PV sont peu répandus à l'heure actuelle.