

# Le photovoltaïque





# 1. Les objectifs et état des lieux de la filière

	Horizon	Objectifs européens	Objectifs français
Paquet énergie climat	2020	Porter la part des énergies renouvelables à 20 % de la consommation finale d'énergie de l'UE Réduire de 20 % la consommation d'énergie par rapport à 2005	Porter la part des énergies renouvelables à 23 % de la consommation finale d'énergie et à 27 % de la consommation finale brute d'électricité Porter la part des énergies renouvelables à 33 % de la consommation finale de chaleur et de froid Puissance totale photovoltaïque installée : 5400 MW, réévaluée à 8000 MW
	2030	Porter la part des énergies renouvelables à 27 % de la consommation finale d'énergie de l'UE Réduire de 27 % la consommation d'énergie par rapport à 2012	Porter la part des énergies renouvelables à 32 % de la consommation finale d'énergie et à 40 % de la production d'électricité Réduire la consommation énergétique primaire d'énergies fossiles de 30 % par rapport à 2012 Réduire la consommation finale d'énergie de 20 % par rapport à 2012
	2050		Réduire la consommation énergétique finale de 50 % par rapport à 2012
PPE	2018 (31 décembre)		Puissance totale photovoltaïque installée : 10 200 MW
	2023 (31 décembre)		Production d'énergie de chaleur et de froid renouvelables et de récupération à partir de biomasse : • Option basse : 13 000 ktep • Option haute : 14 000 ktep Puissance totale photovoltaïque installée : • Option basse : 18 200 MW • Option haute : 20 200 MW

## Chiffres clés de la filière en 2016

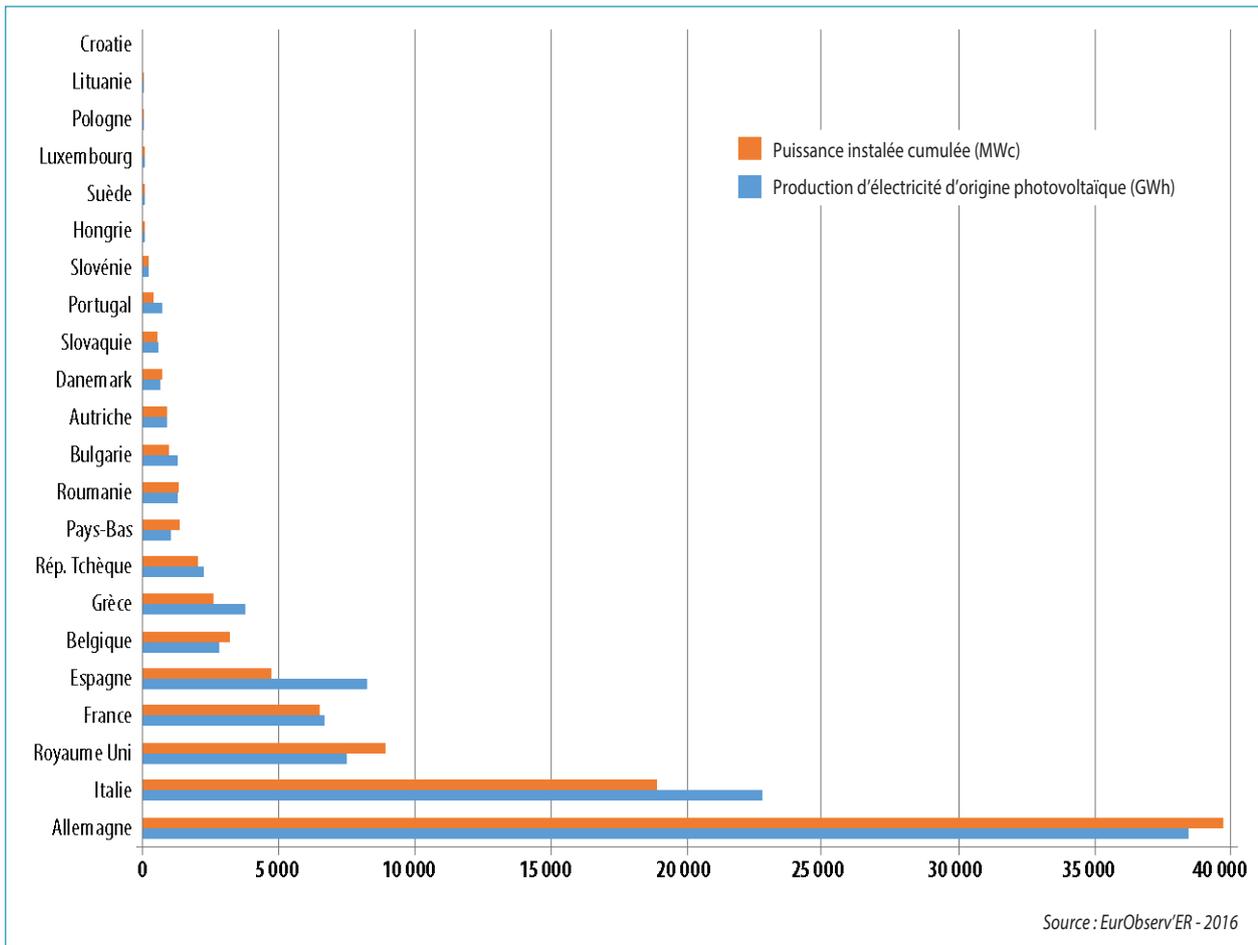
- La capacité installée est de 7 134 MW, dont 571 MW sur le réseau de RTE, 5 763 MW sur celui d'Enedis, 321 MW sur les réseaux des ELD et 367 MW dans les zones non interconnectées.
- L'électricité produite par la filière solaire atteint près de 7,7 TWh.
- Le cumul de la puissance installée et en développement s'élève à 9 051 MW, soit 88,7 % de l'objectif national fixé pour l'horizon 2018 (66 % sans prendre en compte les projets en développement).
- Le facteur de charge solaire s'élève en moyenne à 14,3 %.
- L'énergie photovoltaïque couvre 1,7 % des besoins français en électricité et représente 8,7 % de la production d'énergie renouvelable.

En 2015, la production d'électricité photovoltaïque de l'Union européenne était estimée à 100,5 TWh, en hausse de 9,1 % par rapport à 2014. La puissance photovoltaïque raccordée au sein de l'Union européenne était de 94 241 MWc, soit près de 41,5 % de la puissance installée au niveau mondial. Le photovoltaïque dans la production d'électricité européenne représente près de 3 % de la production électrique.

La France, avec une production électrique photovoltaïque d'environ 6,7 TWh en 2015, était le cinquième producteur derrière l'Allemagne, l'Italie, l'Espagne et le Royaume-Uni.

Fin 2016, la puissance des projets photovoltaïques en développement était de l'ordre de 2,3 GW.

La part du photovoltaïque dans la production d'électricité française d'origine renouvelable représentait fin 2016 près de 8,7 % de la production électrique.



Parc solaire de Jännersdorf dans le lander de Brandebourg en Allemagne développe une puissance maximale de 40,5 MW (source : wikipédia)



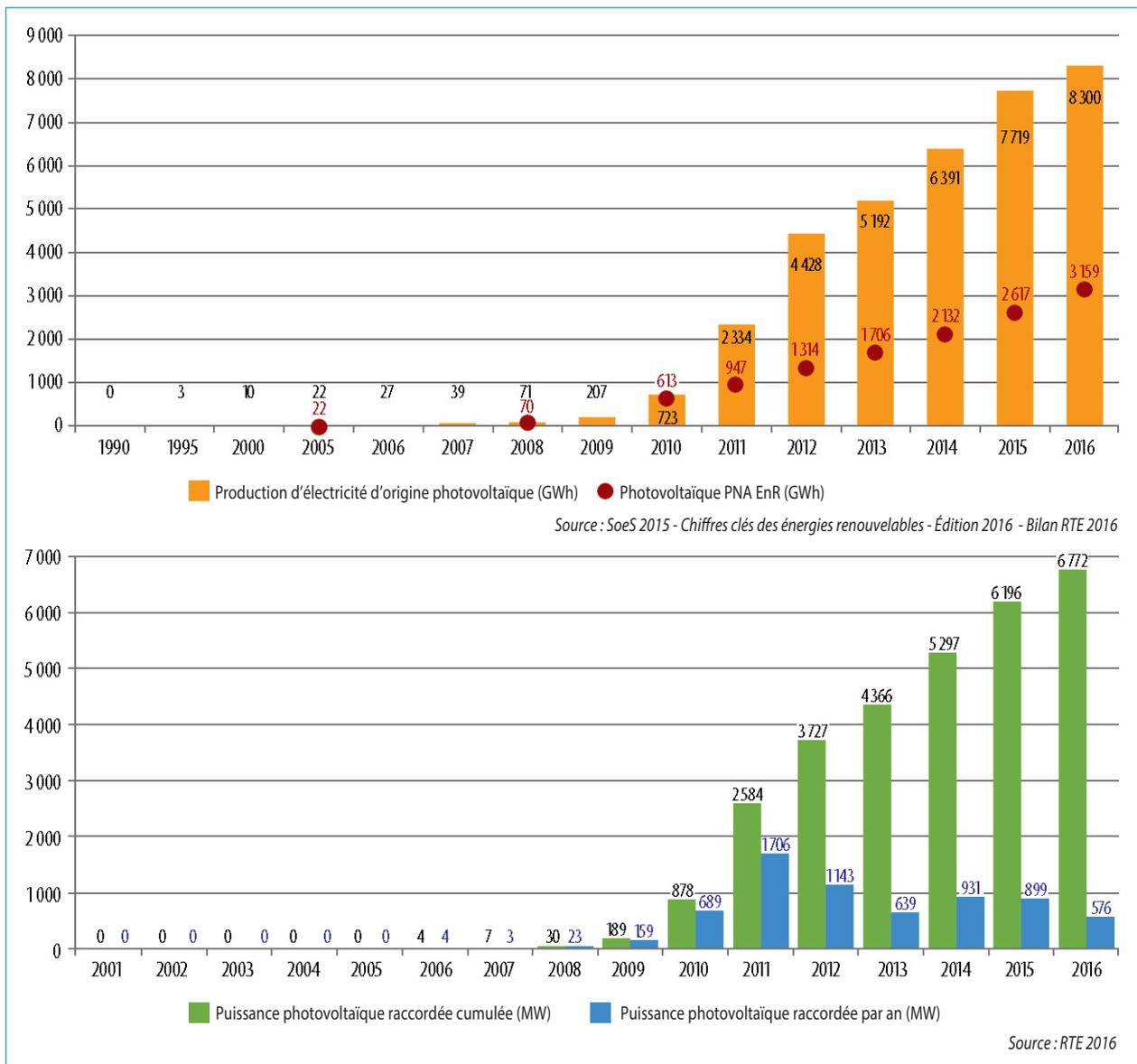
Centrale photovoltaïque de 13,5 MW située à Wedgehill, au Royaume-Uni, mise en service en décembre 2014 (source : lechodusolaire.fr)



Parc photovoltaïque de l'autoroute Catane-Syracuse en Sicile d'une puissance totale de 13,2 MG raccordé au réseau moyenne tension (source : pizzarotti.it)



Eco-village de BedZed à London (source : vanalen.org)

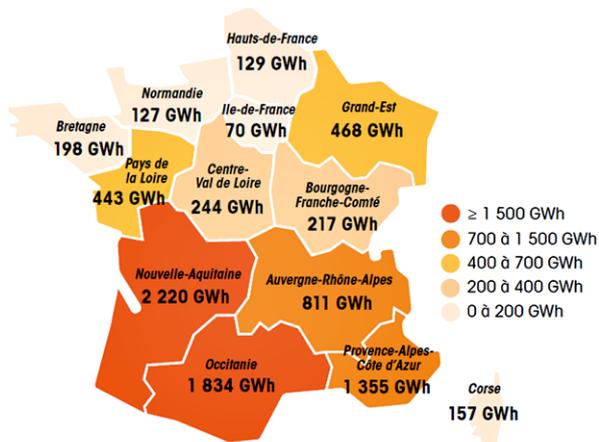


En 2016, la filière photovoltaïque était la troisième filière contributrice à l'objectif 2020 en terme de production d'électricité renouvelable, derrière les filières hydraulique et éolienne.

La progression de la puissance installée du parc photovoltaïque a été importante en 2009, 2010 et 2011, grâce aux tarifs d'achat élevés avant de connaître un fort ralentis-

sement les deux années suivantes, suite à la mise en place d'un moratoire sur les tarifs d'achat au cours du premier trimestre 2010.

Le parc métropolitain a progressé de 9 % par rapport à 2015 avec 576 MW raccordés en 2016. Il s'agit en revanche du plus faible volume annuel enregistré depuis 2009, qui s'explique par l'historique des appels d'offres.



Source : RTE - 2016

Les régions Provence-Alpes-Côte d'Azur, Occitanie et Nouvelle-Aquitaine concentrent à elles seules 65 % de la production électrique photovoltaïque nationale.

Du fait d'un ensoleillement limité et d'une puissance installée moins importante, la production d'énergie des régions situées dans le Nord de la France est relativement faible.

Cette production électrique sur l'ensemble du territoire couvre la consommation énergétique d'un peu plus d'un million de foyers.

Enfin, le facteur de charge des installations photovoltaïques varie, selon les régions, entre 9,7 % pour l'Île-de-France et 16,8 % pour la région Provence-Alpes-Côte d'Azur (hors DOM).



Inaugurée en décembre 2015, la ferme solaire de Cestas (Gironde), la plus importante d'Europe. D'une puissance de 300 MW, elle peut alimenter la consommation électrique annuelle de 300 000 personnes (source : Ademe)



Le parc « agri-solaire » d'Ortaffa (Pyrénées-Orientales) permet de produire 25 mégawatts et d'alimenter l'équivalent de 15 000 habitants en électricité. Il allie production d'énergie solaire et activités agricoles (source : lafranceagricole.fr)



Au cœur des Alpes de Haute-Provence, à proximité du village de Curbans, cette centrale de 145 000 panneaux solaires produit chaque année 33 millions de kWh, soit l'équivalent de la consommation électrique annuelle de 10 500 foyers. En plus d'une économie de 90 000 tonnes de CO<sub>2</sub>, cette centrale a réussi le pari de préserver l'écosystème environnant (source : Engie.fr)

## 2. Les mécanismes de soutien financier

### Mode d'attribution : Appels d'offre et guichet ouvert

#### Appels d'offre

L'instruction des appels d'offres pour la réalisation et l'exploitation d'installations photovoltaïques est réalisée par la Commission de régulation de l'énergie (CRE). Le ministre en charge de l'énergie désigne les lauréats après avis de la CRE.

Plusieurs appels d'offres photovoltaïques instruits par la CRE ont, jusqu'à présent, été lancés et permis d'attribuer près de 2600 MWc au sol et sur bâtiment (puissance minimale de 100 kWc). Les critères de notation prennent en compte le prix, l'impact environnemental, l'innovation, etc. Les Zones Non Interconnectées (ZNI) comprenant la Corse et les DOM font l'objet d'appels d'offres photovoltaïques spécifiques.

CRE 1 (2011)	CRE 2 (2013)	CRE 3 (2014)	AO Simplifié (2015)	CRE 4 (2016)	AO Bâti (2016)
					
P <sub>retenue &lt; 250 kWc</sub> : 145 MWc P <sub>retenue &gt; 250 kWc</sub> : 520 MWc	122 MWc 380 MWc	800 MWc	240 MWc	P <sub>[5 ; 17 MWc]</sub> P <sub>[0,5 ; 5 MWc]</sub>	AO triennal en cours 3000 MW à attribuer au sol et 1350 MW sur bâti P <sub>retenue</sub> : 534,8 MW P <sub>[100 ; 500 kWc]</sub> P <sub>[0,5 ; 8 MWc]</sub>

#### Focus sur l'appel d'offres CRE4

- 1<sup>er</sup> AO triennal pour la filière photovoltaïque.
- 3 familles de candidature : Famille 1 (Installations au sol de puissance comprise entre 5 MWc et 17 MWc) ; Famille 2 (Installations photovoltaïques au sol de puissance comprise entre 500 kWc et 5 MWc) ; Famille 3 (Installations sur ombrières de parking de puissance comprise entre 500 kWc et 10 MWc).
- 6 périodes de candidatures jusqu'en 2019 avec une puissance retenue par période de 500 MWc.
- 79 lauréats désignés pour la première période le 09 mars 2017, avec un prix moyen de 70,6 €/MWh.
- 60 % des lauréats de la première période se sont engagés à l'investissement participatif.

#### Guichet ouvert

La loi du 10 février 2000 relative à la modernisation et au développement du service public de l'électricité prévoyait que les installations de production d'énergie renouvelable de puissance inférieure à 12 MW bénéficient de l'obligation d'achat, par EDF ou les distributeurs non nationalisés, de l'électricité produite. Ils étaient donc tenus de conclure avec les porteurs de projets un contrat d'obligation d'achat de l'électricité via la procédure du « guichet ouvert ».

Ce mode d'attribution est désormais limité aux installations photovoltaïques sur bâti et ombrières de puissance inférieure à 100 kWc. Les installations au sol en sont exclues.

## Dispositifs de soutien : Tarif d'achat et complément de rémunération

### Tarif d'achat

Suite à la parution du décret 2016-682 daté du 27 mai 2016 sur les installations bénéficiant du complément de rémunération, les tarifs d'achat se limitent aux installations photovoltaïques sur bâti et ombrières d'une puissance inférieure à 100 kWc et aux installations sur bâti de puissance comprise entre 100 et 500 kWc lauréates de l'appel d'offre bâti 2016.

L'arrêté tarifaire se substituant à l'arrêté du 4 mars 2011 a été publié le 10 mai 2017. Deux tarifs d'achat sur 20 ans ont été définis, l'un pour des  $P < 9$  kWc et l'autre pour  $9$  kWc  $< P < 100$  kWc. Il distingue les installations vendant la totalité de l'électricité produite et les installations autoconsommant une partie de l'électricité. Il est également annoncé la disparition progressive de la prime d'intégration du bâti (30 septembre 2018) et l'allocation progressive du principe d'éco-conditionnalité.

Enfin, les installations en autoconsommation choisissant la vente en surplus bénéficient d'une prime à l'investissement dont le montant, proportionnel à la puissance installée, est versé pendant les 5 premières années de fonctionnement de l'installation.

### Complément de rémunération

Le complément de rémunération, introduit par la LTECV et précisé par le décret 2016-682 du 27 mai 2016, consiste en une prime versée mensuellement au producteur d'électricité titulaire d'un contrat de complément de rémunération avec EDF, les ELD ou des organismes agréés.

Cette prime est proportionnelle à l'énergie produite et égale à la différence entre un tarif de référence et un prix de marché de référence. En venant ainsi compléter le revenu de la vente directe d'électricité produite sur le marché, ce mécanisme vise à terme tout dispositif de soutien.

Les nouvelles installations de cogénération biomasse de puissance inférieure à 300 kWc n'en bénéficieront pas.

Filière	Guichet ouvert avec tarif d'achat (arrêté)	Appel d'offres avec tarif d'achat	Appel d'offres avec prime de complément de rémunération
Centrale au sol	Supprimé	Supprimé	500 kWc $< P \leq 17$ MWc
Centrale sur bâti	$P < 100$ kWc	100 kWc $< P < 500$ kWc	500 kWc $< P \leq 8$ MWc
Ombrière de parking	$P < 100$ kWc	100 kWc $< P < 500$ kWc	500 kWc $< P \leq 10$ MWc

### 3. Les technologies

Nature de la cellule	Description	Matériau	Rendement	Commentaires
Cellules Silicium cristallin 1 <sup>ère</sup> génération (bâti ou au sol)	Cellules constituées de fines plaques de silicium	Monocristallin	16 à 21 %	Le silicium monocristallin présente un meilleur rendement que le silicium multicristallin mais son coût de fabrication est plus élevé
		Polycristallin	14 à 15 %	
Cellules couches minces 2 <sup>ème</sup> génération (bâti)	Technologie consistant à déposer des couches semi-conductrices et photosensibles sur un support de verre, de plastique ou d'acier (souple ou rigide)	Diséléniure de cuivre et d'indium (Cis)	5 à 13 %	Technologie mature permettant de baisser les coûts mais avec un rendement moindre. Technologie en fort développement
		Tellurure de cadmium (Cdte)		
		Amorphe		
Cellules organiques 3 <sup>ème</sup> génération (bâti)	Films souples et légers constitués de cellules organiques		5 à 10 %	Technologie au stade de la R&D devant permettre de produire de l'énergie à un prix inférieur aux technologies de 1 <sup>ère</sup> et de 2 <sup>ème</sup> génération

Technologie	Description	Rendement	Commentaires
Technologie avec trackers (au sol)	Un ou deux axes motorisés permettant aux capteurs de suivre la trajectoire du soleil	Augmentation du facteur de charge jusqu'à 40 %	Technologie promue dans les appels d'offres CRE1 (2011) et CRE2 (2013)
Technologie à concentration dite CPV (au sol)	Utilisation de lentilles optiques concentrant la lumière sur des cellules photovoltaïques à haute performance	20 à 30 %	Technologie nécessitant de suivre la course du soleil tout au long de la journée avec des trackers Technologie développée en France, mais principalement destinée à l'export (pays à fort ensoleillement)
Panneaux solaires « hybrides » (bâti)	Production d'électricité et de chaleur avec augmentation du rendement des cellules	-	Technologie récente visant le marché du bâtiment.

#### Zoom sur la technologie prédominante en France : le silicium cristallin

- 80 % des panneaux installés en sont constitués.
- Durée de vie des modules : de l'ordre de 30 ans.
- Remplacement de l'onduleur au bout de 10 à 12 ans.
- Dégradation annuelle du rendement des panneaux évaluée à 0,7 %.
- Faible maintenance nécessaire du fait de l'auto-nettoyage, partiel, par l'eau de pluie des panneaux et l'absence de pièces mécaniques d'usure.
- Énergie nécessaire à la fabrication d'un système photovoltaïque restituée au bout d'un à trois ans d'exploitation en France.
- De plus, les émissions carbone nécessaires à la fabrication des panneaux sont compensées en 1 à 3 ans de production (en fonction de la localisation géographique).

#### Le recyclage des panneaux

Le recyclage des panneaux est réalisé avec une valorisation de 95 % des panneaux par PV Cycle, organisme agréé de l'État.

Lors de la phase de recyclage, les modules photovoltaïques à base de silicium cristallin peuvent subir deux voies de traitement différentes : un traitement thermique permettant d'éliminer le polymère encapsulant et de séparer ainsi les différents éléments du module photovoltaïque ou un traitement chimique consistant à broyer l'ensemble du module puis à extraire des matériaux secondaires par fractions. Une fois les traitements réalisés, les plaquettes recyclées peuvent être :

- intégrées dans le process de fabrication de cellules et utilisées pour la fabrication de nouveaux modules ;
- récupérées dans leur intégrité ;
- fondues et intégrées dans le process de fabrication des lingots de silicium.

Les matériaux extraits lors des différentes opérations de recyclage servent à la production de modules photovoltaïques, mais aussi dans les filières traditionnelles des matières premières (verre, aluminium, cuivre, etc.).

## 4. Recherche et innovation

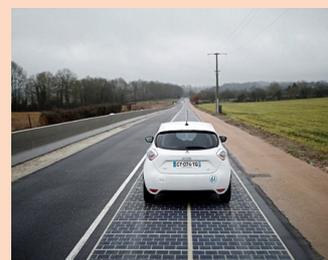
Les innovations technologiques attendues dans la filière photovoltaïque au cours des prochaines années concernent :

- l'amélioration des rendements des différentes technologies ;
- l'amélioration du temps de retour énergétique en diminuant la consommation d'énergie nécessaire lors du processus de fabrication des panneaux photovoltaïques ;
- l'intégration de cellules photovoltaïques dans les produits du bâtiment : couvertures et toitures terrasses, façades, menuiseries, garde-corps ;
- la conception de panneaux pour des applications spécifiques (limitation des reflets à proximité des aérodromes et aéroports) ;
- la diminution du poids des panneaux ;
- des applications innovantes, comme l'agrivoltaïsme (couplage entre une production photovoltaïque et une production agricole), les installations photovoltaïques flottantes sur plan d'eau, etc.

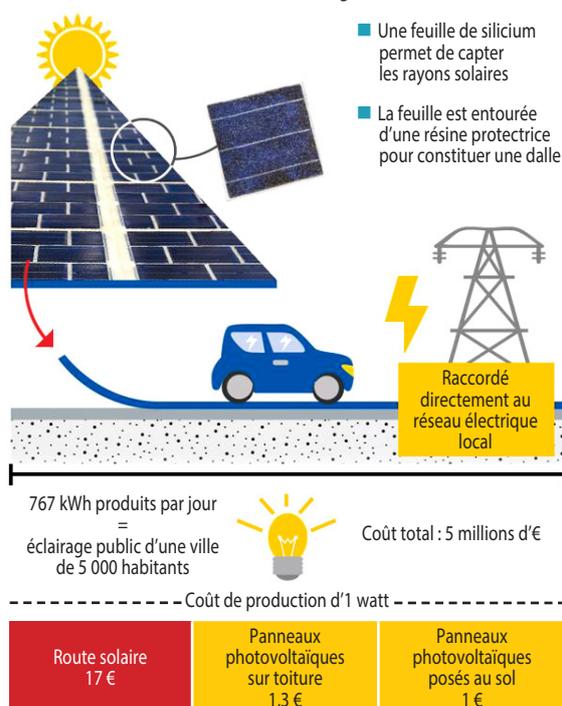
Ces innovations sont notamment valorisées à travers l'appel d'offres pour les installations solaires innovantes annoncé par le ministère le 9 mars 2017. Trois tranches de candidature, chacune de 70 MW, ont été envisagées.

### La première route solaire

La première route solaire a été inaugurée le 22 décembre 2016 par la Ministre Ségolène Royal sur la RD5 sur la commune de Tourouvre-au-Perche dans l'Orne. Cette route a la particularité de capter l'énergie solaire grâce à un revêtement routier photovoltaïque couvrant, sur 1 kilomètre de longueur et 2 mètres de largeur, l'infrastructure existante. La production électrique locale attendue est de 280 000 kWh par an. Cette expérimentation permettra d'évaluer à grande échelle le comportement de la route solaire sous un trafic moyen d'automobiles et de poids lourds.



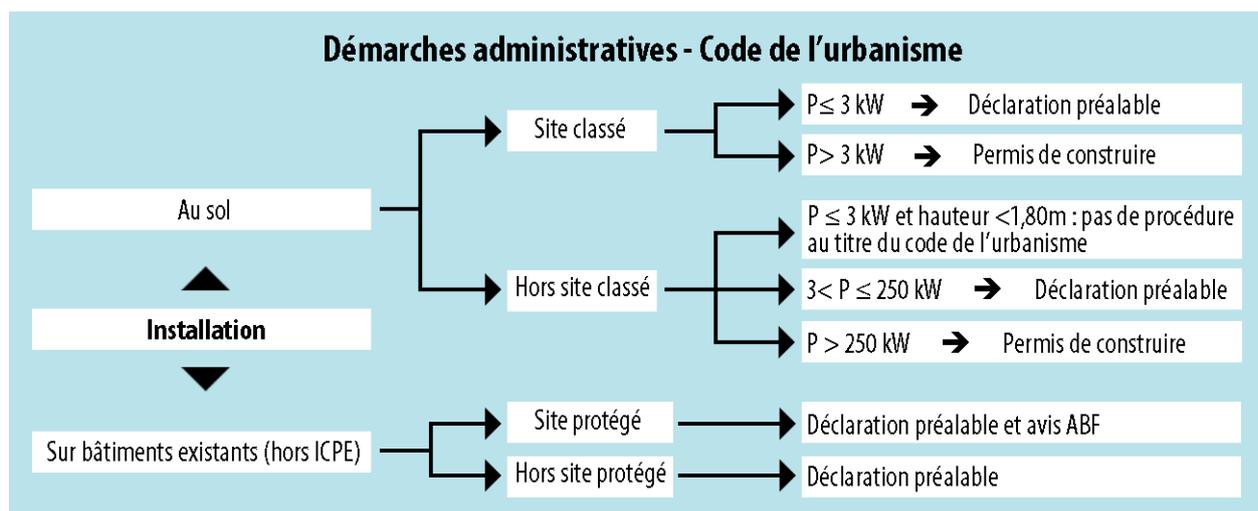
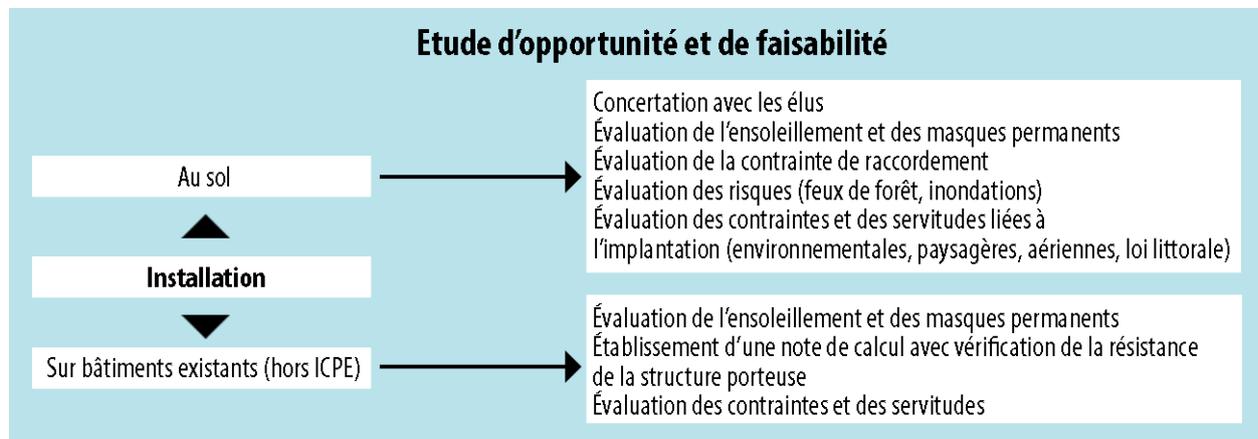
### Route solaire : comment ça marche ?



Source : Médias, Colas et Ademe

## 5. La structuration d'un projet

### Décomposition des démarches d'un projet photovoltaïque en fonction de la puissance et de la nature de l'installation



### Démarches administratives au titre du code de l'environnement

- Évaluation environnementale obligatoire pour les centrales au sol de plus de 250 kWc (seuil pour l'étude d'impact pour les centrales au sol soumise à l'avis de l'autorité environnementale).
- Les services instructeurs (DDT(M)) sont susceptibles de donner un avis consultatif sur les projets photovoltaïques au sol, sur bâti ou ombrières. En revanche, l'avis est obligatoire pour les projets photovoltaïques situés dans les périmètres des ICPE.

### Procédures de raccordement et démarches annexes

- Raccordement par le gestionnaire du réseau de distribution d'électricité des installations de production d'électricité au réseau dans un délai de 2 mois pour les installations d'une puissance de moins de 3 kW et de 18 mois pour celles d'une puissance supérieure à 3 kW.
- Demande de raccordement au réseau à effectuer auprès d'Enedis ou des ELD pour des puissances inférieures à 12 MWh et auprès de RTE pour des puissances comprises entre 12 et 17 MWh.
- Contrôle de conformité réalisé par le consuel pour des puissances inférieures à 250 kWc et par des contrôleurs techniques agréés pour des puissances supérieures à 250 kWc.
- Demande d'autorisation d'exploiter au titre du code de l'énergie délivrée par le ministre pour des installations photovoltaïques de puissance supérieure à 50 MWh.

## 6. Actualités sur la filière photovoltaïque

La prochaine réglementation thermique RT2020, dite bâtiment à énergie positive, permettra ou imposera aux nouveaux bâtiments de devenir des producteurs nets d'énergie. Cette réglementation offrira notamment de nouvelles perspectives de développement de la filière photovoltaïque (en particulier en toiture).

### Focus sur l'autoconsommation

La filière photovoltaïque est amenée à poursuivre son évolution dans les prochaines années notamment grâce au développement et à la généralisation progressive du concept d'autoconsommation.

Ce procédé, qui consiste à consommer sur site tout ou partie de la production d'électricité, se divise en deux catégories :

- l'autoconsommation totale, pour laquelle il n'y a pas d'injection sur le réseau. L'électricité produite sur le site est intégralement consommée ou stockée ;
- l'autoconsommation avec injection du surplus, pour laquelle l'excédent d'électricité non consommé ou stocké localement est injecté sur le réseau.

Un appel d'offres portant sur la réalisation et l'exploitation d'installations de production d'électricité à partir d'énergies renouvelables en autoconsommation a été lancé par le ministère en août 2016. Il vise des installations de puissance comprise entre 100 et 500 kW, pour un volume global de 40 MW (2 tranches de 20 MW). 72 projets ont été désignés lauréats pour la première tranche et 62 autres lauréats pour la seconde. Tous les lauréats ont été sélectionnés avec la technologie photovoltaïque.

Afin de pérenniser le modèle économique de l'autoconsommation, consolidé par la loi relative à l'autoconsommation et aux énergies renouvelables publiée le 25 février 2017, un nouvel appel d'offres pluriannuel a été lancé le 9 mars 2017 pour les installations de production d'électricité à partir d'énergies renouvelables en autoconsommation pour un volume de 150 MW par an, sur 3 ans.

Enfin, l'autoconsommation fera l'objet d'un tarif d'utilisation du réseau spécifique en application de l'ordonnance n°2016-1019 du 27 juillet 2016. Elle fera également l'objet d'un tarif d'achat spécifique et d'une prime à l'investissement pour les petites installations dans le futur arrêté tarifaire.

### Autoconsommation totale

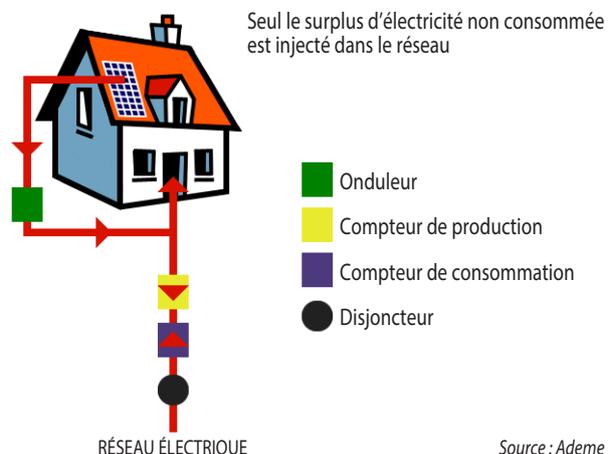


Centrale photovoltaïque en toiture de 186 kWc destinée à l'autoconsommation d'un bâtiment de Tryba Industrie à Gundershoffen (Bas-Rhin). Elle occupe une surface de toiture de 270 916 m<sup>2</sup>. Le taux d'autoconsommation des 174 000 kWh d'électricité produite par an a été estimé à 95% (source : lechodusolaire.fr).



Maisons solaires de l'écoquartier Vauban à Fribourg-en-Brisgau, situé au sud de l'Allemagne, au milieu de la Forêt-Noire. Fribourg bénéficie de plus de 1 800 heures d'ensoleillement par an. Les panneaux photovoltaïques sur le toit des habitations de la « cité solaire » fournissent aux résidents plus d'énergie qu'ils n'en ont besoin (source : ddmagazine.com)

### Autoconsommation avec injection du surplus



Source : Ademe

## Série de fiches « énergies renouvelables »

**Fiche 1**  
La biomasse solide

**Fiche 2**  
Le photovoltaïque

**Fiche 3**  
L'éolien terrestre

Fiche réalisée sous la coordination de Jérôme Christin (Cerema Méditerranée)

### Contributeurs

Rémy Chaille, Jérôme Christin, Stéphane Mas (Cerema Méditerranée)

### Relecteurs

Myriam Lorcet (Cerema Méditerranée), Alix Drezet, Jacky Percheval (DREAL Provence-Alpes-Côte d'Azur), Suzelle Lalaut, Cédric Bozonnat, Louise Oriol (DGEC)

### Contacts

jerome.christin@cerema.fr

remy.chaille@cerema.fr

stephane.mas@cerema.fr



Toiture composée de tuiles photovoltaïques (luxol.fr)



Toiture solaire sur un hangar agricole (paysan-breton.fr)



Serre chauffée par énergie solaire (EDF ©-Gilles-Huguet)



Hôtel d'activités « Le Losserand » Paris XIV<sup>ème</sup> (lesechos.fr)



Centre d'hébergement Emmaüs Quai de Valmy - Paris (sibat.fr)



Parc photovoltaïque Les Mées Alpes de Haute Provence (cerema.fr)

Connaissance et prévention des risques - Développement des infrastructures - Énergie et climat - Gestion du patrimoine d'infrastructures  
Impacts sur la santé - Mobilité et transports - Territoires durables et ressources naturelles - Ville et bâtiments durables

**Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement - [www.cerema.fr](http://www.cerema.fr)**  
Direction Territoriale Méditerranée - Pôle d'activités - 30, avenue Albert Einstein - CS 70499 - 13593 AIX-EN-PROVENCE Cedex 3 - Tél. +33 (0)442247676  
Siège social : Cité des mobilités - 25, avenue François Mitterrand - CS 92803 - 69674 BRON Cedex - Tel. +33 (0)4 72 14 30 30