

# L'énergie solaire photovoltaïque



1. Principe de fonctionnement, technologies et applications
2. Chiffres clés
3. Les mécanismes de soutien au photovoltaïque en France
4. Les nouveaux marchés du photovoltaïque
5. Les perspectives de développement en France et dans le monde

# 1. Principe de fonctionnement, technologies et applications

- Le solaire photovoltaïque utilise les propriétés des matériaux semi-conducteurs pour produire de l'électricité directement à partir du rayonnement solaire.
- Ces matériaux, en majorité du silicium cristallin, sont utilisés pour la fabrication de cellules qui sont regroupées dans des modules ou panneaux photovoltaïques.



*Etapes de fabrication d'un module photovoltaïque à base de silicium polycristallin. Source : SER, 2015*

# Les segments de la chaîne de valeur

## Recherche

Large spectre d'études, de la recherche fondamentale à des prototypes industriels : **CEA, CNRS, EDF, INES, IPVF, IRDEP, Nexcis PV 20, PV ALLIANCE...**

## Fabricants de machines-outils

Fourniture de machines-outils à destination des chaînes de fabrication : **AET-Technologies, Apollon Solar, Cyberstar, ECM Technologies, EFD Induction, Machines Dubuit, Mersen (ex-Carbone Lorraine), Vincent Industrie...**

## Fabricants de modules et/ou cellules

10 fabricants de modules et/ou cellules : **EDF ENR PWT (Photowatt), Elifrance, Fonroche, Francewatts, Irysolar, Sillia VL, SNA Solar, Systovi, SunPower (Total), Voltec Solar.**

## Fabricants de matériaux solaires

Fabrication de matériaux entrant dans la composition des modules : **Air Liquide, Arkema, Emix, Entegris, Micel Film, Saint-Gobain, Technic France...**

## Fabricants de matériel électrique

Fabrication de matériel d'interconnexion, d'acheminement DC, de supervision, de sécurité, de conversion DC/AC... : **Emelec technologies, Exosun, Legrand, Leroy-Somer, Nexans, Schneider Electric, Socomec...**

## Fabricants de structures de supports

Fabrication de structures de support en intégré au bâti ou intégré simplifié au bâti : **3i+, Altus Energy, Axter, Barsun, BCM-Steelalu, CBP, Clipsol, COFAM, Energiz, Gagnepark, Giordano industries, Groupe Solution Energie, Kogys, Imerys, IRFTS, Mecosun, Poujoulat, SAPA profiles, Sol-In-G, Solar Construct, Soprema, Systovi, Sunpower (Total), Terreal, Unite, Urbasolar...**

## Développeurs , installateurs et/ou exploitants

Assurent le développement des projets (démarches administratives, montages juridique et financier, études de conception et d'exécution, travaux de pose et d'électricité, exploitation-maintenance...) : **Akuo Energy, EDF EN, EDF ENR Solaire, Enertrag, Eneryo, Eole Res, Eolfi, Fonroche, GDF SUEZ, Générale du Solaire, Gensun, Inéo, Juwi, La Compagnie du Solaire, La Compagnie du Vent, La Compagnie Nationale du Rhône, Langa Solar, Megawat Energie, Neoen, Quadran, Solairedirect, Technique Solaire, Sunpower (Total), Urbasolar, Valeco, Vent d'Oc, Vol-V Solar...**

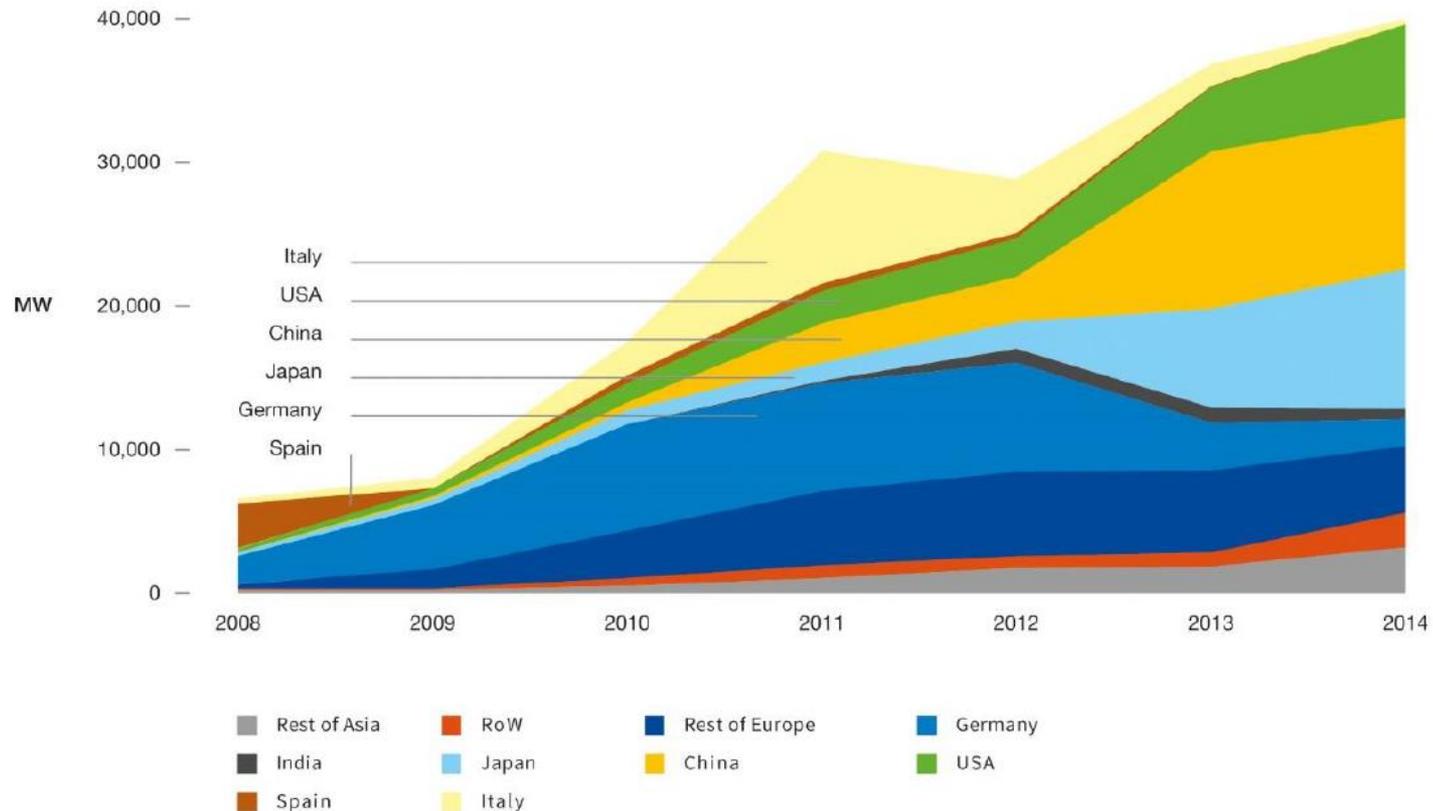
## Producteurs d'électricité

Investisseurs privés ou publics : particuliers (installations résidentielles), agriculteurs, collectivités, entreprises, énergéticiens...

1. Principe de fonctionnement, technologies et applications
2. Chiffres clés
3. Les mécanismes de soutien au photovoltaïque en France
4. Les nouveaux marchés du photovoltaïque
5. Les perspectives de développement en France et dans le monde

## 2. Chiffres clés

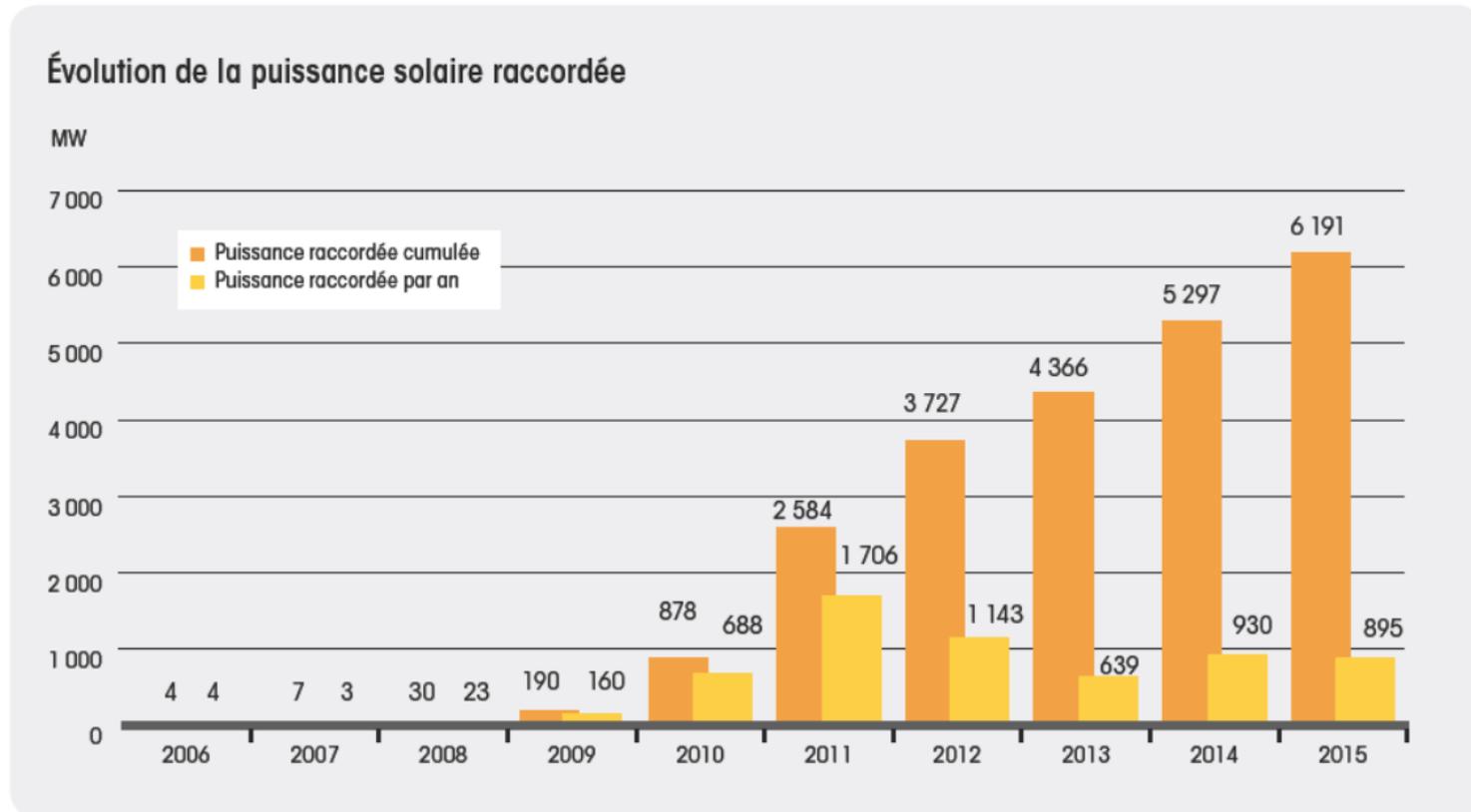
- De 2,6 GW en 2004, le parc mondial a dépassé le chiffre symbolique des 100 GW de puissance raccordée au réseau en 2012, et s'est établi à **235 GW à fin 2015** pour un marché annuel autour de **55 GW**.



Source : SolarPower Europe, 2015

## 2. Chiffres clés

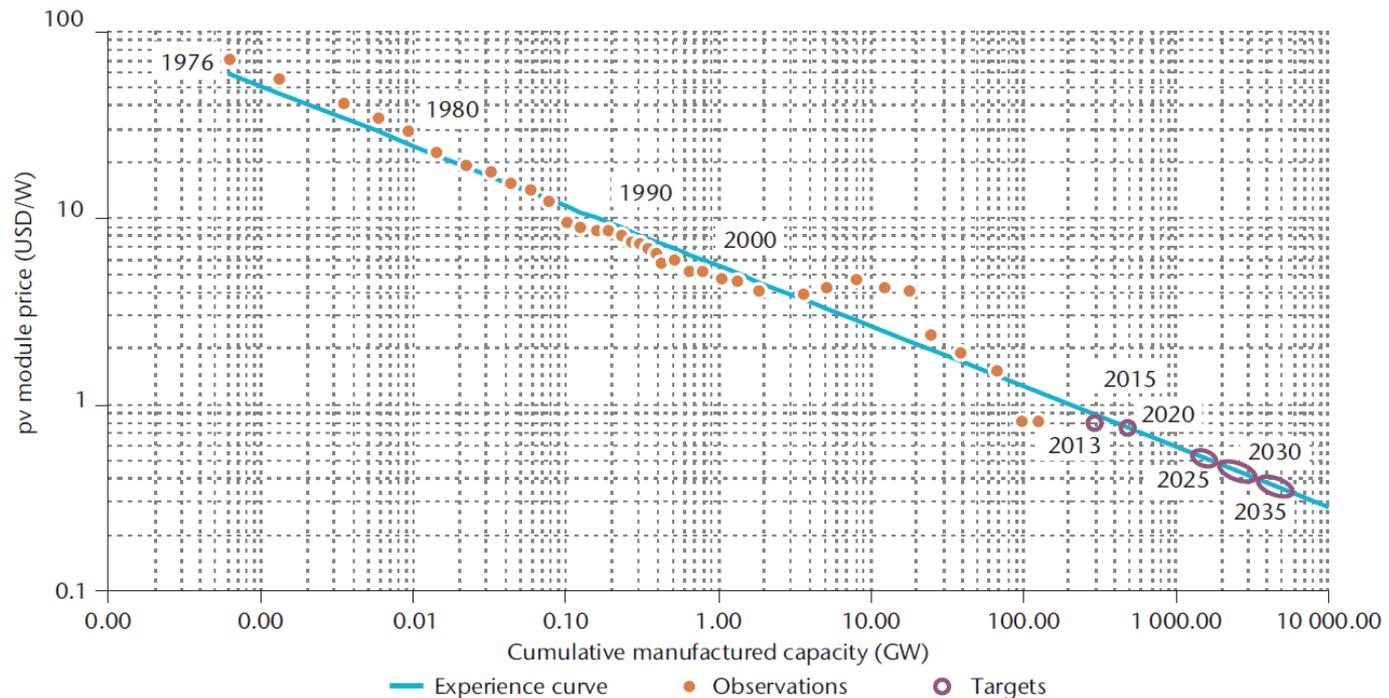
- En France, la puissance raccordée au réseau, fin 2014, s'élevait à **6 191 MW** pour un total d'environ **350 000 installations** (dont 300 000 dans le secteur résidentiel). Le marché 2015 a été de **895 MW**.



Source : Panorama de l'électricité renouvelable, SER-RTE-ERDF-ADEef, 2015

## 2. Chiffres clés

- Les coûts de production du solaire photovoltaïque poursuivent depuis plusieurs années une courbe d'apprentissage particulièrement rapide : à l'échelle mondiale, **le prix des systèmes photovoltaïques a été divisé par 3 dans les 6 dernières années**, et dans le même temps, le prix des modules a été divisé par 6. Depuis 1976, on observe qu' à l'échelle mondiale **le prix des modules baisse de 20 % chaque fois que la production cumulée double**.



Prix des modules depuis 1976 et projection à 2035 basée sur la courbe d'apprentissage.

Source : Technologie Roadmap – Solar Photovoltaic Energy, IEA, 2014

## 2. Chiffres clés

- Focus sur les derniers appels d'offres internationaux :
  - ✓ Chili (appel d'offres de l'Etat, décembre 2014) : **70 €/MWh**
  - ✓ Inde (appel d'offres de l'Andhra Pradesh, novembre 2014) : **67 €/MWh**
  - ✓ Afrique du Sud (appel d'offres REIPP Round 3, novembre 2013) : **60 €/MWh**
  - ✓ USA (appel d'offres Austin Energy (Texas), mars 2014) : **62 €/MWh**
  - ✓ Emirats Arabes Unis (appel d'offres DEWA, novembre 2014) : **50 €/MWh**
  - ✓ Pérou (4<sup>e</sup> appel d'offres national, mars 2016) : **45 €/MWh**
  - ✓ Mexique (1<sup>er</sup> appel d'offres national, mars 2016) : **37 €/MWh**
- En France, les prix moyens des projets lauréats du dernier appel d'offres pour les installations de grande puissance ont été de **129 €/MWh** pour les installations sur bâtiment, **124 €/MWh** pour les ombrières et **82 €/MWh** pour les centrales au sol.



1. Principe de fonctionnement, technologies et applications
2. Chiffres clés
3. Les mécanismes de soutien au photovoltaïque en France
4. Les nouveaux marchés du photovoltaïque
5. Les perspectives de développement en France et dans le monde

### 3. Les mécanismes de soutien au photovoltaïque en France

Marchés	Configuration des systèmes	Mécanisme de soutien	Etat des marchés
0-9 kW (résidentiel)	Intégré au bâti <sup>(1)</sup> (IAB)	Tarif d'achat guichet (« T1 » ; arrêté du 4 mars 2011). Décroissance trimestrielle en fonction du volume de demandes de raccordements au trimestre précédent. Tarif en vigueur au 4 <sup>e</sup> trimestre 2015 : 25,39 c€/KWh.	Marché en net recul : -40 % entre 2013 et 2014 et -57 % entre 2015 et 2014.
0-100 kW (professionnel)	Intégré simplifié au bâti <sup>(2)</sup> (ISB)	Tarif d'achat guichet (« T4 » ; arrêté du 4 mars 2011). Décroissance trimestrielle en fonction du nombre du volume de raccordements au trimestre précédent. Tarif en vigueur au 4 <sup>e</sup> trimestre 2015 : 14,40 c€/kWh entre 0 et 36 kWc, et 13,68 c€/kWh entre 36 et 100 kWc.	Quasiment à l'arrêt au 1 <sup>er</sup> semestre 2015, ce segment de marché est reparti à la hausse suite à deux revalorisations successives du tarif T4, décidées à l'été 2015.
100-250 kW (professionnel)	ISB	Appels d'offres CRE en procédure accélérée (ancien décret n°2002-1434).	En cours. Prévu initialement pour un volume cible de 120 MW, ce dernier a été doublé par le gouvernement à l'été 2015 pour atteindre 240 MW (3 périodes de candidature successives de 80 MW chacune)
> 250 kW (professionnel)	ISB, surimposé <sup>(3)</sup> ou au sol	Appels d'offres CRE en procédure ordinaire (ancien décret n°2002-1434)	Clôturé. Prévu initialement pour un volume cible de 400 MW, 1 100 MW ont finalement été attribués (une seule période de candidature).

<sup>(1)</sup> Couverture remplacée. Les modules assurent la double fonction de production d'électricité et d'étanchéité.

<sup>(2)</sup> Couverture remplacée. Les modules assurent la fonction de production d'électricité, la fonction d'étanchéité étant assurée par une sous-couche (ex : bac acier).

<sup>(3)</sup> Couverture non-remplacée. Les modules assurent la fonction de production d'électricité, la fonction d'étanchéité étant assurée par la couverture.

### 3. Les mécanismes de soutien au photovoltaïque en France

- Evolutions réglementaires actuelles et à venir (en projet / discussion) :

Marchés	Configuration des systèmes envisagée	Mécanisme de soutien envisagé
0-100 kW (résidentiel et professionnel, vente totale)	Bâtiments en surimposé	Refonte de l'arrêté du 4 mars 2011 : tarif d'achat guichet à plusieurs niveaux en fonction des segments de puissance (par ex. : [0-9], [9-36], [36-100] kWc). Prime à l'intégré au bâti de 0 à 9 kWc pendant une période intermédiaire, de manière à organiser une sortie progressive de ce soutien dédié à ces applications.
> 100 kW (professionnel, vente totale)	Bâtiments en surimposé	Appel d'offres pluriannuel « bâtiments ». 3 périodes de candidatures par an de 150 MW chacune (450 MW/an). Tarif d'achat pour les installations de puissance inférieures à 500 kWc, complément de rémunération au-delà.
> 500 kW (professionnel, vente totale)	Centrales au sol	Appel d'offres pluriannuel « centrales au sol ». 2 périodes de candidatures par an de 500 MW chacune (1 000 MW/an). Installations d'une puissance supérieure à 500 kWc uniquement, sous complément de rémunération.
> 100 kW (professionnel, autoconsommation)	Non précisé	Appel d'offres « Autoconsommation » dans les secteurs tertiaires, industriels et agricoles

### 3. Les mécanismes de soutien au photovoltaïque en France

- Le calcul du complément de rémunération (projet de décret et « arrêtés filières »)

$$CR = \underbrace{\sum_{i=1}^n E_i \cdot (\alpha T_e - M_{0i})}_{\text{Prime à l'énergie}} - \underbrace{(Nb_{capa} \cdot p_{ref\ capa})}_{\text{Capacité}} + \underbrace{\sum_{i=1}^n E_i \cdot P_{gestion}}_{\text{Prime de gestion}}$$

**n** : nombre entier compris entre 1 et 12, correspondant au nombre de périodes de calcul dans l'année

**i** : nombre entier compris entre 1 et n, correspondant au pas de temps de calcul de la prime à l'énergie

**E<sub>i</sub>** : production nette d'électricité de l'installation, sur le pas de temps i et exprimé en MWh

**α** : coefficient de dégressivité de la prime, variable au cours du temps dont la moyenne sur la durée du contrat devrait être égale à 1

**T<sub>e</sub>** : prix d'achat de référence en €/MWh, terme équivalent au niveau des tarifs d'achat actuels

**M<sub>0</sub>** : prix de marché de référence représentatif de la valorisation de l'électricité produite sur les marchés de l'électricité exprimé en €/MWh sur le pas de temps i, défini par arrêté pour chaque filière soit comme la moyenne des prix spots positifs et nuls, soit comme une moyenne de prix à terme, soit comme une combinaison de deux

**Nb capa** : nombre de garanties de capacités de l'installation pour une année de livraison, en MW

**Pref capa** : prix de référence représentatif du prix de la garantie de capacité échangée pour l'année de livraison considérée, en €/MW

**Pgestion** : prime unitaire de gestion en €/MWh

1. Principe de fonctionnement, technologies et applications
2. Chiffres clés
3. Les mécanismes de soutien au photovoltaïque en France
4. Les nouveaux marchés du photovoltaïque
5. Les perspectives de développement en France et dans le monde

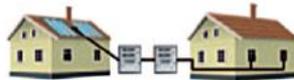
## 4. Les nouveaux marchés du photovoltaïque

- Deux marchés complémentaires sont amenés à se développer dans les années à venir : celui de la vente de l'électricité solaire photovoltaïque sur les marchés de gros de l'électricité, et celui de l'autoconsommation.
- Par **autoconsommation photovoltaïque**, on entend la possibilité donnée à tout type de consommateur/producteur d'électricité de connecter une installation photovoltaïque, dimensionnée selon ses besoins, soit uniquement à son installation électrique, soit dans un mode de partage entre son installation électrique et le réseau local selon les fluctuations de la production et de la consommation in situ.

Autoconsommation directe



Consommation partagée via une ligne dédiée

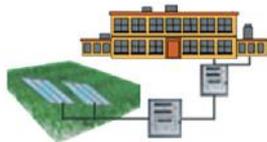


Consommation sur site par les occupants



Installation propriétaire

Production par le consommateur, à proximité du site de consommation



Consommation sur site par les occupants



Location d'une toiture pour une installation d'un tiers

Service de fourniture d'énergie pour consommation sur site



1. Principe de fonctionnement, technologies et applications
2. Chiffres clés
3. Les mécanismes de soutien au photovoltaïque en France
4. Les nouveaux marchés du photovoltaïque
5. Les perspectives de développement en France et dans le monde

## 5. Les perspectives de développement en France et dans le monde

- Détail de la nouvelle PPI solaire photovoltaïque (arrêté du 24 avril 2016) :

	Puissance installée
31 décembre 2018	10 200 MW
31 décembre 2023	Option basse : 18 200 MW Option haute : 20 200 MW

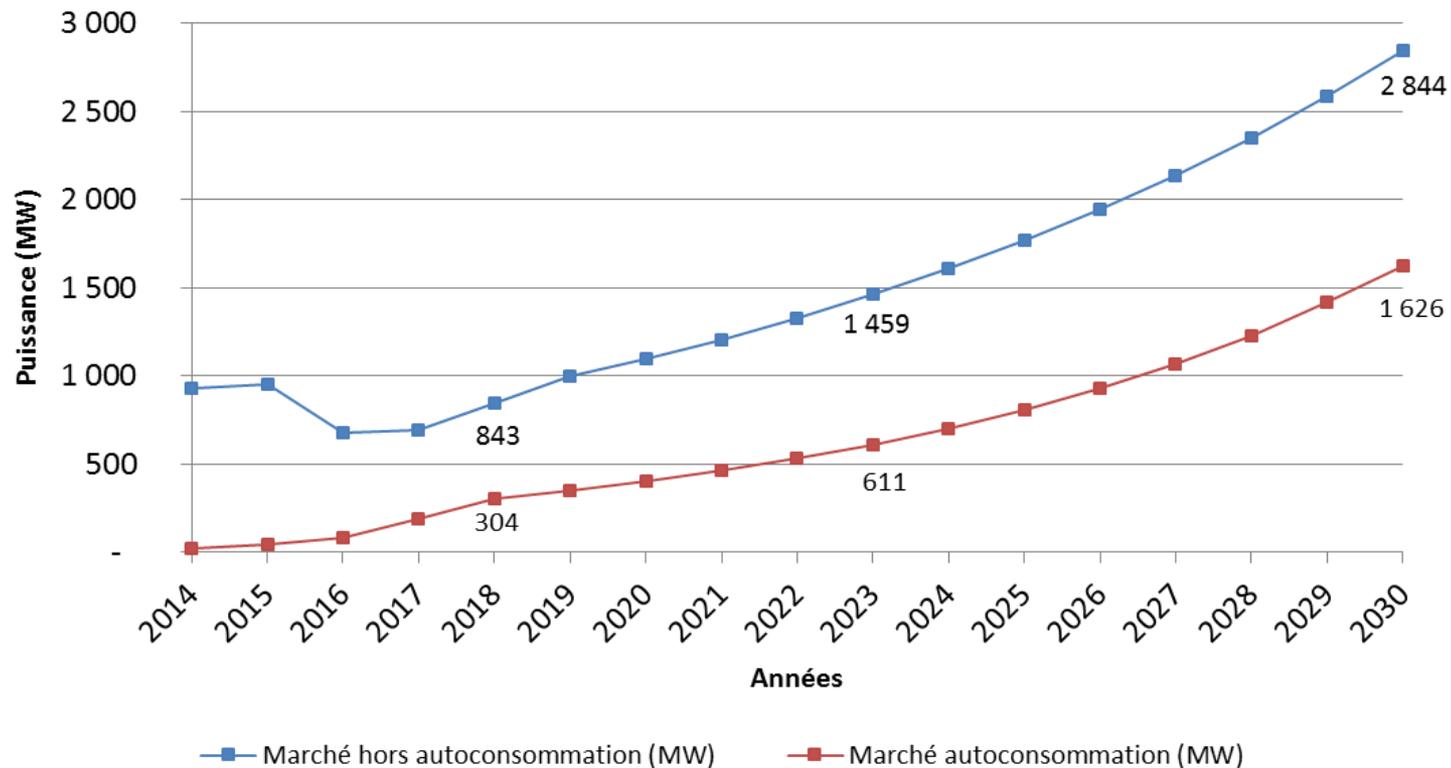
- Calendrier des appels d'offres tri-annuels : 4 350 MW programmés d'ici à 2019

Calendrier prévisionnel	2016				2017			
	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
<b>Solaire (Sol)</b>		Lancement AO tri-annuel		Echéance 1 (500 MW)		Echéance 2 (500 MW)		Echéance 3 (500 MW)
<b>Solaire (bâtiments)</b>		Lancement AO tri-annuel		Echéance 1 (150 MW)	Echéance 2 (150 MW)	Echéance 3 (150 MW)		Echéance 4 (150 MW)

Calendrier prévisionnel	2018				2019	
	T1	T2	T3	T4	T1	T2
<b>Solaire (Sol)</b>		Echéance 4 (500 MW)		Echéance 5 (500 MW)		Echéance 6 (500 MW)
<b>Solaire (bâtiments)</b>	Echéance 5 (150 MW)	Echéance 6 (150 MW)		Echéance 7 (150 MW)	Echéance 8 (150 MW)	Echéance 9 (150 MW)

## 5. Les perspectives de développement en France et dans le monde

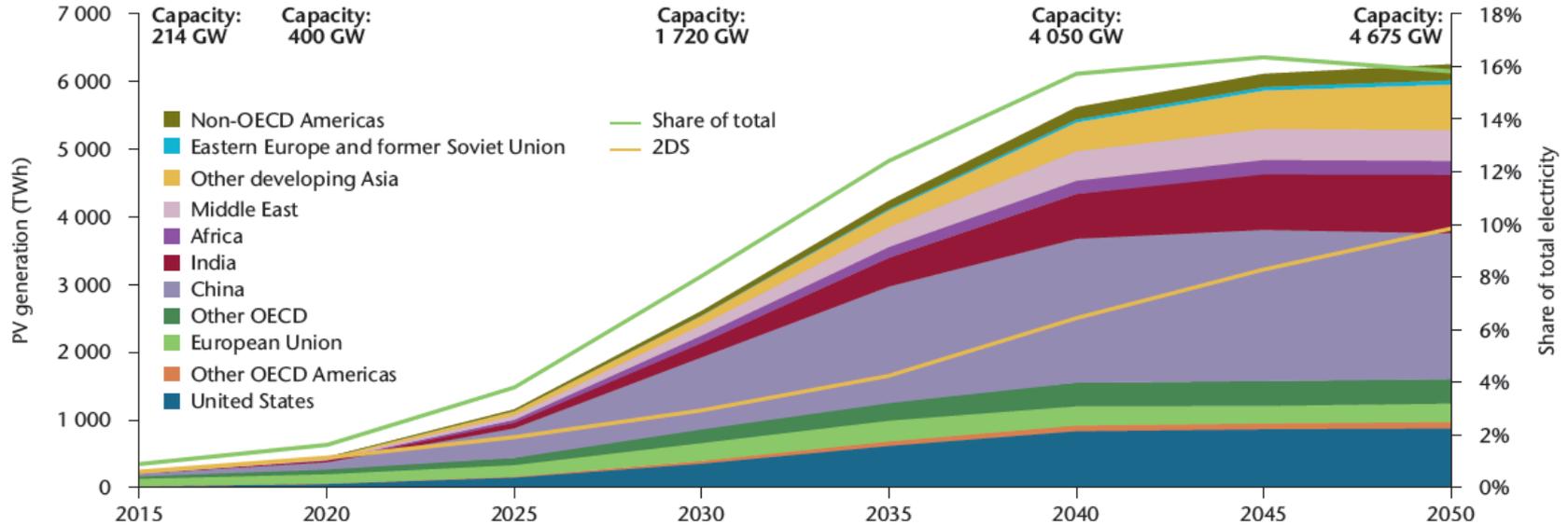
- En France, le SER estime qu'un objectif minimal d'un parc photovoltaïque de **30 GW en 2030** est nécessaire pour développer le secteur de manière pérenne, notamment sur le plan industriel, et fournir aux entreprises l'assise nécessaire pour pouvoir se tourner à l'export. Néanmoins, avec le développement de l'autoconsommation, le SER estime que le parc photovoltaïque pourrait atteindre, voire dépasser les **40 GW en 2030**.



Projection des marchés annuels français jusqu'en 2030. Source : SER, 2015

## 5. Les perspectives de développement en France et dans le monde

- Dans le monde, le marché du photovoltaïque devrait augmenter à 55 GW en 2018, pour un parc cumulé d'environ 375 GW. A plus long terme, le marché annuel devrait passer à 124 GW en 2025, puis 200 GW par an jusqu'en 2050, pour atteindre un parc cumulé de **4 675 GW**. Les investissements devraient s'établir à un rythme de **225 Md\$ / an**.



Evolution de la production et du parc photovoltaïque installé dans le monde à l'horizon 2050

Source : Technologie Roadmap – Solar Photovoltaic Energy, IEA, 2014

**Merci de votre attention**

