

### Sommaire

### Tendances du photovoltaïque

Notre prochaine conférence :  
Mardi 25 mars

**Agir en faveur du climat et de  
l'environnement dans son  
entreprise et au-delà**

Mardi 8 avril

**Recyclage des panneaux  
photovoltaïques**

Jeudi 27 mars

**Mener un débat public sur un  
sujet environnemental  
controversé jeudi**

Nos dernières conférences :  
(diapos et vidéo sur le site  
Centrale-energies,  
www.centrale-energies.fr

ou  
cliquez sur le lien ci-dessous)

- Le recyclage des éoliennes en France
- Décarbonation du transport maritime : où en sommes nous ?
- «Les technologies adaptées ou low-tech pour la transition bas carbone»

*Vous avez l'idée d'un sujet pour une prochaine conférence Centrale-Energies, vous avez envie de proposer un article pour un prochain flash ?*

*Contactez-nous !*

*contact@centrale-energie.fr*

## TENDANCES DU PHOTOVOLTAÏQUE

Extrait du rapport 2024 du programme Photovoltaïque de l'Agence Internationale de l'Energie (IEA PVPS)

*Alain Argenson (ECN62)*

### 1 Développement et tendances

Dans le monde la majorité des installations est connectée à un réseau, L'on observe cependant dans de nombreux pays une tendance au développement d'installations individuelles et communautés d'énergie en autoconsommation favorisée par l'augmentation du prix de l'électricité distribuée par un réseau. Les subventions diminuent et sont adaptées pour encourager le développement sur bâtiments ou dans les champs (agriPV) Un nombre croissant de Power Purchase Agreement (PPA) indépendants de toute aide se concrétisent à travers le monde.

En 2023 le monde a installé environ 456 GW de panneaux photovoltaïque soit un total cumulé d'environ 1 642GW ayant produit 8,3% de la consommation totale d'électricité.

Les 5 pays en tête des installations réalisées en 2023 sont :

Chine	EU	USA	Inde	Brésil
277 GWc	59,8 GWc	33,9 GWc	13 GWc	12,4 GWc

La puissance installée fin 2023 par habitant est la suivante:

Australie	Pays-Bas	Allemagne	Belgique	Espagne
1296Wc	1288Wc	974 Wc	842 Wc	806 Wc

En France la puissance totale raccordée fin 2023 est de 19 GWc soit 300Wc par habitant.

Le chiffre d'affaire mondial du PV est de 400 milliards USD.

Le nombre de personnes employées en 2023 est estimé à 7,2 Millions

## 2 technologie de l'industrie photovoltaïque

La plus petite unité d'un panneau photovoltaïque est la cellule. Ces cellules sont réalisées à 98% en polysilicium,

Le polysilicium est produit à partir de silicium métal selon plusieurs procédés,

Le silicium métal est obtenu par carboréduction de la silice.

Le polysilicium est fondu puis coulé en lingots cylindriques par un procédé permettant d'obtenir un silicium monocristallin plus efficace. Les lingots cylindriques sont ensuite découpés pour obtenir une forme rectangulaire, les chutes sont recyclées immédiatement,

Les lingots sont découpés en plaquettes (Wafers) dont l'épaisseur ne cesse de décroître, Elle était de 150  $\mu\text{m}$  en 2023.

La consommation de silicium décroît : elle était de 2,7g/W en 2021 et de 2,2g/W en 2023

Les wafers de type N (introduction de phosphore dans le silicium) sont maintenant majoritaires dans la production de cellules. Ces atomes de phosphore créent une couche de matériau dopé négativement qui permet aux électrons de se déplacer plus facilement. Par conséquent le rendement est augmenté.

D'autres matériaux sont également employés pour fabriquer des cellules en couche mince généralement par dépôt: tellure de cadmium, gallium-arsenic, et également sous forme de peinture organique

La perovskite (minéral de titanate de calcium très répandu) pour produire des cellules suscite un grand intérêt compte tenu de ses performances et un coût réduit de production. Mais il n'est pas encore développé commercialement.

Les rendements des cellules en polycristallin, les plus répandues actuellement, sont de l'ordre de 18 à 21% . Les cellules monocristallines ont un rendement plus élevé, entre 20 et 25%.

Les couches minces ont des rendements de l'ordre de 14% pour les cellules organiques, de 18,6% pour le tellure de cadmium (commercialisé principalement par First Solar) et peuvent atteindre 31,2% pour le gallium-arsenic à 3 jonctions

## 3 Autres améliorations

Les fabricants continuent d'innover et de développer de nouvelles technologies pour améliorer l'efficacité et les performances des modules. Trois technologies ont retenu l'attention ces dernières années : PERC, HJT et TOPCON.

PERC, abréviation de Passivated Emitter Rear Cell, est une technologie qui améliore l'efficacité des cellules solaires en ajoutant une couche de passivation à l'arrière de la cellule.

HJT (Heterojunction Technology) Les modules à hétérojonction sont formés en combinant des couches de silicium amorphe avec des couches de silicium cristallin. Cette technologie est relativement nouvelle et en est encore aux premiers stades de commercialisation, elle n'est donc pas aussi courante sur le marché que le PERC.

TOPCON est l'abréviation de Tunnel Oxide Passivated Contact, une technologie qui combine les avantages du PERC et du HJT. Il utilise une fine couche d'oxyde tunnel pour passiver les contacts à l'arrière de la cellule solaire, similaire au PERC. Les modules TOPCON disposent de la technologie d'hétérojonction

La technologie TOPCON est la plus prometteuse en raison de son excellente efficacité, mais elle en est encore également aux premiers stades de commercialisation.

## 4, En France : quel développement ?

### a) Situation française au 31 décembre 2024

En 2024, 5 GW supplémentaires ont été raccordés, contre 3,4 GW en 2023.

La production d'électricité d'origine solaire photovoltaïque en France Continentale s'élève à 24,5 TWh en 2024, en hausse de 9 % par rapport à 2023.

Elle représente, hors auto-consommation, 5,2 % de la consommation électrique française sur cette période.

**b) Principaux résultats fin 2024 :**

Ensemble de la France

Tranche de puissance	Nombres d'installations	Puissance en MWc
<3kWc	656 336	1 629
3 à 9 kWc	405 004	2 311
9 à 36 kWc	45 198	1 041
36 à 100 kWc	42 117	3 615
100 à 250 kWc	22 615	4 396
250 à 500 kWc	981	392
>500 kWc	2 938	11 923
	total MWc	25 307

**c) Autoconsommation de la production photovoltaïque**

Fin 2024, 58,2 % des installations photovoltaïques (14,6 % de la puissance installée) produisent de l'électricité qui est entièrement ou partiellement auto--consommée. Au quatrième trimestre 2024, 142 GWh d'électricité photovoltaïque ont été auto-consommés par les producteurs, soit 3,9 % de la production photovoltaïque du trimestre. Les installations en autoconsommation totale ont produit 103 GWh, soit 73 % du total auto-consommé. Elles représentent 20 % du parc métropolitain en autoconsommation et 12 % du parc métropolitain total.

**d) De nombreuses évolutions réglementaires**

Elles ont été mises en place pour accélérer le déploiement du photovoltaïque, en particulier la **loi d'accélération des énergies renouvelables**. Cette loi a notamment introduit :

- des obligations de solarisation pour les bâtiments de plus de 500 m<sup>2</sup> et les parkings de plus de 1 500 m<sup>2</sup>.
- une définition légale de l'agrivoltaïsme.

- de nouvelles règles autorisant les systèmes photovoltaïques sur les terrains inutilisés à proximité d'infrastructures telles que les routes et les voies de chemin de fer.

**e) Environ 7 GWc de nouveaux projets**

Ils sont entrés dans la file d'attente de raccordement au réseau en 2023, avec une réserve croissante de plus de 26 GWc en attente de connexion, ce qui garantit une croissance continue pour les années à venir.

**f) Quels sont les perspectives**

La programmation pluriannuelle de l'énergie qui vient d'être dévoilée a pour objectif une **production en 2023 de 24 TWh (20,1 GWc) et en 2028 entre 43 et 53 TWh (35,1 à 44 GWc)**

Ces objectifs correspondraient en 2028 à une surface de PV installée en France entre 330 et 400 km<sup>2</sup> au sol et entre 150 et 200 km<sup>2</sup> sur toiture.

Quels sont les mesures pour atteindre ces objectifs :

- Favoriser les installations au sol sur terrains urbanisés ou dégradés, ou les parkings, afin de permettre l'émergence des projets moins chers tout en maintenant des exigences élevées sur les sols agricoles et l'absence de déforestation ;

- Conserver la bonification des terrains dégradés, ce qui permet de limiter la consommation des espaces naturels ;

- Mettre en œuvre les mesures adoptées le 28 juin 2018 à l'issue du groupe de travail solaire dont en particulier :

-Faciliter le développement du photovoltaïque pour les Ministères, les établissements publics (SNCF, Ports etc.) et les détenteurs de foncier anthropisé (grande distribution, logistique etc.) ;

-Faciliter le développement du photovoltaïque sur les parkings (simplification des mesures d'urbanisme pour les ombrières de parking) ;

-Soutenir les collectivités locales, notamment au travers du réseau « Villes solaires » ;

-Permettre une meilleure intégration du solaire dans le patrimoine architectural français

- Adopter un calendrier d'appel d'offres correspondant à 2 GWc par an pour les centrales au sol et 0,9 GWc par an pour les installations sur grandes toitures ;

- Maintenir un objectif de 300 MWc installés par an pour les installations sur petites et moyennes toitures (inférieures à 100 kWc) en orientant les projets vers l'autoconsommation, dynamiser le développement des projets sur la tranche 100-300 kWc en les rendant éligibles au guichet ouvert et accélérer le développement des projets sur les grandes toitures (>300 kWc).

- Soutenir l'innovation dans la filière par appel d'offres, pour faire émerger des solutions innovantes, notamment agrivoltaïques permettant une réelle synergie entre la production agricole et l'énergie photovoltaïque, en maintenant les volumes de l'appel d'offres actuel (140 MWc/an).

### g) la faiblesse dans ce programme

C'est notre dépendance à la Chine, Le seul fabricant français de cellules (Photowatt) vient de fermer. Les fabricants de panneaux solaires avec des cellules chinoises ferment malgré des droits d'importation de panneaux, Une usine chinoise de panneaux doit se construire à Mandeuire (Franche Comté)

Deux usines de fabrication de cellules sont programmées. Verront-elles le jour ? Où est la logique industrielle ?

### h) L'électricité solaire est vendue

soit via des tarifs d'achat réglementés, soit via des appels d'offre (vente sur le marché et complément de rémunération) , soit directement (PPA),

**Les prix réglementés pour des puissances inférieures à 500kWc** étaient les suivants pour la période 1er nov 2024 au 31 janv 2025 :

Puissance	Tarifs d'achat EDF Vente du surplus	Tarifs d'achat EDF Vente totale
≤ 3 kWc		0,1031 €/kWh
> 3 et ≤ 9 kWc	0,1269 €/kWh	0,0876 €/kWh
> 9 et ≤ 36 kWc		0,1302 €/kWh
> 36 et ≤ 100 kWc	0,0761 €/kWh	0,1132 €/kWh
> 100 et ≤ 500 kWc	0,1052 €/kWh	0,1052 €/kWh

La rémunération se compose de 3 éléments :

- vente du kWh (voir ci-dessus)
- prime à l'autoconsommation
- prime à l'intégration paysagère

Les conditions pour bénéficier de ces tarifs sont les suivantes :

- Implantation sur bâtiment
- bilan carbone inférieur à 550 kg eqCO2/kWc pour les installations supérieures à 100 kWc

Ces tarifs et primes évoluent, en application de l'arrêté tarifaire S21.

En décembre 2024, le Gouvernement a lancé une consultation auprès de la filière visant à recueillir l'avis des parties prenantes sur une baisse des tarifs d'achat.

Les nouveaux tarifs devraient être communiqués prochainement.

Pour les puissances supérieures à 500kWc **le producteur vend sa production sur le marché de l'électricité et perçoit une prime énergie complémentaire ainsi qu'une prime de gestion. (voir le [décret n° 2016-682 du 27 mai 2016](#)).**

Des appels d'offres sont régulièrement lancés par la CRE pour la réalisation et l'exploitation d'installations solaires qui bénéficieront d'un tarif d'achat dit complément de rémunération. Le complément de rémunération correspond à la différence entre le tarif de référence proposé par le candidat (et incluant les coûts de gestion et revenus de capacité) et le prix de marché de référence.

Le tarif de référence est pour le dernier appel d'offres (oct 2024) au sol pour P<5MWc de l'ordre de 81€/MWh