

# Le solaire photovoltaïque en France : réalité, potentiel et défis

Des questions...



...et des réponses

préparées par des **chercheuses** et des **chercheurs** du  
**CNRS** et de la

**Fédération de recherche du Photovoltaïque**

*Deuxième édition, mise à jour et enrichie*

Version du 14/09/2023

Librement disponible sur : <https://solairepv.fr>

Le contenu de ce document peut être réutilisé librement en utilisant une des citations suivantes :

- *Le solaire photovoltaïque en France : réalité, potentiel et défis*, version du 14/09/2023, disponible sur : <https://solairepv.fr>

ou :

- <https://solairepv.fr> (14/09/2023)

Photo de couverture : Stéphane Collin

# Avant-propos

L'origine anthropique du réchauffement climatique ne fait plus de doute, et l'accord de Paris adopté en 2015 par la quasi-totalité des pays du monde a fixé l'objectif de limiter l'augmentation moyenne de la température sous les 2°C. La transition énergétique, l'un des leviers essentiels pour y parvenir, est ainsi devenue un sujet de société majeur.

Différents scénarios énergétiques sont à l'étude pour parvenir à une neutralité carbone en 2050. Ils nécessitent tous une société plus sobre en énergie, une plus grande électrification des usages énergétiques, et un développement des énergies renouvelables. Mais dans le détail, les poids respectifs des économies d'énergie, des énergies renouvelables et du nucléaire varient d'un scénario à l'autre. La société doit choisir un modèle et une trajectoire de développement d'un nouveau mix énergétique. Ce choix aura des impacts sur nos modes de vie, et supposera d'accepter des contraintes, des risques ou des coûts différents. Il nécessite un débat éclairé par les connaissances les plus récentes.

## ***Quelle place le solaire photovoltaïque peut-il prendre dans le futur mix énergétique français ?***

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) a progressé au cours des 10 dernières années à une vitesse fulgurante, que personne n'avait prédite : la capacité des installations photovoltaïques dans le monde a été multipliée par 20, le prix des panneaux photovoltaïques a été divisé par 10, et leur rendement est passé de 15 % à 20 %. Le rôle que le solaire photovoltaïque peut jouer dans la transition énergétique en est bouleversé. Malheureusement, ces changements rapides sont peu pris en compte dans les débats, trop souvent biaisés par des arguments approximatifs, basés sur des données anciennes voire complètement erronées.

Un petit groupe de chercheuses et de chercheurs du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) et de la Fédération de Recherche Photovoltaïque (FedPV) a formé un atelier pour travailler collectivement sur les questions posées par le développement du solaire photovoltaïque en France. Quelle est sa réalité ? Où en est-on ? Quels sont les objectifs à court, moyen et long terme ? Sont-ils atteignables ? Le photovoltaïque coûte-t-il cher ? Est-il polluant, émetteur de CO<sub>2</sub>, dépendant de matériaux rares ?...

L'ambition de ce travail est d'apporter des réponses simples et factuelles mais précises et documentées, en utilisant les données les plus récentes, issues si possible de la littérature scientifique relue par les pairs. Ce document propose plusieurs niveaux de lecture. Pour chaque question, nous proposons une première réponse courte, *en résumé*, puis des éléments complémentaires *pour aller plus loin*. Les *sources* indiquent l'origine des données utilisées, et des documents ou sites web permettant d'approfondir les questions abordées.

Nous espérons que ce document sera utile au plus grand nombre, et contribuera à éclairer le débat citoyen sur la transition énergétique en France et les choix qui s'imposent. Nous invitons les lecteurs à se rendre sur le site <https://solairepv.fr> pour consulter les mises à jour futures de ce document, et à nous adresser d'éventuelles remarques ou suggestions.

L'équipe de l'*Atelier SolairePV*.

# Résumé pour gens pressés

## Les installations photovoltaïques solaires aujourd'hui

### 1 - Qu'est-ce qu'un panneau photovoltaïque (PV) ?

Un panneau (ou module) PV permet de transformer le rayonnement solaire en électricité.

[En savoir plus... p. 18](#)

### 2 - Quelle est la contribution du solaire PV à la production électrique française ?

En 2022, le solaire photovoltaïque a fourni **18,6 TWh**, soit **4,1 % de l'énergie électrique consommée en France** (contre 3,0 % en 2021).

[En savoir plus... p. 19](#)

### 3 - Quelle est l'énergie fournie annuellement par une installation PV de puissance nominale 1 kW ?

En France, environ **1300 kWh/an** (1,3 MWh/an), avec 5 m<sup>2</sup> de panneaux orientés au sud. Cela représente un peu plus de la moitié de la consommation électrique moyenne d'un français (2200 kWh/an).

[En savoir plus... p. 20](#)

### 4 - Quel est le coût d'une installation PV ?

Cela dépend de la taille de l'installation. Une grande centrale au sol coûte environ 0,7 €/W, contre 2 €/W pour une installation résidentielle. Le panneau ne représente qu'une petite partie de ce coût (0,25 €/W).

[En savoir plus... p. 21](#)

### 5 - Le solaire PV est-il compétitif ?

**Oui**, le solaire PV est maintenant compétitif par rapport aux autres sources d'énergie électrique, avec des coûts allant de 0,05 €/kWh pour une centrale au sol à 0,16 €/kWh pour une petite installation résidentielle en toiture.

[En savoir plus... p. 22](#)

### 6 - Le solaire PV est-il subventionné en France ?

**Oui**, le solaire PV est soutenu par des aides publiques, **comme la plupart des sources d'énergie décarbonées**. Il s'agit essentiellement de **primes à l'installation ou de tarifs d'achat garantis** sur des contrats de 20 ans.

[En savoir plus... p. 23](#)

### 7 - Une installation PV fournit-elle plus d'énergie que ce qui a été consommé pour sa fabrication ?

**Oui beaucoup plus !** En France, un système PV formé d'un module en silicium monocristallin fournit l'énergie qui a été nécessaire pour sa fabrication et son cycle de vie en environ **1 an**. Ce **temps de retour énergétique** a été divisé par deux entre 2015 et 2020.

[En savoir plus... p. 24](#)

### 8 - Quelle est la durée de vie d'une installation PV aujourd'hui ?

La durée de vie d'une installation est estimée à **30 ans**, avec une perte d'efficacité de l'ordre de 0,5 % par an. Les fabricants de panneaux PV garantissent une durée de vie de 25 à 30 ans, pendant laquelle la puissance reste au moins égale à 80 % de la valeur nominale.

[En savoir plus... p. 25](#)

## L'industrie du photovoltaïque

### 9 - Quels sont les ingrédients d'un panneau PV (1/2) ?

Un panneau PV est le plus souvent formé de **cellules en silicium, protégées par du verre**. Il faut à la fois des matériaux *fonctionnels* (silicium, argent...) qui participent directement à la conversion d'énergie, et des matériaux de *structure* (aluminium, verre, plastiques...).

[En savoir plus... p. 28](#)

### 10 - Quels sont les ingrédients d'un panneau PV (2/2) ?

En terme de **masse**, un panneau PV contient surtout de l'aluminium et du verre (83 % de la masse). Mais la **valeur** des matériaux est concentrée dans la couche de silicium (40 %) et dans les contacts métalliques (15-30 %), qui représentent une fraction minime de la masse.

[En savoir plus... p. 29](#)

### 11 - Où sont fabriqués les panneaux PV ? D'où vient le silicium (Si) ?

Les différentes étapes de fabrication (voir [page 14](#)) peuvent être réalisées par différents acteurs. **Actuellement, la Chine domine largement le marché** : elle assure plus de 75 % de la production mondiale à chaque étape de fabrication des panneaux silicium.

[En savoir plus... p. 30](#)

### 12 - Quelle est la capacité existante de production de panneaux PV en France ?

**De l'ordre de 850 MW par an en 2021**. Ce chiffre correspond uniquement à la dernière étape de fabrication (assemblage de cellules en modules). Cette production est très inférieure à la capacité installée chaque année en France (3000 MW en 2021).

[En savoir plus... p. 31](#)

### 13 - Quels sont les projets de développement de la production de panneaux PV en France ?

**De nombreux projets industriels sont actuellement en cours de développement en France**. S'ils arrivaient tous à maturité, la production de panneaux PV pourrait atteindre près de 15 GW par an d'ici 2030.

[En savoir plus... p. 32](#)

### 14 - Quelle est la production de systèmes PV en Europe ?

L'Europe est présente au début et à la fin de la chaîne de valeur des modules (polysilicium, assemblage des modules), mais très peu de cellules y sont produites actuellement. Il existe de nombreux projets pour relocaliser l'ensemble de la production, avec un objectif européen de 30 GW en 2025.

[En savoir plus... p. 33](#)



## Photovoltaïque, environnement et société

### 15 - Est-ce qu'un panneau PV peut se recycler ?

**Oui le recyclage des panneaux PV est possible**, la collecte et le traitement en fin de vie des modules et de l'onduleur sont d'ailleurs **obligatoires**. En masse, jusqu'à **95 % d'un module peut être valorisé**, mais sous une forme dégradée.

[En savoir plus... p. 36](#)

### 16 - Quelles sont les émissions de CO<sub>2</sub> d'un système PV ?

Une installation PV sur toiture à base de panneaux en silicium monocristallin émet en moyenne **32 gCO<sub>2</sub>eq/kWh**. Les émissions ont lieu essentiellement au moment de la fabrication des panneaux (71 %).

[En savoir plus... p. 37](#)

### 17 - Les modules PV utilisent-ils des matériaux rares ?

La **rareté des matériaux utilisés pour le photovoltaïque n'est pas un verrou pour la production à grande échelle**, mais leur **criticité** doit être prise en compte. Attention à ne pas confondre *terres rares* et matériaux rares. Les modules PV ne contiennent pas de terres rares.

[En savoir plus... p. 38](#)

### 18 - Les modules PV utilisent-ils des matériaux critiques ?

**Certains métaux** entrant dans la composition d'un panneau solaire **sont considérés comme critiques** (aluminium, silicium métallurgique, argent), c'est-à-dire qu'il existe un risque pour leur approvisionnement. Cette criticité n'est pas un verrou mais doit être prise en compte pour le déploiement du PV à grande échelle.

[En savoir plus... p. 39](#)

### 19 - Quel est l'impact de la filière PV sur l'emploi en France ?

La filière solaire photovoltaïque française représentait environ 12000 emplois (équivalents temps plein) en 2020, en hausse de 50 % par rapport à 2019 (environ 8000 emplois). **Pour l'année 2021, le nombre d'emplois est estimé à 20000.**

[En savoir plus... p. 40](#)

### 20 - Peut-on installer des panneaux PV sur, ou aux abords des monuments historiques ?

**Oui** en principe, mais il faut a minima consulter les Architectes des Bâtiments de France. L'autorisation dépend notamment du niveau de protection de la zone, et de l'impact visuel du projet.

[En savoir plus... p. 41](#)

## Quelle place pour le solaire photovoltaïque dans le futur mix énergétique français ?

### 21 - Où en est le développement du solaire PV par rapport aux objectifs de la PPE ?

La programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) prévoit d'atteindre 20 GW en 2023 et entre 35 et 44 GW en 2028. **En mars 2023, 17,2 GW étaient raccordés, soit 86 % de l'objectif 2023.**

[En savoir plus... p. 44](#)

### 22 - Quelle est la production de solaire PV prévue par les différents scénarios ?

Dans les six scénarios de RTE pour le futur mix énergétique, l'énergie solaire PV produite en 2050 est comprise **entre 90 et 250 TWh par an**, soit 5 à 14 fois la production de 2022.

[En savoir plus... p. 45](#)

### 23 - Quelle est la surface de panneaux PV nécessaire selon les scénarios en 2050 ?

Les surfaces nécessaires pour le solaire PV en 2050 dépendent du scénario considéré, et se situent entre 400 et 1200 km<sup>2</sup>, soit un chiffre **très inférieur aux surfaces déjà artificialisées (environ 50 000 km<sup>2</sup>)**.

[En savoir plus... p. 46](#)

### 24 - Les surfaces déjà artificialisées suffisent-elles pour atteindre les objectifs énergétiques à l'horizon 2050 ?

**Oui**, un potentiel de production solaire PV de 200 TWh/an est déjà identifié en utilisant des technologies commerciales et des surfaces déjà artificialisées disponibles (toitures, friches, parkings). Les scénarios les plus ambitieux (150 à 250 TWh/an) semblent donc réalisables.

[En savoir plus... p. 47](#)

### 25 - Quel est le potentiel pour le PV solaire en France ? Les toitures.

La France a un potentiel de production PV en toiture de 125 TWh/an à un coût inférieur à 0,15 €/kWh ((coûts 2019), c'est le plus fort potentiel en Europe.

[En savoir plus... p. 48](#)

### 26 - Quel est le potentiel pour le PV solaire en France ? Les friches et parkings.

Le potentiel de production annuel du solaire PV installé sur des friches et des parkings (ombrières) est évalué à environ 70 TWh par an.

[En savoir plus... p. 49](#)

### 27 - Vers de nouveaux modes de déploiement du photovoltaïque ? Les panneaux verticaux.

**Il est possible d'installer des panneaux PV verticalement**, par exemple sur les façades des bâtiments ou comme mur anti-bruit.

[En savoir plus... p. 50](#)

### 28 - Vers de nouveaux modes de déploiement du photovoltaïque ? L'agrivoltaïsme.

**L'agrivoltaïsme désigne des installations photovoltaïques situées sur des parcelles agricoles, combinant ainsi production électrique et agricole.** Le cadre réglementaire impose des contraintes telles que la réversibilité de l'installation et le maintien d'un revenu agricole significatif.

[En savoir plus... p. 51](#)

### 29 - Vers de nouveaux modes de déploiement du photovoltaïque ? Le PV flottant.

**Le PV flottant désigne des installations PV situées sur des étendues d'eau (le plus souvent douce).** Il a pour avantage la grande disponibilité de ces surfaces, mais les impacts environnementaux ne sont pas encore bien connus.

[En savoir plus... p. 52](#)

## Démêlons le vrai du faux !

Réponses à quelques critiques courantes entendues dans le débat public

### 30 - Le solaire PV, de fortes émissions de CO<sub>2</sub> ?

**Non, le solaire PV n'a pas un mauvais bilan carbone !** Les énergies décarbonées (renouvelables et nucléaire) génèrent des émissions de 10 à 40 gCO<sub>2</sub>eq/kWh (32 gCO<sub>2</sub>eq/kWh pour le PV), plus de 10 fois inférieures aux énergies fossiles, gaz ou charbon (500 à 1000 gCO<sub>2</sub>eq/kWh).

[En savoir plus... p. 54](#)

### 31 - Le solaire PV, une énergie diffuse, responsable de l'artificialisation des sols ?

**Oui, l'énergie solaire est diffuse** (260 kWh/an/m<sup>2</sup> en moyenne), **et ça n'est pas forcément un inconvénient** : l'énergie solaire est abondante, disponible partout et sans danger. **Non**, le développement du solaire PV ne se fera pas forcément au détriment des forêts, des cultures ou des espaces protégés.

[En savoir plus... p. 55](#)

### 32 - Les énergies renouvelables, un risque pour la stabilité du réseau ?

S'il est exact que la production photovoltaïque ne contribue pas spontanément à la stabilité du réseau comme peuvent le faire d'autres générateurs (turbines), "**il y a un consensus scientifique sur l'existence de solutions technologiques permettant de maintenir la stabilité du système électrique**". Ces solutions technologiques ne sont pas encore nécessaires.

[En savoir plus... p. 56](#)

### 33 - Les énergies renouvelables, un problème pour les infrastructures ?

Pour la prochaine décennie, les infrastructures actuelles constituent un bonne ossature pour le développement des énergies renouvelables. Des adaptations du réseau de transport électrique seront nécessaires, notamment à partir de 2030-2035, mais leur ampleur restera modérée.

[En savoir plus... p. 57](#)

### 34 - Le silicium, un matériau critique pour le solaire PV ?

Attention aux mauvaises interprétations : le silicium n'est pas un matériau *rare*. En revanche, le silicium métallurgique peut être considéré comme *critique* car il est produit par peu d'acteurs à l'échelle mondiale.

[En savoir plus... p. 58](#)



## Pour voir plus loin...

### 35 - Le PV contribue-t-il aux îlots de chaleur urbains ?

A ce jour il n'y a pas de consensus sur l'impact des systèmes PV sur les températures urbaines.

[En savoir plus... p. 60](#)

### 36 - Comment le photovoltaïque a t-il été inventé ?

**La découverte de l'effet photovoltaïque remonte à 1839, en France, par Edmond Becquerel.** D'abord utilisé pour la mesure de l'illumination, les applications énergétiques ne démarrent vraiment qu'avec l'invention de dispositifs en silicium en 1954 et les besoins de l'industrie spatiale naissante.

[En savoir plus... p. 61](#)

### 37 - Quelles sont les technologies du solaire photovoltaïque ? (1/2)

**Les cellules solaires en silicium représentent actuellement 95 % du marché,** mais il existe également des cellules solaires commerciales en **couches minces** de CdTe et CIGS (moins de 5 % du marché), en matériaux organiques (légères et souples) pour des applications de niche, et des multi-jonctions à haut rendement (III-V et germanium) pour les applications spatiales.

[En savoir plus... p. 62](#)

### 38 - Quelles sont les technologies du solaire photovoltaïque ? (2/2)

**Les pérovskites hybrides** sont à la base de la technologie émergente qui a connu le plus fort développement au cours des dernières années. La prochaine génération de cellules solaires pourrait être formée de tandems, par exemple pérovskite sur silicium.

[En savoir plus... p. 63](#)

### 39 - Le solaire PV est-il une source d'électricité variable, intermittente, pilotable, flexible, fiable, prévisible ? (1/2)

Le solaire PV est une source d'électricité dont le fonctionnement est **très fiable mais peu flexible**, et dont la production est **intermittente**. Ses variations ont pour origine l'alternance jour/nuit et les conditions environnementales.

[En savoir plus... p. 64](#)

### 40 - Le solaire PV est-il une source d'électricité variable, intermittente, pilotable, flexible, fiable, prévisible ? (2/2)

Le solaire PV est une source d'électricité fiable mais intermittente, dont les fluctuations locales journalières sont atténuées par l'**effet de foisonnement**, et les **variations saisonnières** peuvent être en partie compensées par la complémentarité avec l'éolien. La **prévisibilité** de la production solaire PV doit être considérée à différentes échelles de temps.

[En savoir plus... p. 65](#)

### 41 - Adapter le réseau au nouveau mix énergétique à l'horizon 2050... à quel coût ?

[En savoir plus... p. 66](#)

### 42 - Quelle source d'énergie pour produire de l'hydrogène par électrolyse ?

[En savoir plus... p. 67](#)

## **Puisque le solaire PV fonctionne bien et est devenu peu cher, à quoi la recherche menée dans les laboratoires sert-elle ?**

Les objectifs des scénarios les plus ambitieux pour le développement du solaire PV peuvent être atteints avec les technologies actuelles, à un coût mesuré, en utilisant les surfaces déjà disponibles (toitures, parkings, friches,...) et sans artificialisation supplémentaire.

**Les recherches actuelles visent à faciliter le déploiement du solaire PV en réduisant encore plus le coût et l'impact environnemental du PV, et en facilitant les usages (modules légers, flexibles, esthétiques...). Elles contribuent également à améliorer la compréhension fondamentale de la science du photovoltaïque.**

Les axes de recherche portent par exemple sur l'augmentation de l'efficacité, la diminution de la quantité de matériaux utilisés (particulièrement : rares, critiques, toxiques...) ou leur substitution, la fabrication de dispositifs conçus pour être facilement recyclables, ou de nouveaux champs d'application.

### **Des ressources documentaires pour approfondir**

**Glossaire**

[p. 68](#)

**Acronymes et unités**

[p. 69](#)

**Crédits**

[p. 70](#)

[p. 71](#)



En été, à midi, sans nuage

**1000**  
W/m<sup>2</sup>

Technologie la plus répandue :  
le silicium

Puissance nominale

Coût indicatif (installation résidentielle)

Empreinte carbone

**Si**

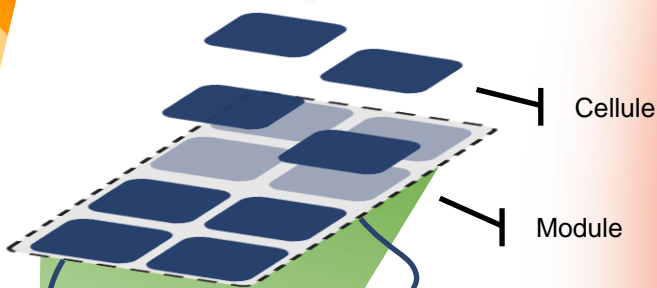
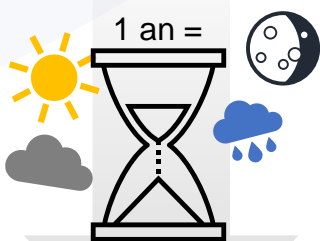
1 panneau (1,7 m<sup>2</sup>)

~ 350 Wc

~ 700 €

~ 30 gCO<sub>2</sub>eq/kWh

Sur un an, les conditions climatiques (et la nuit !) font qu'une surface reçoit moins d'énergie que si elle était tout le temps en plein soleil



**~15%**

Facteur de charge

Energie lumineuse reçue

**1300**

kWh/an/m<sup>2</sup>

**~20%**

Rendement

Électricité récupérable

**260**

kWh/an/m<sup>2</sup>

**20**m<sup>2</sup>

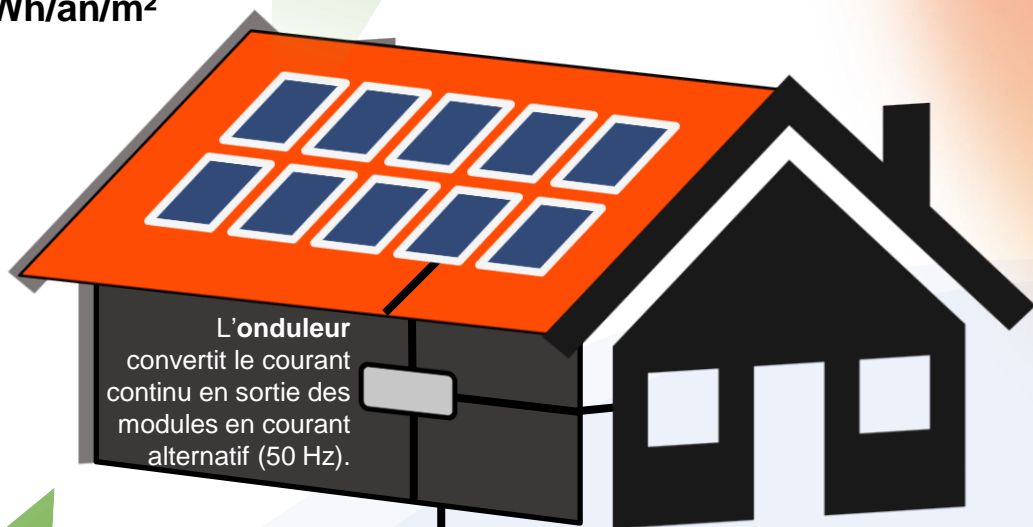
12 panneaux sur un toit orienté sud

**4,2kW**

Puissance nominale

**5MWh**

Production annuelle



Consommation électrique d'une famille de 4 (hors chauffage)

12

Injection sur le réseau et vente du surplus



**1000**  
W/m<sup>2</sup>

En France, en milieu d'une journée d'été, la **puissance du rayonnement solaire** est d'environ **1000 W/m<sup>2</sup>** (1 kW/m<sup>2</sup>).

**1300**  
kWh/an/m<sup>2</sup>

Cette puissance lumineuse varie au cours de l'année en fonction des saisons et des conditions météorologiques et de l'heure. L'**énergie lumineuse annuelle** reçue par unité de surface est d'environ **1300 kWh/an/m<sup>2</sup>**.

**~15%**  
Facteur de charge

Une autre manière de tenir compte des variations d'éclairement au fil de l'année, ainsi que de l'alternance jour nuit, est de définir le **facteur de charge** d'une installation, qui est **d'environ 0,15** pour le solaire PV en France. C'est le rapport entre l'énergie réellement reçue par une surface durant 1 an (=8760 h) et l'énergie fictive qui serait reçue par cette même surface si elle était en plein soleil pendant 8760 h.

**~20%**  
Rendement

Les **modules photovoltaïques** (ou panneaux) sont le plus souvent constitués de cellules de silicium connectées entre elles et protégées par une plaque de verre. Leur **efficacité**, ou **rendement de conversion** de l'énergie lumineuse en énergie électrique, est d'environ **20 %**. Un module d'une surface d'1 m<sup>2</sup> éclairé par une puissance de 1000 W/m<sup>2</sup> fournit donc une **puissance électrique nominale de 200 W** (on parle également de puissance crête de 200 Wc).

**260**  
kWh/an/m<sup>2</sup>

L'**énergie électrique** produite pendant une année est équivalente à celle obtenue avec la puissance nominale pendant 15 % des 8760 heures d'une année, soit  $200 \times 0,15 \times 8760 = \mathbf{263 \text{ kWh/m}^2}$ , qui correspond bien à 20 % de l'énergie lumineuse reçue par m<sup>2</sup>.

**20** m<sup>2</sup>

Sur un toit orienté sud

## EXEMPLE

Une installation solaire photovoltaïque de **20 m<sup>2</sup> en toiture** orientée sud, formée de 12 modules de 1 m x 1,7 m d'une puissance unitaire de 350 W, a une **puissance nominale de 4,2 kW**. Elle fournira environ **5 MWh d'énergie électrique chaque année**, soit un peu plus que la consommation d'une famille de 4 personnes (hors chauffage).

**5** MWh

Production annuelle



# Du quartz Au panneau

Le parcours du silicium



**Quartz**  
( $\text{SiO}_2$  + impuretés)

**1** Le quartz est un cristal impur de  $\text{SiO}_2$ . Il est extrait de carrières de roche métamorphique appelée quartzite.



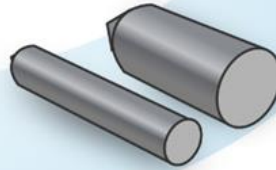
**Silicium Métallurgique**  
(pureté >99%)

**2** Le silicium métallurgique est obtenu par fusion à  $2000^\circ\text{C}$  et réduction du quartz en présence de charbon.



**Polysilicium**  
(pureté >99.999 99%)

**3** Le polysilicium s'obtient en transformant le silicium métallurgique en une espèce gazeuse appelée silane puis en redéposant les atomes de silicium par procédé Siemens.



**Lingot de monocristaux**  
(jusqu'à 5m de hauteur)

**4** Ces lingots sont formés après la fonte du polysilicium dans un creuset porté à plus de  $1400^\circ\text{C}$  et la lente solidification initiée par un germe cristallin.



**Plaquettes**  
( $15 \times 15 \text{cm}^2$ )

**5** Des plaquettes (wafers) de 100 à 200 microns d'épaisseur sont découpées à partir des lingots à l'aide de scies diamantées.



**Cellules**  
(contactées)

**Panneau**  
(~20% d'efficacité)

**6** Les cellules sont obtenues en déposant successivement de nombreuses couches de silicium (voir page de droite)

**7** Le panneau est un assemblage de cellules, de verre, d'un cadre en aluminium et de câbles électriques. Les surfaces varient.



# La structure De la cellule

Un assemblage précis

## Encapsulant

Polymère (EVA) permettant de protéger la couche active et d'assurer un bon collage avec le verre.

## Verre

D'excellente qualité (transparence), le verre sert principalement de support mécanique pour la rigidité de la cellule.

## Couche anti-reflet

Par exemple en nitrure de silicium ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), elle permet de minimiser les réflexions de la lumière sur la face avant.

## Contact métallique avant

Grille imprimée en argent ou en cuivre pour collecter les charges (électrons) générées dans la cellule.

## Silicium

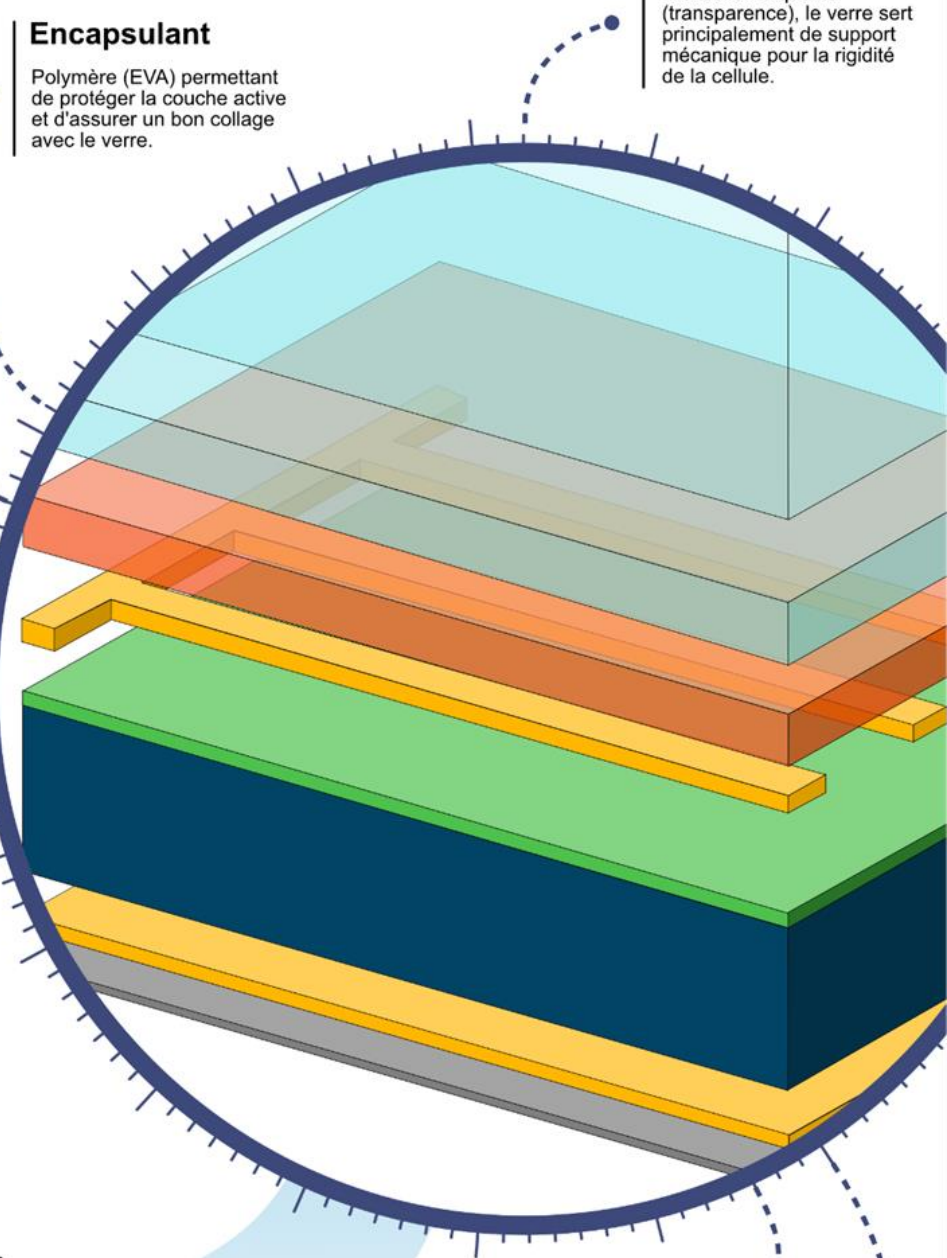
Couche active permettant d'absorber la lumière et de générer des charges. Elle est typiquement constituée d'un empilement de plusieurs couches aux propriétés (dopage) différentes.

## Support

Selon la technologie, peut être un substrat de verre ou un film polymère (par exemple en Tedlar).

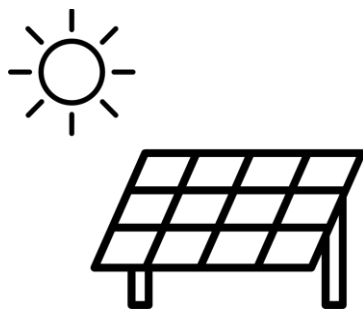
## Contact métallique arrière

Grille ou contact pleine plaque.





# Les installations solaires photovoltaïques aujourd'hui



# 1 - QU'EST-CE QU'UN PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE (PV) ?



## En résumé

Un panneau (ou module) PV permet de transformer le rayonnement solaire en électricité. Il est généralement formé de cellules en silicium, protégées par du verre dans un cadre en aluminium. Son rendement de conversion est de l'ordre de 20 %. Au soleil, une puissance nominale de 1 kW est obtenue avec une surface de 5 m<sup>2</sup>, soit 3 panneaux.

## Pour aller plus loin

Un panneau PV exploite une source d'énergie quasi-infinie (le soleil). Il peut être installé en toiture, en façade des bâtiments, au sol ou comme ombrière de parking. Il peut être connecté au réseau électrique public ou faire partie d'un système autonome. En France, en 2022, les panneaux commerciaux sont généralement formés de silicium (95 % du marché mondial en 2022 [1]). Ils ont un rendement d'environ 20 %, avec une puissance nominale de 350 W pour une surface de 1 m x 1.7 m.

Un panneau photovoltaïque contient des matériaux photosensibles (majoritairement des semiconducteurs) capables d'utiliser les photons du rayonnement solaire pour exciter des électrons qui alimentent des appareils électriques. Son rendement est défini par le rapport entre l'énergie électrique produite et l'énergie solaire reçue sous forme de lumière. Il peut donc varier en fonction de la technologie utilisée et de l'état du panneau. La technologie la plus répandue actuellement est à base de silicium monocristallin, avec des rendements atteignant 24 % pour les modules records [2], et autour de 20 % pour des modules commerciaux bon marché. Cependant, plusieurs facteurs peuvent influencer le rendement d'un panneau PV comme le niveau d'ensoleillement, l'ombrage, la température extérieure, l'orientation et l'inclinaison du panneau, etc.

Comme l'énergie fournie par le soleil dépend entre autres des conditions météorologiques et de la position du soleil dans le ciel, la puissance fournie par un panneau PV ne sera pas toujours égale à sa puissance nominale (plus de détails dans la [Fiche n°3](#)). Il est important de ne pas confondre un panneau solaire PV avec un panneau solaire thermique, qui permet de transférer l'énergie solaire à un fluide caloporteur sous forme de chaleur, pour ensuite être utilisée pour le chauffage de bâtiments, la production d'eau chaude sanitaire, ou encore dans divers procédés industriels.

## Sources

1. Rapport IEA-PVPS Trends in Photovoltaic Applications 2022, [https://iea-pvps.org/trends\\_reports/trends-2022/](https://iea-pvps.org/trends_reports/trends-2022/).
2. NREL Champion Photovoltaic Module Efficiency Chart <https://www.nrel.gov/pv/module-efficiency.html>.



## 2 - QUELLE EST LA CONTRIBUTION DU SOLAIRE PV À LA PRODUCTION ÉLECTRIQUE FRANÇAISE AUJOURD'HUI ?



### En résumé

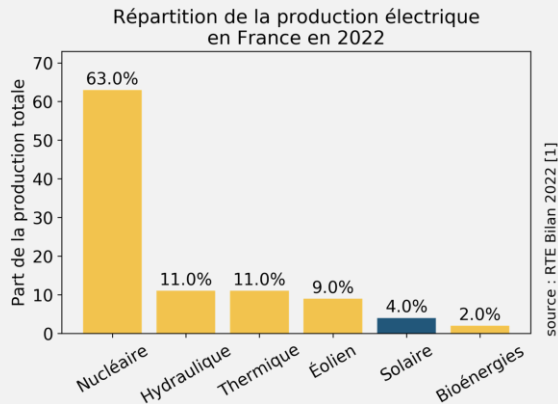
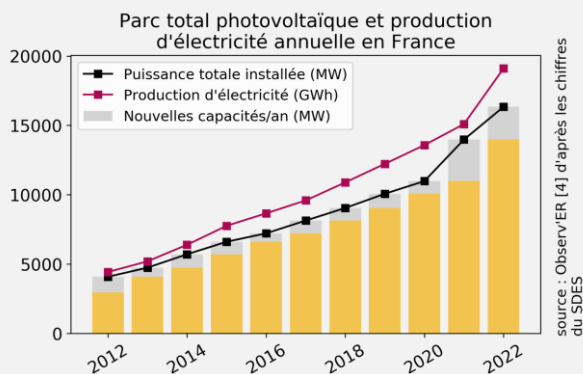
En 2022, le solaire photovoltaïque a fourni 18,6 TWh, soit 4,1 % de l'énergie électrique consommée en France (contre 3,0 % en 2021) [1].

### Pour aller plus loin

En dix ans (2012-2022), la puissance du parc photovoltaïque installé en France métropolitaine a été multipliée par 4 pour atteindre 15,7 GW. Similairement, la production d'énergie solaire a été multipliée par 4 avec 18,6 TWh en 2022 [1,2].

Le PV a ainsi permis de couvrir 4,1 % de la consommation électrique en 2022, contre 3,0 % en 2021 et 2,8 % en 2020 [2]. En 2022, ce taux de couverture annuel atteignait 11,6 % en Corse, et seulement 1 % en région Normandie [3]. En comparaison, la puissance du parc éolien en 2022 était de 21,2 GW, pour une production électrique annuelle de 38,7 TWh, soit 8,5 % de l'électricité annuelle consommée en 2022 [3].

Les chiffres diffèrent selon les sources, en raison de la zone géographique considérée ou des installations prises en compte. Ainsi, en 2022, la production photovoltaïque était comprise entre 14,7 et 19,1 TWh (18,6 TWh selon RTE) [1-6] et la puissance du parc installé était comprise entre 14,7 et 16,3 GW (15,7 GW selon RTE) [1-6].



1. RTE, bilan 2022. <https://analysesetdonnees.rte-france.com/bilan-electrique-synthese>.
2. RTE, bilan 2021. <https://bilan-electrique-2021.rte-france.com>.
3. <https://www.rte-france.com/analyses-tendances-et-prospectives/le-panorama-de-lelectricite-renouvelable>
4. Ministère de la transition écologique, Service des données et études statistiques (SDES), <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/les-energies-renouvelables?rubrique=21>
5. Observ'ER, Le Baromètre 2022 des énergies renouvelables électriques en France. [https://energies-renouvelables.org/wp-content/uploads/2023/01/ObservER\\_BARO\\_ENR\\_ELEC\\_2022-20230126-web.pdf](https://energies-renouvelables.org/wp-content/uploads/2023/01/ObservER_BARO_ENR_ELEC_2022-20230126-web.pdf)
6. IEA, Renewables Data Explorer – Data Tools - IEA (en anglais) <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/renewables-data-explorer>

### 3 - QUELLE EST L'ÉNERGIE FOURNIE ANNUELLEMENT PAR UNE INSTALLATION PV DE PUISSANCE NOMINALE 1 kW ?



#### En résumé

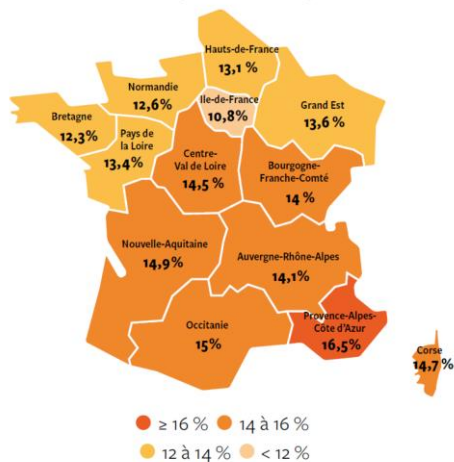
Pour une puissance nominale de 1 kW installée en France (5 m<sup>2</sup> de panneaux orientés au sud), la production annuelle est d'environ 1300 kWh (1,3 MWh), soit un peu plus de la moitié de la consommation électrique moyenne d'un français (2200 kWh/an). Cela correspond à un facteur de charge moyen de 15 %.

#### Pour aller plus loin

Le facteur de charge correspond au rapport entre l'énergie effectivement produite et celle qui aurait été produite si le panneau PV avait fonctionné à sa puissance nominale pendant toute la durée considérée. C'est une manière de mesurer l'écart entre les conditions réelles (ensoleillement variable, nuit, température...) et les conditions nominales (éclairage solaire de 1 kW/m<sup>2</sup> à 25°C).

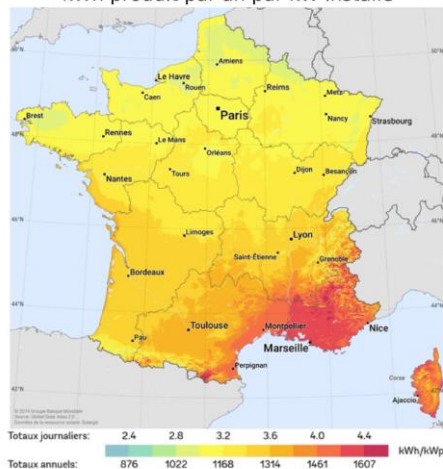
Les cartes ci-dessous donnent la distribution sur le territoire du facteur de charge et de la production par kW nominal (aussi appelé kWc). A l'échelle des régions, elles montrent que la production d'électricité photovoltaïque est en moyenne 50 % plus élevée dans le sud de la France que dans le nord.

Facteur de charge solaire moyen en 2022



source : Panorama de l'électricité renouvelable au 31/12/2022 [1]

kWh produit par an par kW installé



source : <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/france> [2]

#### Sources

1. Panorama de l'électricité renouvelable, 31 décembre 2022. <https://www.rte-france.com/analyses-tendances-et-prospectives/le-panorama-de-lelectricite-renouvelable> (juillet 2023).
2. <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/france>.

## 4 - QUEL EST LE COÛT D'UNE INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE ?



### En résumé

Les modules PV, briques de base des installations PV, ont vu leur prix être divisé par 10 en 10 ans. Leur prix avoisine désormais 0,25 €/W [1] (soit 50 €/m<sup>2</sup>). Le coût des installations complètes a également beaucoup baissé. Il se situe autour de 2 €/W pour les installations résidentielles et de 0,7 €/W pour les grandes centrales au sol.

### Pour aller plus loin

La brique de base d'une installation photovoltaïque est le module. Son coût est exprimé en €/W. Grâce aux progrès techniques et à des effets d'échelle, ce coût a connu une forte diminution, de 2,1 €/W en 2010 à 0,2 €/W en 2020 [2], soit une division par 10 en 10 ans ! Le prix est ensuite reparti à la hausse, pour atteindre 0,25 €/W en 2022 [1].

Néanmoins, une installation photovoltaïque, ce n'est pas que des modules. Il faut aussi de la main d'œuvre pour les installer, un onduleur et des éléments électriques pour l'interconnexion avec le réseau. Une installation complète est donc plus chère. Son coût diminue également, mais pas aussi vite que celui des modules [3]. En 2019 en France, une installation résidentielle en toiture coûtait autour de 2 €/W, une centrale au sol de taille moyenne 0,7 €/W [3].

**Exemple pour un particulier** d'une installation de 25 à 30 m<sup>2</sup> de panneaux PV sur un toit de maison individuelle en 2023 [4] :

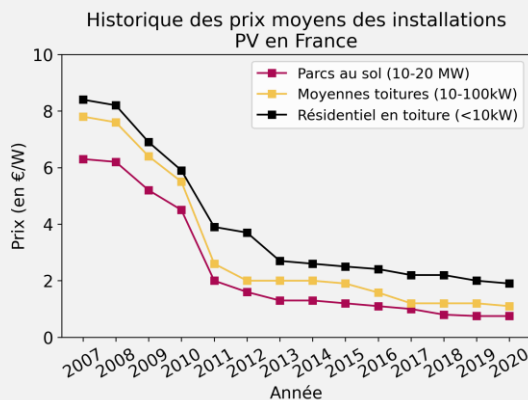
**Puissance nominale** : 6 kW.

**Coût d'installation** : 12 000 € à 15 000 € (2 €/W à 2,5 €/W en 2023, sans subvention, voir la [Fiche n°6](#)) [4]

**Électricité produite par an** : 7800 kWh.

Au prix du kWh actuel (~0,227 €), cette installation sera **rentabilisée en ~8 ans**.

**Consommation électrique annuelle** d'une maison hors chauffage : ~5000 kWh [5].



1. <https://www.pvxchange.com/Price-Index>.
2. IEA - <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/evolution-of-solar-pv-module-cost-by-data-source-1970-2020>.
3. IEA PVPS Ademe – Etat du photovoltaïque en France, 2021, <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2022/07/IEA-PVPS-NSR-France-EN-2021-v5.pdf>.
4. Exemples de devis : <http://forum-photovoltaïque.fr/viewforum.php?f=22>.
5. Rapport de l'ADEME, "[Alléger l'empreinte environnementale de la consommation des Français en 2030](#)", rapport de synthèse ([pdf](#)), page 28.

## 5 - LE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE EST-IL COMPÉTITIF ?



### En résumé

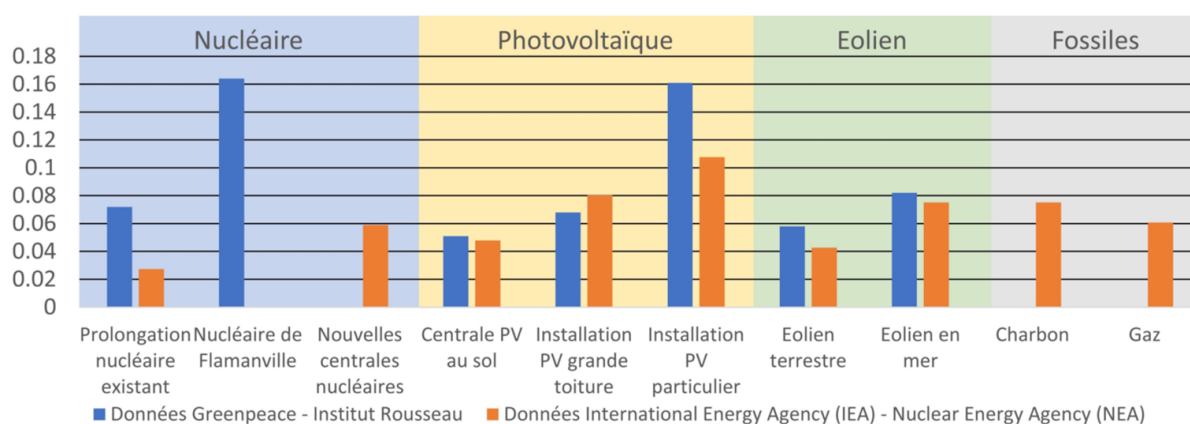
Oui, le solaire photovoltaïque est maintenant compétitif par rapport aux autres sources d'énergie électrique, avec des coûts allant de 0,05 €/kWh pour une centrale au sol à 0,16 €/kWh pour une petite installation résidentielle en toiture.

### Pour aller plus loin

Le coût de l'électricité d'une installation PV dépend fortement du type et de la taille de l'installation (cf [Fiche n°4](#)). L'installation d'une grande centrale au sol coûte beaucoup moins cher en main d'œuvre que l'installation de la même puissance sur des toitures complexes d'accès.

La figure ci-dessous présente le résultat de deux études récentes basées sur le cycle de vie des installations [1,2]. Le coût de l'électricité d'origine PV issue d'une installation au sol est du même ordre de grandeur que le nucléaire existant ou l'éolien terrestre, autour de 0,05 €/kWh.

Coûts des différentes sources d'électricité (€/kWh)



**A noter :** les données Greenpeace – Institut Rousseau sont spécifiques à la France, tandis que celles de l'IEA et le NEA prennent en compte plusieurs pays. Les modes de calcul ne sont pas tout à fait équivalents. La Cour des Comptes a proposé fin 2021 des évaluations des coûts, et discute également des méthodologies de calcul et des limites de ces évaluations [3].

1. Rapport "Les coûts actuels des énergies électriques bas-carbone" publié par Greenpeace France et l'Institut Rousseau le 23/11/2021. <https://www.greenpeace.fr/energie-quel-cout-actuel-pour-lelectricite-bas-carbone/>.
2. Rapport "Projected Costs of Generating Electricity 2020" International Energy Agency et Nuclear Energy Agency, Décembre 2020. <https://www.iea.org/reports/projected-costs-of-generating-electricity-2020>.
3. Rapport "L'analyse des coûts du système électrique en France" publié par la Cour des Comptes fin 2021. <https://www.ccomptes.fr/fr/documents/58078>.

## 6 - LE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE EST-IL SUBVENTIONNÉ EN FRANCE ?



### En résumé

Oui, le solaire photovoltaïque est soutenu par des aides publiques, **comme la plupart des sources d'énergie décarbonées**. Il s'agit essentiellement de primes à l'installation ou de tarifs d'achat garantis sur des contrats de 20 ans.

### Pour aller plus loin

Les subventions pour le développement de la production PV prennent la forme d'aides directes ou indirectes. Leur montant est révisé chaque trimestre [1-3]. Les chiffres donnés ici correspondent au deuxième trimestre 2023.

- Une **prime d'investissement** réservée aux petites installations (puissance nominale inférieure à 100 kW) avec autoconsommation partielle de la production, allant de 0,11 à 0,51 €/W selon la puissance installée.
- Un dispositif d'**obligation d'achat** de la production injectée sur le réseau pour les installations de faible puissance ( $\leq 500$  kW). Le **tarif d'achat** dépend de la puissance de l'installation et de son type (autoconsommation ou injection totale dans le réseau) et est compris entre 0,08 et 0,24 €/kWh. Il est garanti par contrat sur 20 ans.
- Pour les puissances supérieures à 500 kW, le soutien correspond à des contrats de **garantie de revenus** (ou **complément de rémunération**) établis sur 20 ans : l'Etat paie la différence entre le prix du marché horaire et le prix de référence du contrat défini lors de l'appel d'offre. Cela se fait par une **mise en concurrence** dans le cadre d'**appels d'offres** dédiés, par exemple pour des installations sur bâtiments, au sol ou pour des ombrières de parking.

**Exemple pour un particulier** : imaginons un particulier qui souhaiterait installer 6 kW de panneaux PV sur son toit, pour un coût initial de 12000 € à 15000 € (voir [Fiche n°4](#)).

- s'il opte pour une installation en injection totale, il bénéficiera d'un tarif d'achat de 0,2035 €/kWh, mais pas de prime à l'installation.
- s'il opte pour une installation en autoconsommation et avec injection du surplus, il bénéficiera d'une prime à l'investissement de 0,38 €/W (soit 2280 € au total) et d'un tarif d'achat de 0,1339 €/kWh.

1. <https://www.cre.fr/Pages-annexes/open-data>
2. [https://www.photovoltaique.info/fr/tarifs-dachat-et-autoconsommation/tarifs-dachat/arrete-tarifaire-en-vigueur/#tarifs\\_de\\_vente\\_et\\_primes\\_autoconsommation\\_100\\_kwc](https://www.photovoltaique.info/fr/tarifs-dachat-et-autoconsommation/tarifs-dachat/arrete-tarifaire-en-vigueur/#tarifs_de_vente_et_primes_autoconsommation_100_kwc).
3. <https://www.ecologie.gouv.fr/solaire>.



## 7 - UNE INSTALLATION PV FOURNIT-ELLE PLUS D'ÉNERGIE QUE CE QUI A ÉTÉ CONSOMMÉ POUR SA FABRICATION ?



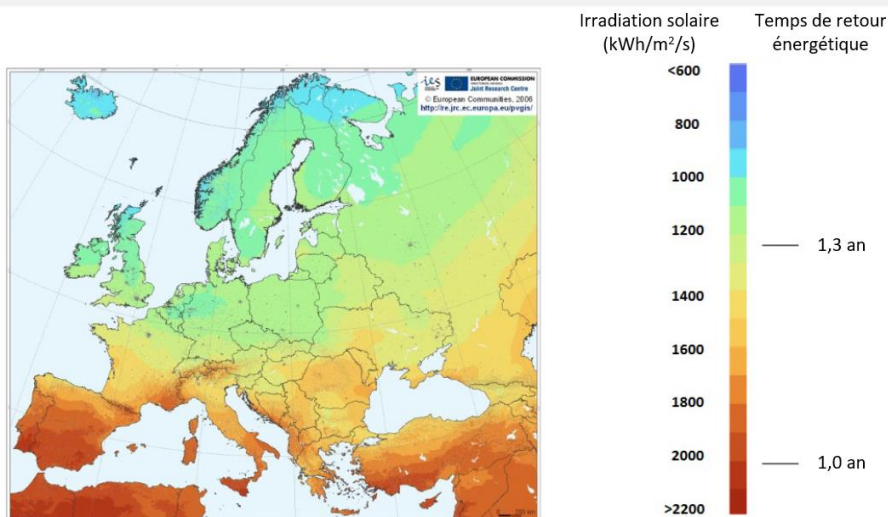
### En résumé

Oui beaucoup plus ! En France, un système photovoltaïque formé d'un module en silicium monocristallin fournit l'énergie qui a été nécessaire pour sa fabrication et son cycle de vie en 1 an [1]. Ce temps de retour énergétique a été divisé par deux entre 2015 et 2020.

### Pour aller plus loin

Le temps de retour énergétique définit la durée au bout de laquelle le système a fourni autant d'énergie que celle consommée sur l'ensemble de son cycle de vie. Cette dernière prend en compte la fabrication des modules (plus de la moitié de l'énergie consommée sur le cycle de vie), les autres équipements, le transport, la mise en place de l'installation et son démantèlement en fin de vie. La valeur du temps de retour énergétique dépend de plusieurs paramètres, en particulier la technologie utilisée et le lieu géographique de l'installation. En France, le temps de retour énergétique est d'environ 1 an.

La carte ci-contre montre que les installations PV du nord de l'Europe ont besoin d'environ 1,3 an pour produire la même quantité d'énergie que celle consommée pour leur fabrication, tandis que pour les systèmes PV du sud il suffit d'environ un an [2].



Pour les plus curieux : le taux de retour énergétique est le ratio entre l'énergie fournie pendant la durée de vie de l'installation et l'énergie consommée sur tout le cycle de vie. En France, il est estimé à 30 [1]. Ce calcul, comme le temps de retour énergétique, est fait en énergie primaire et utilise un facteur de conversion entre énergie primaire et énergie électrique. Si le ratio est calculé en énergie électrique, la valeur est de 9 et le temps de retour énergétique de 3 ans (mais ce calcul n'est pas standard) [1,3].

1. V. Fthenakis and E. Leccisi, Updated sustainability status of crystalline silicon-based photovoltaic systems: Life-cycle energy and environmental impact reduction trends, Prog. in Photovoltaics, 2021. <https://doi.org/10.1002/pip.3441>.
2. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE with support of PSE Projects GmbH, Photovoltaics Report, Report, 21 Feb. 2023, <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>.
3. <https://www.photovoltaique.info/fr/info-ou-intox/les-enjeux-environnementaux/temps-de-retour-energetique/>.

## 8 - QUELLE EST LA DURÉE DE VIE D'UNE INSTALLATION PV AUJOURD'HUI ?



### En résumé

La durée de vie d'une installation est estimée à 30 ans, avec une perte d'efficacité de l'ordre de 0,5 % par an [1,2]. Les fabricants de panneaux PV garantissent une durée de vie de 25 à 30 ans, pendant laquelle la puissance reste au moins égale à 80 % de la valeur nominale. La dégradation peut varier selon le type de module et l'environnement [1,2].

### Pour aller plus loin

Selon l'Agence Internationale de l'Energie (IEA), la durée de vie d'un panneau PV correspond au temps au bout duquel son rendement a été réduit de 20 % [1]. La perte de performance d'un module PV au cours du temps est un phénomène connu lié à la dégradation d'un ou plusieurs composants du module : la cellule, le verre, les interconnexions métalliques entre cellules, le polymère encapsulant (EVA), le film polymère de protection (Tedlar) ou la colle assurant l'adhérence entre ces différents composants [3]. Les principales sources de dégradation des modules PV sont la délamination entre l'EVA et les cellules ou entre les cellules et le verre avant, la décoloration de l'EVA, les bris de verre et fissures, les points chauds, la corrosion des connexions métalliques et le PID ("potential-induced degradation", dégradation induite par le potentiel) [3,5].

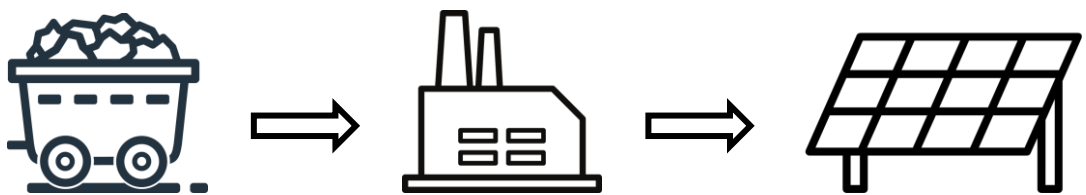
La durée de vie réelle des panneaux PV peut dépasser largement celle garantie par les fabricants, annoncée à 25 ou 30 ans. Des études ont montré que les panneaux se dégradent moins vite que prévu : 60 % des modules étudiés dans [4,5] ont une efficacité supérieure à 80 % de leur efficacité initiale après 35 ans d'exploitation (climat tempéré, 288 modules testés, installation en 1982). Environ 10 % des panneaux testés présentent même une dégradation particulièrement faible, de 0,2 % par an [4]. L'IEA a aussi modélisé la dégradation des panneaux PV et arrive à la même conclusion [1].

Dans une installation PV, d'autres composants ont une durée de vie limitée, en particulier les onduleurs, généralement garantis 5 ans et dont la durée de vie moyenne est estimée à 15 ans [6].

1. IEA - PVPS Task 13, "Service Life Estimation for Photovoltaic Modules", 2021, <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2021/07/Report-IEA%E2%80%9393PVPS-T13-16-2021-Service-Life-Estimation-4-PV-Modules.pdf>.
2. D. C. Jordan, S. R. Kurtz, K. Vansant, and J. Newmiller, Prog. in PV, 2016, <https://doi.org/10.1002/pip.2744>.
3. A. Ndiaye, "Étude de la dégradation et de la fiabilité des modules PV- Impact de la poussière sur les caractéristiques électriques de performance.", 2013, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01250271>.
4. A. Virtuani et al., Prog. in Photovoltaics, Apr. 2019, <https://doi.org/10.1002/pip.3104>.
5. E. Annigoni et al., Prog. in Photovoltaics, June. 2019, <https://doi.org/10.1002/pip.3146>.
6. C. Bucher et al., Proceedings of the 8th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Milano, 2022. <https://doi.org/10.4229/WCPEC-82022-3DV.1.46>.



# L'industrie du photovoltaïque



## 9 - QUELS SONT LES INGRÉDIENTS D'UN PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE (1/2) ?



### En résumé

Un panneau PV requiert de nombreux éléments. Il faut à la fois des matériaux fonctionnels (Si, Ag...) qui participent directement à la conversion d'énergie ; et des matériaux de structure liés au module (Al, verre, plastiques...) et à l'installation (acier, béton...). Les matériaux fonctionnels représentent 50 % du coût, mais moins de 5 % de la masse.

### Pour aller plus loin

Les quantités exactes de matière dépendent du type d'installation (au sol, en toiture, flottant...) et du périmètre considéré (par unité de surface, par watt installé ou par kWh produit). On donne ici des ordres de grandeur [1-5] pour des panneaux silicium installés au sol, sans inclure l'électronique de raccordement.

Matériau	Usage	Rôle	Poids en gramme		
			par m <sup>2</sup>	par Wc efficacité : 20 %	par kWh ensoleillement 1700 kWh/m <sup>2</sup> /an facteur de perf. 85 % 25 ans, -0,5 %/an
Silicium	Cellule	Absorbeur	600	3	0,1
Gallium ou Bore	Cellule	Dopant	0,000 2	0,000 001	0,000 000 003
Argent	Cellule	Contact	4	0,02	0,000 6
Aluminium	Module (+ cellule)	Cadre (+ contact)	1 600	8	0,24
Plastique	Module	Encapsulant + support arrière	1 700	8,5	0,25
Verre	Module	Face avant	8 000	40	1,2
Cuivre	Module	Connexion	900	4,5	0,14
Béton	Installation (sol)	Fondation	12 000	60	1,8
Acier	Installation (sol)	Rack	14 000	70	2,1

1. European Commission, Joint Research Centre, S. Carrara et al., *Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system*, 2020. <https://doi.org/10.2760/160859>
2. R. Frischknecht et al., *Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessment of Photovoltaic Systems*, IEA-PVPS, 2020
3. J. Jean et al., *Pathways for solar photovoltaics*, Energy Environ. Sci., 2015. <https://doi.org/10.1039/C4EE04073B>
4. E. Gervais et al., *Raw material needs for the large-scale deployment of photovoltaics*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 113, 110589, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110589>
5. D. Suchet & E. Johnson, *Une introduction à l'énergie solaire photovoltaïque*, EDP Sciences Ed., 2023.

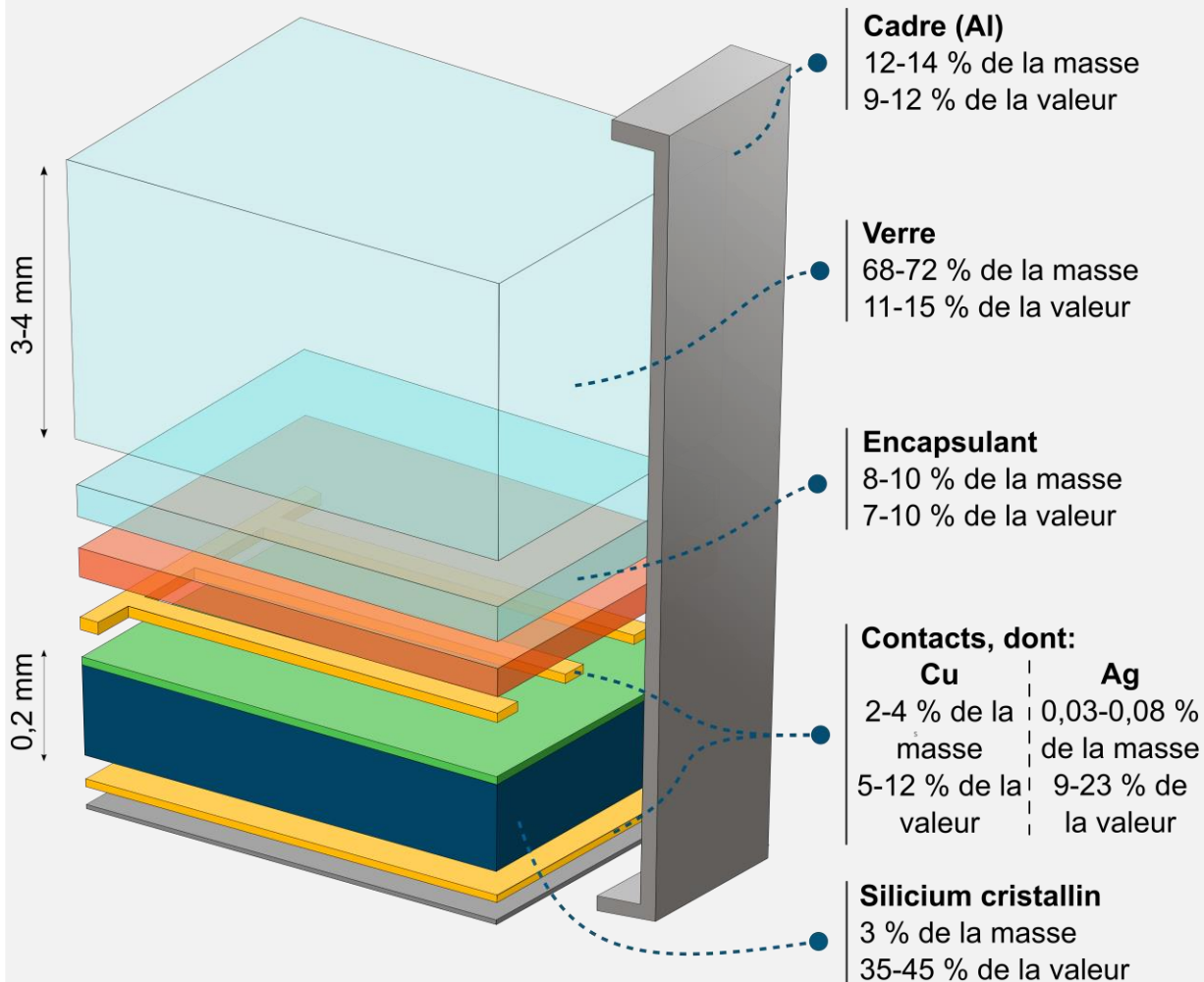
## 10 - QUELS SONT LES INGRÉDIENTS D'UN PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE (2/2) ?



### En résumé

En terme de masse, un panneau PV contient surtout de l'aluminium et du verre (83 % de la masse). Mais la valeur des matériaux est concentrée dans la couche de silicium (40 %) et dans les contacts métalliques (15-30 %), qui représentent une fraction minime de la masse. On ne présente ici que la technologie silicium, qui domine largement le marché mondial.

### Pour aller plus loin





## 11 - OÙ SONT FABRIQUÉS LES PANNEAUX PV ? D'OÙ VIENT LE SILICIUM ?



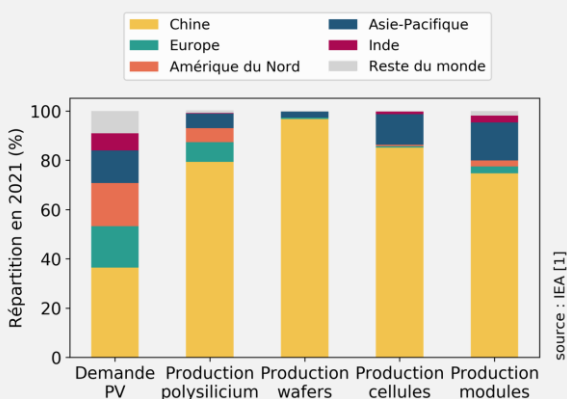
### En résumé

De l'extraction de la silice à la réalisation d'un module PV en technologie Si, il existe plusieurs étapes dans la fabrication d'un panneau PV qui peuvent être réalisées par différents acteurs ([schéma page 12](#)). La Chine domine largement le marché : elle assure plus de 75 % de la production mondiale dans toutes les étapes de la fabrication des panneaux silicium [1].

### Pour aller plus loin

La 1<sup>ère</sup> étape du processus de fabrication des panneaux PV à base de Si cristallin est le **raffinage du Si**. Il implique l'extraction de silice en carrière, principalement sous forme de quartz (silice) [2], sa transformation en Si métallurgique, puis sa purification en Si de qualité solaire. Les gisements de silice de bonne qualité sont assez rares mais présents sur tous les continents (Amérique du Nord, Brésil, Europe, Egypte, Inde, Chine, Australie) [3]. En 2021, le polysilicium de qualité solaire (dédié à 80 % à l'industrie du PV et à 20 % à celle de la microélectronique) provenait à 80 % de Chine, 8 % d'Europe, et 12 % du reste du monde [1].

Le Si de qualité solaire est ensuite fondu, puis solidifié progressivement afin de former un réseau cristallin sous forme de lingot. Ces lingots sont ensuite découpés en **plaquettes** (wafers), qui constitueront la couche d'absorption de la lumière. En 2021, les plaquettes de Si utilisées pour le PV provenaient à 96,8 % de Chine [1].



Les plaquettes subissent différents traitements (diffusion de dopants, passivation, dépôt de couches et d'une grille métallique) pour obtenir des **cellules solaires**. En 2021, la Chine a produit 85,1 % des cellules solaires Si.

Enfin, 60 à 72 cellules identiques sont interconnectées, soudées et encapsulées pour former un **module** (ou panneau) PV. En 2021, 74,7 % des modules PV provenaient de Chine.

D'autres matériaux interviennent également dans la fabrication et l'installation d'un système PV, comme l'argent, le cuivre, l'aluminium, le verre, l'acier et le béton (voir [Fiche n°9](#)).

1. IEA, Solar PV Global Supply Chains, juillet 2022. <https://www.iea.org/reports/solar-pv-global-supply-chains>
2. A. Boubault (BRGM), Le silicium: un élément chimique très abondant, un affinage stratégique, Ecomine, juin 2020. <https://www.mineralinfo.fr/fr/ecomine/silicium-un-element-chimique-tres-abondant-un-affinage-strategique>.
3. A. Boubault (BRGM), Chaîne de transformation du silicium métal, recyclage et montée de la Chine sur le marché du polysilicium en 2019, Ecomine, février 2021, <https://www.mineralinfo.fr/fr/ecomine/chaîne-de-transformation-du-silicium-métal-recyclage-montée-de-chine-sur-marché-du>.

## 12 - QUELLE EST LA CAPACITÉ EXISTANTE DE PRODUCTION DE PANNEAUX PV EN FRANCE ?



### En résumé

La capacité de production de panneaux photovoltaïques en France était de l'ordre de 850 MW par an en 2021 [1]. A noter que cette production n'inclut pas les cellules et reste très inférieure aux installations annuelles (3000 MW en 2021).

### Pour aller plus loin

Fabricant (France)	Capacité de production de modules en 2021 (MW/an) <i>Production à base de plaquettes de silicium</i>
EDF ENR PWT (Photowatt)	2
Reden Solar	90
Recom Sillia	300
S'tile	15
Systovi	80
Sunpower (Total)*	80
VMH Energies	60
Voltec Solar	200
*Usine fermée en 2022	Source [1]

La quasi-totalité de la production de modules s'appuie sur l'importation de cellules de silicium, mais il existe en France des acteurs industriels présents sur différents segments de la chaîne de valeur (équipements, composants, montures, recyclage...) [2].

A noter qu'il existe également des fabricants de cellules et modules photovoltaïques à base de films minces organiques (voir [Fiche n°37](#)), comme Armor (capacité de 40 MW).

Les chiffres indiqués sur cette fiche ne concernent que la production de modules, il existe cependant des acteurs en France et en Europe sur les autres étapes de fabrication, [voir Fiche n°14](#).

### Sources

1. Enquête de l'IEA sur les systèmes photovoltaïques en France dans le cadre du programme PVPS (Photovoltaic Power Systems Programme) [iea-pvps.org/wp-content/uploads/2022/07/IEA-PVPS-NSR-France-EN-2021-v5.pdf](https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2022/07/IEA-PVPS-NSR-France-EN-2021-v5.pdf).
2. Observ'ER Perspectives, numéro 1, consacré au PV made in France, 6 septembre 2021. <https://www.journal-photovoltaïque.org/le-barometre-des-energies-renouvelables-electriques-en-france-3/>.

## 13 - QUELS SONT LES PROJETS DE DÉVELOPPEMENT DE LA PRODUCTION DE PANNEAUX PV EN FRANCE ?



### En résumé

De nombreux projets industriels sont actuellement en cours de développement en France. S'ils arrivaient tous à maturité, la production de panneaux photovoltaïques pourrait atteindre près de 15 GW par an d'ici 2030.

### Pour aller plus loin

Plusieurs projets industriels pour augmenter la capacité de production de panneaux PV sont en cours de développement en France.

Tout d'abord, il existe actuellement **deux projets d'extension de ligne de production** en France : Voltec Solar pour passer d'une capacité de 200 MW à 500 MW d'ici fin 2023 [1] et Reden Solar qui souhaite installer une nouvelle ligne de production de modules de 200 MW d'ici fin 2023 [2].

Ensuite, il existe **deux projets d'installation d'usines intégrées de grande capacité**. L'entreprise Carbon développe un projet d'usine intégrée française avec pour objectif une capacité de production annuelle de 5 GW de cellules photovoltaïques et 3,5 GW de modules, et dont l'implantation à Fos-sur-Mer a été annoncée le 3 mars 2023 [3]. Le projet nécessite un investissement de 1,5 milliard d'euros et prévoit 3000 emplois directs, la commercialisation doit commencer en 2025 [3].

L'entreprise Holosolis a annoncé l'installation d'une gigafactory qui devrait produire à partir de 2025 à Hambach /Sarreguemines en Moselle, avec un objectif de 5 GW en 2027 [4].

Enfin, Voltec Solar s'est associé à l'IPVF pour industrialiser la prochaine génération de cellules solaires formées de tandems à base de perovskite et de silicium [5]. L'objectif est de mettre en place une ligne pilote d'ici fin 2023, puis un démonstrateur industriel de cellules tandems de 200 MW en 2025, pour atteindre une capacité de 1 GW en 2027 puis 5 GW en 2030.

1. <https://www.lesechos.fr/pme-regions/grand-est/photovoltaïque-voltec-solar-investit-malgré-l'inflation-1405092>.
2. <https://www.pv-magazine.fr/2023/04/26/lipp-francais-reden-investit-4-me-dans-une-nouvelle-ligne-de-production-de-modules-solaires-de-200-mw/>.
3. <https://carbon-solar.com>.
4. <https://www.pv-magazine.fr/2023/05/15/une-usine-de-panneaux-solaires-verra-le-jour-en-moselle-pour-710-millions-deuros-d-investissements/>.
5. <https://www.pv-magazine.fr/2022/11/10/voltec-et-lipvf-lancent-un-projet-d-industrialisation-d-une-nouvelle-technologie-tandem-perovskite-silicium/>.

## 14 - QUELLE EST LA PRODUCTION DE SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUES EN EUROPE ?



### En résumé

L'Europe est présente au début et à la fin de la chaîne de valeur des modules (polysilicium pour la fabrication des lingots, assemblage des modules), mais très peu de plaquettes et cellules y sont produites actuellement. Il existe cependant de nombreuses initiatives pour relocaliser l'ensemble de la chaîne de valeur.

### Pour aller plus loin

En 2022, les capacités de production en Europe (sans la Turquie et la Russie) pour les principales étapes de fabrication de modules photovoltaïques sont [1] :

#### Silicium métallurgique :

38,2 GW/an

#### Polysilicium :

22,1 GW/an

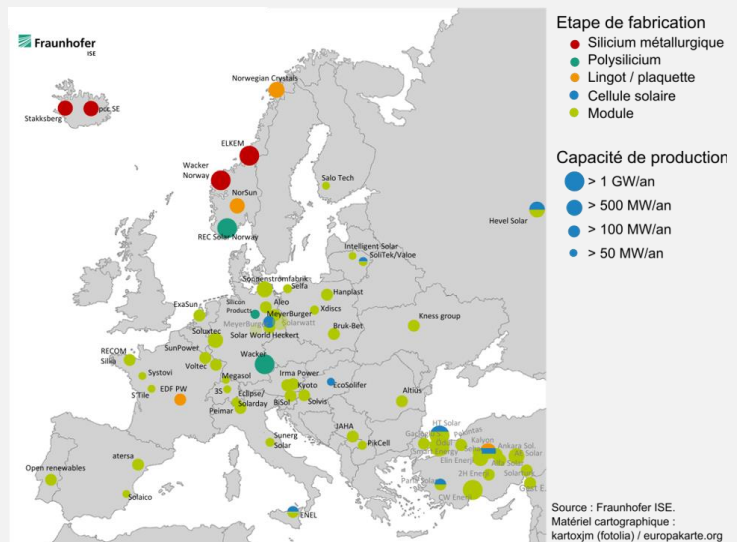
#### Lingots et plaquettes :

0,76 GW/an

#### Modules :

8,28 GW/an

Ces chiffres sont à comparer aux 28,7 GW de modules PV installés en 2021 en Europe [2].



L'Union Européenne s'est fixé comme objectif d'atteindre une capacité de production de 30 GW en 2025, sur chacune des étapes de fabrication des modules [3]. Il est intéressant de comparer ce chiffre aux 450 GW de capacités de production mondiale en 2022, qui devraient monter à 1000 GW en 2024, la Chine représentant 90 % des nouvelles additions [4]. Au-delà des modules, la fabrication d'onduleurs est importante en Europe, avec une capacité de production de 70 GW en 2022, soit 5 GW de plus qu'en 2021 [5].

Une cartographie dynamique des fabricants européens du solaire PV est disponible [6]. L'organisation ETIP PV a publié une analyse de l'état des lieux de l'industrie PV européenne : la production et les compétences existantes, le potentiel d'industrialisation à grande échelle secteur par secteur, et les différences de coût entre Europe et Asie [7].

1. [Photovoltaics Report](#), Fraunhofer ISE, version du 23 février 2023.
2. [Rapport IEA PVPS T1-43:2022](#) "Trends in photovoltaics applications 2022".
3. [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP\\_22\\_7617](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_22_7617).
4. [Renewable Energy Market Update - June 2023](#), IEA.
5. [Rapport "EU Market Outlook For Solar Power 2022 - 2026"](#), Solar Power Europe.
6. [Cartographie dynamique des fabricants européens actifs dans le solaire PV](#), SolarPower Europe.
7. <https://etip-pv.eu/publications/etip-pv-publications/download/pv-industry-white-paper-6>



# Photovoltaïque, environnement et société





## 15 - EST-CE QU'UN PANNEAU PV PEUT SE RECYCLER ?



### En résumé

Oui le recyclage des panneaux PV est possible, la collecte et le traitement en fin de vie des modules et de l'onduleur sont d'ailleurs obligatoires. En masse, jusqu'à 95 % d'un module peut être valorisé. Néanmoins, valoriser ne signifie pas recycler car les matériaux perdent en valeur dans le processus.

### Pour aller plus loin

Jusqu'à 95 % de la masse d'un module peut être *valorisée*, comme c'est le cas dans l'usine de traitement de Rousset en France [1, 2]. En outre, les fabricants de modules et d'onduleurs ont une obligation de collecte et de recyclage de leurs produits [3]. La filière est organisée par Soren [4], éco-organisme à but non lucratif, qui propose des points de collecte répartis sur l'ensemble du territoire.

Néanmoins, si 95 % de la masse d'un module peut être valorisée, il est nécessaire d'aller plus loin que ce ratio qui semble élevé au premier abord. Le verre et l'aluminium, qui sont plus facilement récupérables, représentent la majeure partie de la masse d'un module (plus de 80 %, voir [Fiche n°10](#)). En revanche, les éléments qui représentent la majeure partie de la valeur, le silicium et l'argent, ne sont pas les plus lourds et restent difficiles à réutiliser [1,5]. Deuxièmement, valoriser ne signifie pas recycler ! Dans l'état actuel de la filière, le verre est par exemple réutilisé pour la production de fibre de verre, et perd donc en valeur. De même, les polymères (encapsulants) récupérés sur un module ne sont pas réutilisés comme tels, mais plutôt comme combustibles pour la production d'énergie.

Des pistes sont explorées pour améliorer le recyclage. En laboratoire, de nouvelles cellules solaires ont été fabriquées à partir de silicium recyclé [6]. Plusieurs entreprises explorent des solutions pour mieux délaminer les différents éléments du module et préserver la pureté du silicium [7]. Enfin, des recherches visent à éco-concevoir les modules, c'est-à-dire à les fabriquer de façon à permettre leur recyclage, par exemple en facilitant la séparation des matériaux qui forment le sandwich du module.

La filière du recyclage reste donc encore largement à inventer, d'autant plus que les volumes à recycler sont voués à augmenter sensiblement. Les modules ont une durée de vie supérieure à 25 ans (voir [Fiche n°8](#)) alors que la quasi-totalité des installations actuelles en France ont été réalisées après 2010. A noter que les pertes en ligne de production, estimées à environ 1 % des volumes produits [7], constituent dès aujourd'hui une source importante pour le recyclage.

### Sources

1. PV magazine, [Recycler les panneaux photovoltaïques: état des lieux et perspectives](#), 04/05/2020.
2. Décrypter l'énergie, [Les panneaux photovoltaïques sont-ils recyclables ?](#), 10/02/2021.
3. <https://www.photovoltaique.info/fr/exploiter-une-installation/exploitation-technique/demontage-et-recyclage-des-installations-photovoltaïques/>.
4. <https://pvcycle.org/?lang=fr>, devenu <https://www.soren.eco> en 2021.
5. Projet Cabriss, 2015-2018, <https://www.aspire2050.eu/cabriss>.
6. <https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2022/solar-cells-from-recycled-silicon.html>.
7. Rosi Solar, <https://enseignement.medias.polytechnique.fr/videos/conference-coriolis-trimmed/>.

## 16 - QUELLES SONT LES ÉMISSIONS DE CO<sub>2</sub> D'UN SYSTÈME PV ?



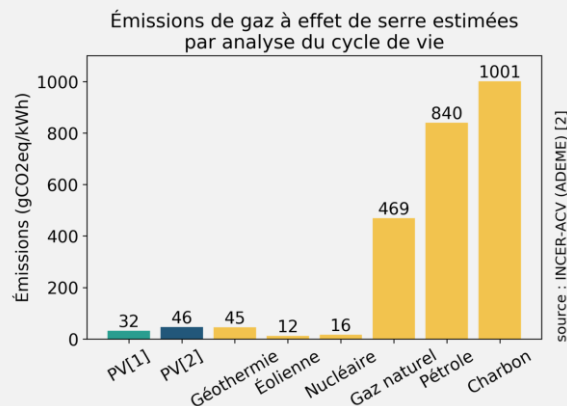
### En résumé

Une installation PV sur toiture à base de panneaux en silicium monocristallin émet en moyenne 32 gCO<sub>2</sub>eq/kWh [1]. Les émissions ont lieu essentiellement au moment de la fabrication des panneaux (71 %).

### Pour aller plus loin

Pour analyser les émissions d'une installation photovoltaïque, il faut tenir compte non seulement des émissions du module PV, mais aussi des autres éléments du système tels que l'onduleur. Pour des installations avec injection sur le réseau (sans batterie), les émissions sur le cycle de vie d'une installation PV en France sont de l'ordre de 32 gCO<sub>2</sub>eq/kWh selon les études les plus récentes [1] (46 gCO<sub>2</sub>eq/kWh selon [2]), soit environ 25 fois moins que les centrales fonctionnant au pétrole (de l'ordre de ~800 gCO<sub>2</sub>eq/kWh [2]).

Ces émissions sont majoritairement dues au procédé de fabrication [2], et notamment aux procédés à haute température durant les phases d'affinage du silicium (voir [schéma page 11](#)) [3]. Le bilan carbone des installations PV sera progressivement amélioré par l'augmentation de la part des énergies bas carbone dans le mix énergétique alimentant les usines.



La colonne bleue PV correspond aux données ADEME [2] qui proviennent elle-même du 5ème rapport du GIEC (2013) [3]. Il est important de noter que le secteur évolue très vite et que ce chiffre est désormais obsolète, comme le montre ici la colonne verte (données de [1]). La surestimation de l'empreinte carbone du PV a fait l'objet d'une publication en 2023 [4].

### Sources

1. V. Fthenakis and E. Leccisi, Updated sustainability status of crystalline silicon-based photovoltaic systems: Life-cycle energy and environmental impact reduction trends, Prog. in Photovoltaics, 2021. <https://doi.org/10.1002/pip.3441>.
2. Rapport final du projet INCER-ACV soutenu par l'ADEME ([page web](#), [rapport pdf](#))
3. 5e rapport du GIEC (2013) [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5\\_all\\_final.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_all_final.pdf).
4. R. Besseau et al. Prog. in PV, 2023. <https://doi.org/10.1002/pip.3695>.

## 17 - LES MODULES PV UTILISENT-ILS DES MATÉRIAUX RARES ?



### En résumé

La *rareté* des matériaux utilisés pour le photovoltaïque n'est pas un verrou pour la production à grande échelle, mais leur *criticité* doit être prise en compte (voir [Fiche n°18](#)). Attention à ne pas confondre *terres rares* et matériaux rares. Les modules PV ne contiennent pas de *terres rares*.

### Pour aller plus loin

#### Les modules en silicium utilisent-ils des matériaux rares ?

Le silicium, principal élément constitutif des cellules solaires, est très abondant, mais seuls certains filons de quartz très pur sont actuellement exploités pour la production de silicium de grade solaire. La quantité utilisée dans les panneaux PV a néanmoins diminué de 16 à 2,5 g/W entre 2004 et 2022 [2]. Certains métaux entrant dans la composition des modules en silicium ne sont disponibles qu'en quantité limitée (argent, indium), ce qui obligera l'industrie à adapter ses technologies, par exemple en remplaçant l'argent par le cuivre.

#### Quelle est la situation des autres technologies sur le marché ?

Les technologies couches minces actuellement sur le marché (moins de 5 % en 2022) reposent sur l'utilisation de plusieurs métaux rares [3] : le tellure (Te) pour la filière CdTe, et l'indium (In) et le gallium (Ga) pour la filière CIGS. Dans les deux cas, le développement actuel n'est pas limité par la disponibilité des ressources à court et moyen terme. Par exemple, les ressources et les technologies actuelles permettent un déploiement à l'échelle de 100 GW par an pour les filières CdTe et CIGS [4,5], voire à l'échelle du TW avec de nouvelles ruptures technologiques [5].

L'abondance des matériaux n'est cependant pas un critère suffisant.

**L'approvisionnement de certains matériaux, *rares ou pas*, est considéré comme critique (voir [Fiche n°18](#)).**

#### Les modules PV utilisent-ils des terres rares ?

Attention à ne pas confondre *terres rares* et matériaux rares. Contrairement à ce que l'on peut parfois entendre, aucun des 17 éléments constituant la famille des « terres rares », sous-ensemble du tableau périodique, n'est utilisé dans les technologies photovoltaïques actuelles [1].

1. Terres rares, énergies renouvelables et stockage d'énergie, fiche technique de l'ADEME, <https://bibliothèque.ademe.fr/energies-renouvelables-reseaux-et-stockage/492-terres-rares-energies-renouvelables-et-stockage-d-energies.html>.
2. Photovoltaics Report, Fraunhofer ISE, 21/02/2023, <https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/photovoltaics-report.html>.
3. The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions, IEA, World Energy Outlook Special Report, mai 2021. <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>.
4. V. Fthenakis et al., *Sustainability evaluation of CdTe PV: An update*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 123, 109776 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109776>.
5. Indium Availability for CIGS thin-film solar cells (2021). [https://cigs-pv.net/wortpresse/wp-content/uploads/2021/07/Indium\\_Availability\\_for\\_CIGS\\_thin-film\\_solar\\_cells\\_in\\_Europe.pdf](https://cigs-pv.net/wortpresse/wp-content/uploads/2021/07/Indium_Availability_for_CIGS_thin-film_solar_cells_in_Europe.pdf).

## 18 - LES MODULES PV UTILISENT-ILS DES MATÉRIAUX CRITIQUES ?



### En résumé

Certains métaux entrant dans la composition d'un panneau solaire sont considérés comme critiques (aluminium, silicium métallurgique, argent), c'est-à-dire qu'il existe un risque pour leur approvisionnement. Cette criticité n'est pas un verrou mais doit être prise en compte pour le déploiement du PV à grande échelle.

### Pour aller plus loin

La criticité est un paramètre permettant d'aller plus loin que la simple rareté géologique. Cette notion de criticité dépend toutefois très largement des acteurs la définissant. Pour établir leur liste des métaux critiques, la Commission Européenne et le comité pour les métaux stratégiques (COMES) se basent sur deux paramètres : l'importance économique et le risque de pénurie d'approvisionnement [1, 2].

En ce qui concerne les panneaux Si monocristallins actuels (95 % du marché en 2022 [3]), 3 métaux peuvent être considérés comme critiques :

- L'aluminium, de par son utilisation dans le cadre du panneau, est considéré critique par la commission européenne (sous la forme de minerai de bauxite) [2], l'IEA [4] et la banque mondiale [5]. Le cadre en aluminium est toutefois un des composants les plus faciles à recycler (voir [Fiche n°15](#)) et à substituer (par exemple grâce à la technologie frameless - sans cadre - ou bien avec cadre en bois).
- Le silicium métallurgique (après première purification) est également considéré comme critique par l'UE de par sa dépendance aux importations chinoises [2]. Le silicium ne présente toutefois pas de problème de rareté géologique.
- L'argent, utilisé pour collecter le courant des cellules solaires, entre dans la liste du COMES [1], bien que sa criticité ait été revue à la baisse en 2021 [6]. Il est à noter qu'en 2022, le PV comptait pour 12 % de la demande mondiale d'argent [7]. Des travaux de recherche et développement visent à substituer l'argent par d'autres matériaux conducteurs comme le cuivre.

Des scénarios établis par l'IEA [4] et par Zhang et al. [8] montrent que des technologies PV aujourd'hui marginales (CdTe, CIGS, perovskite, III-V, hétérojonction) pourraient se développer et élargir cette liste de métaux critiques. L'indium est par exemple utilisé dans les cellules à hétérojonctions (5 % du marché en 2021, 15 % attendus en 2030), et le bismuth est envisagé pour remplacer le plomb (Pb) dans les contacts (soudures). Ces deux métaux sont considérés comme critiques par la commission européenne [2].

En conclusion, le développement industriel du photovoltaïque à l'échelle de plusieurs TW par an est possible [8], mais le choix des technologies doit prendre en compte la criticité de certains matériaux.

### Sources

1. [Note de position sur la criticité des métaux pour l'économie française](#), COMES, 2018.
2. [Critical Raw Materials Resilience](#), p.3, p.21, p.23 Commission Européenne, 2020.
3. [Photovoltaics Report](#), p.4, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, 2023.
4. [The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions](#) p.45, p.60, IEA, 2021.
5. [The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition](#), The World Bank, 2020.
6. [Fiche de criticité de l'argent sur Minéralinfo](#), p.17, BRGM/COMES, Avril 2021.
7. [SILVER SUPPLY & DEMAND](#), The Silver Institute, 2022.
8. Zhang et al., "[Design considerations for multi-terawatt scale \(...\)](#)", Energy Environ. Sci., 2021.

## 19 - QUEL EST L'IMPACT DE LA FILIÈRE PV SUR L'EMPLOI EN FRANCE ?



### En résumé

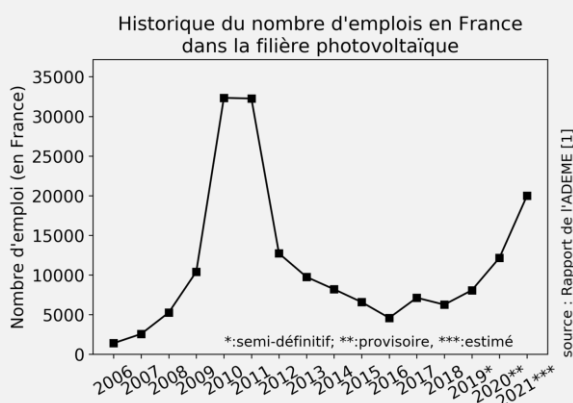
La filière solaire photovoltaïque française représentait environ 12000 emplois (équivalents temps plein) en 2020, en hausse de 50 % par rapport à 2019 (environ 8000 emplois). Pour l'année 2021, le nombre d'emplois est estimé à 20000.

### Pour aller plus loin

On estime que la filière photovoltaïque représentait 12000 emplois en 2020 (en équivalents temps plein) [1, 2].

On peut voir sur la figure ci-dessous qu'un pic d'activité a eu lieu en 2010-2011, porté par les installations individuelles et les tarifs d'achats. Ceux-ci ont ensuite fortement diminué, suivi d'un net recul de l'emploi, avant une nouvelle croissance plus régulière depuis 2016.

Dans le détail, plus de la moitié de ces emplois concerne l'installation des systèmes photovoltaïques, suivie de l'exploitation et la vente de l'énergie, puis de la fabrication des équipements [1].



1. Marchés et emplois concourant à la transition énergétique dans le secteur des énergies renouvelables et de récupération, rapport de l'ADEME, septembre 2022. <https://bibliothèque.ademe.fr/energies-renouvelables-reseaux-et-stockage/5843-marches-et-emplois-concourant-a-la-transition-energetique-dans-le-secteur-des-energies-renouvelables-et-de-recuperation.html>.
2. Le Baromètre 2022 des énergies renouvelables électriques en France. [https://energies-renouvelables.org/wp-content/uploads/2023/01/ObservER\\_BARO\\_ENR\\_ELEC\\_2022-20230126-web.pdf](https://energies-renouvelables.org/wp-content/uploads/2023/01/ObservER_BARO_ENR_ELEC_2022-20230126-web.pdf).

## 20 - PEUT-ON INSTALLER DES PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES SUR, OU AUX ABORDS DES MONUMENTS HISTORIQUES ?



### En résumé

Oui en principe, mais il faut a minima consulter les Architectes des Bâtiments de France. L'autorisation dépend notamment du niveau de protection de la zone, et de l'impact visuel du projet.

### Pour aller plus loin

Les installations PV résidentielles sont soumises à une autorisation d'urbanisme délivrée par la mairie. Dans le cas de zones protégées aux abords d'un édifice classé ou inscrit au titre des monuments historiques, l'autorisation est soumise à l'avis des Architectes des Bâtiments de France (ABF). Pour connaître l'emplacement des zones protégées, il est possible de se renseigner en mairie, de consulter le PLU ou de consulter l'Atlas des patrimoines (en ligne) [1].

En cas de **covisibilité** du projet avec le monument historique (si ils sont visibles conjointement depuis l'espace public, ou si le projet est visible depuis le monument historique), l'avis rendu par l'ABF est dit 'conforme' et la mairie doit le suivre. Dans d'autres cas, l'avis n'est que 'simple' et la mairie choisit d'accorder l'autorisation ou non, même en cas d'avis défavorable de l'ABF. Jusqu'à présent, les avis de l'ABF ont été souvent défavorables [2] et sont généralement suivis par la mairie.

La nécessité de déployer du solaire photovoltaïque sur les surfaces bâties pousse les autorités à faciliter ces démarches. C'est en ce sens qu'une instruction interministérielle de janvier 2023 invite les ABF à donner leur aval pour des bâtiments récents (à partir des années 50) ou des bâtiments se situant dans des zones d'activités, logistiques ou industrielles [3].

L'arbitrage négatif des ABF peut être contesté par un recours gracieux ou contentieux. Récemment, le tribunal administratif de Melun a ainsi annulé une décision d'opposition d'une mairie fondé sur l'avis d'opposition de l'ABF, selon lequel : "Les panneaux photovoltaïques, de par leur aspect lisse et leur matériaux, ne s'accordent pas avec la couverture en tuile de cette maison traditionnelle". L'ABF concluait : "Le projet dénaturerait les abords du monument et n'est donc pas acceptable". Le tribunal a donné tort à l'ABF en estimant que "l'avis de l'architecte des bâtiments de France est entaché d'une erreur d'appréciation", et il a annulé l'avis d'opposition de la mairie [4,5].

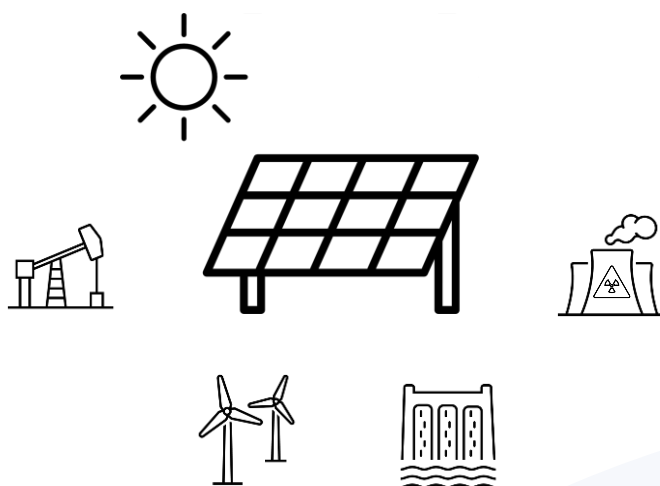
### Sources

1. Atlas des patrimoines: <http://atlas.patrimoines.culture.fr/atlas/trunk/>.
2. Sénat, question écrite n°02290 publiée le 04/08/2022, "Assouplissement des formalités d'installation de panneaux photovoltaïques en zone classée". <https://www.senat.fr/questions/base/2022/qSEQ220802290.html>.
3. Instruction relative à l'accélération de la production des énergies renouvelables: instruction des demandes d'autorisation et suivi des travaux d'implantation de panneaux solaires. <https://www.legifrance.gouv.fr/download/pdf/circ?id=45395>.
4. Journal du Photovoltaïque N°47, pp. 6-8, avril-mai-juin 2023.
5. Jugement N°2101420 du Tribunal Administratif de Melun du 20 décembre 2022. <https://solairepv.fr/wp-content/uploads/JugementTribunalMelun2101420.pdf>





# Quelle place pour le solaire photovoltaïque dans le futur mix énergétique français ?



## 21 - OÙ EN EST LE DÉVELOPPEMENT DU SOLAIRE PV PAR RAPPORT AUX OBJECTIFS DE LA PPE ?



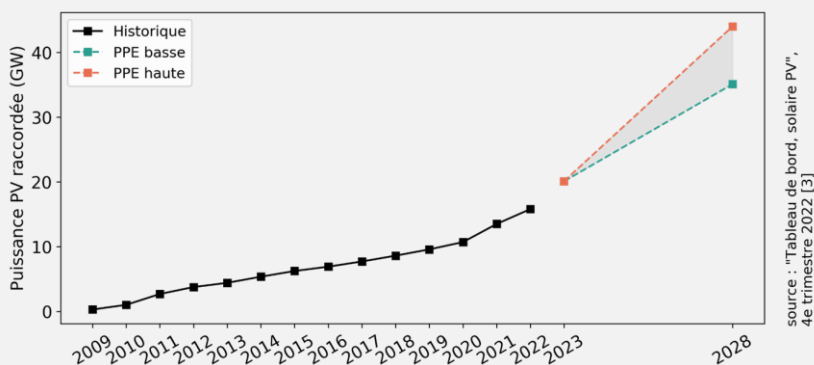
### En résumé

La programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) prévoit d'atteindre 20 GW en 2023 et entre 35 et 44 GW en 2028 [1]. En mars 2023, 17,2 GW étaient raccordés [2], soit 86 % de l'objectif 2023.

### Pour aller plus loin

La Programmation Pluriannuelle de l'Énergie (PPE) est un outil de pilotage dont s'est doté la France avec l'objectif de réduire nos émissions de CO2 en accord avec la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) [3,4]. Elle contient différents volets : sécurité d'approvisionnement, économies d'énergies, énergies renouvelables, stockage, mobilité, formation... Elle comprend des objectifs de développement pour le photovoltaïque en particulier, représentés sur le graphique ci-dessous avec la trajectoire actuelle.

Une synthèse de la PPE est disponible sur le site du ministère de l'écologie [5]. Une version révisée est en préparation et devrait être publiée courant 2023. Dans ce cadre, le Secrétariat général à la planification écologique a publié des documents de travail en juin et juillet 2023, dans lesquels la cible de puissance PV installée est portée à 48,1 GW en 2030, et 140 GW en 2050 (fourchette entre 128 GW et 160 GW) [6].



1. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-energies-renouvelables-2021/4-objectifs-dans-le-cadre-de>.
2. Ministère de la transition écologique. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/les-energies-renouvelables?rubrique=21>.
3. Programmes pluriannuels de l'énergie (PPE). <https://www.ecologie.gouv.fr/programmes-pluriannuels-energie-ppe>.
4. Stratégie Nationale Bas-Carbone. <https://www.ecologie.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc>.
5. <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/20200422%20Synthe%CC%80se%20de%20la%20PPE.pdf>.
6. <https://www.gouvernement.fr/france-nation-verte/publications>

La planification écologique dans l'énergie 12 juin 2023 - Document de travail [lien]  
Tableau de bord de la planification écologique. Version 1 - juillet 2023 [lien].

## 22 - QUELLE EST LA PRODUCTION DE SOLAIRE PV PRÉVUE PAR LES DIFFÉRENTS SCÉNARIOS ?



### En résumé

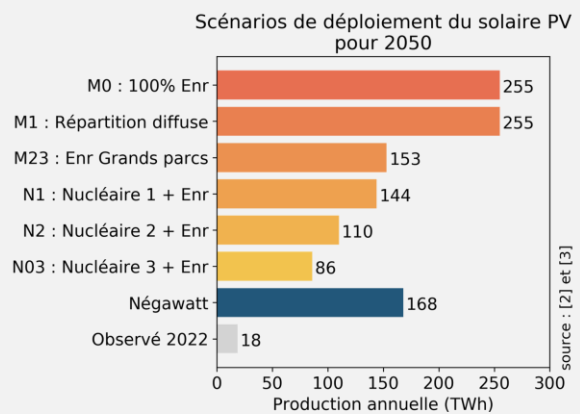
Dans les six scénarios de RTE pour le futur mix énergétique, l'énergie solaire PV produite en 2050 est comprise entre 90 et 250 TWh par an, soit 5 à 14 fois la production de 2022.

### Pour aller plus loin

RTE propose six scénarios pour atteindre la neutralité carbone en 2050 et respecter ainsi les accords de Paris [1,2]. Ils prévoient une demande annuelle d'énergie électrique de 555 à 752 TWh (soit +20 % à +65 % comparé à 2022) liée à une électrification importante des usages. La production électrique est envisagée soit de manière intégralement renouvelable, soit par des mix diversifiés impliquant la construction de nouvelles centrales nucléaires. Dans tous les cas, la production du solaire PV devrait être multipliée par 5 à 14.

Pour les scénarios s'appuyant sur le développement d'énergies 100% renouvelables, la part de production solaire se situe entre 150 et 250 TWh (M0, M1, M23, Négawatt [3]).

Les scénarios basés sur le développement d'un mix nucléaire + renouvelables supposent une production solaire PV de l'ordre de 90-150 TWh.



Les scénarios M0 et M1 proposent le photovoltaïque comme première source d'électricité avec 36 % de la production [2]. Ils se distinguent par le profil de production. Par exemple, le scénario M1 de RTE implique un fort développement des panneaux sur petites et grandes toitures et de l'autoproduction chez les particuliers, les commerces et les petites entreprises, avec 100 GW de PV diffus.

Un support visuel présentant les scénarios de RTE est disponible ici [4].

1. Etude RTE "Futurs Energétiques 2050" (<https://rte-futursenergetiques2050.com/>), principaux résultats : <https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-12/Futurs-Energetiques-2050-principaux-resultats.pdf>.
2. Etude RTE "Futurs Energétiques 2050", scénarios de mix production-consommation : [https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-10/BP2050\\_rapport-complet\\_chapitre5\\_scenarios-mix-production-consommation\\_1.pdf](https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-10/BP2050_rapport-complet_chapitre5_scenarios-mix-production-consommation_1.pdf).
3. Scénario négaWatt 2022 : <https://negawatt.org/Le-scenario-negaWatt-2022-en-detail>
4. Kakémonos librement disponibles ici : <https://solairepv.fr/kakemonos/> (kakémono IV sur les scénarios : [lien](#)).

## 23 - QUELLE EST LA SURFACE DE PANNEAUX PV NÉCESSAIRE SELON LES SCÉNARIOS EN 2050 ?



### En résumé

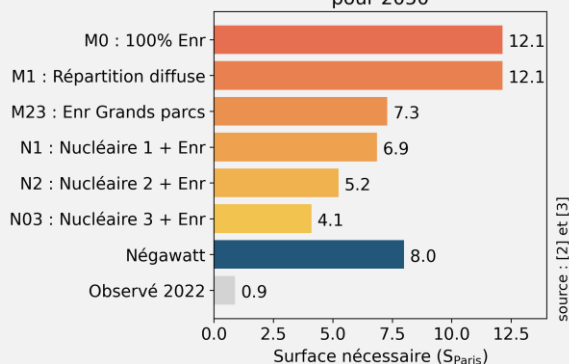
Les surfaces nécessaires pour le solaire PV sont très dépendantes du scénario considéré, et se situent entre 400 et 1200 km<sup>2</sup>, soit une surface très inférieure aux surfaces déjà artificialisées (environ 50 000 km<sup>2</sup>).

### Pour aller plus loin

Nous pouvons comparer les surfaces de panneaux PV nécessaires pour chaque scénario à la surface de Paris intra-muros (105 km<sup>2</sup>), dans les différents scénarios (figure de droite) [1,2]. Dans la figure ci-dessous, la surface de solaire PV nécessaire (carrés bleus à gauche) est comparée aux différents types de surfaces en France métropolitaine (rectangles colorés) [3]. Pour ces calculs, les productions annuelles estimées dans les scénarios sont divisées par une irradiation annuelle moyenne (1000 kWh/m<sup>2</sup>) et multipliées par une efficacité de 20 % [4].

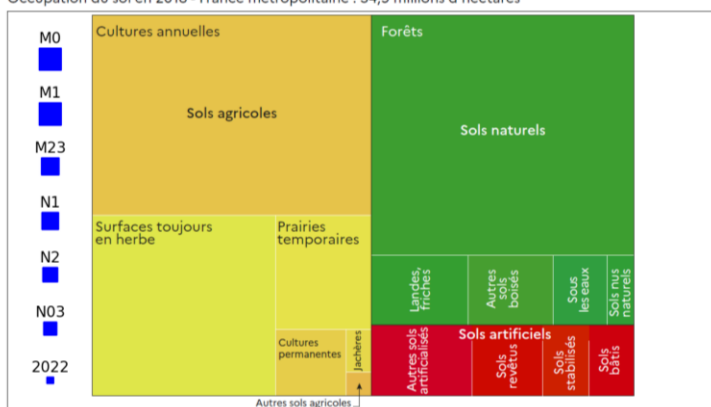
Même dans les scénarios incluant le plus de PV (M0 et M1), la surface nécessaire à la production PV est équivalente à 1200 km<sup>2</sup> (12 fois la surface de Paris), soit 0,2 % de la surface de la France métropolitaine, et moins de 3 % des surfaces déjà artificialisées (voir la [Fiche n°24](#)).

Scénarios de déploiement du solaire PV pour 2050



Graphique 1

Les sols agricoles recouvrent plus de la moitié du territoire métropolitain  
Occupation du sol en 2018 - France métropolitaine : 54,9 millions d'hectares



Note de lecture : les sols agricoles représentent 52 % du territoire métropolitain, les sols naturels 39 % et les sols artificialisés 9 %.  
Source : Agreste - Enquêtes Teruti 2017-2018-2019

1. Etude RTE "Futurs Energétiques 2050", scénarios de mix production-consommation : [https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-10/BP2050\\_rapport-complet\\_chapitre5\\_scenarios-mix-production-consommation\\_1.pdf](https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-10/BP2050_rapport-complet_chapitre5_scenarios-mix-production-consommation_1.pdf).
2. Scénario négaWatt 2022 : <https://negawatt.org/Le-scenario-negaWatt-2022-en-detail>.
3. Rapport de l'Agreste, "L'occupation du sol entre 1982 et 2018" : [https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/Dos2103/Dossiers%202021-3\\_TERUTI.pdf](https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/Dos2103/Dossiers%202021-3_TERUTI.pdf).
4. La production annuelle utilisée ici de 200 kWh/m<sup>2</sup>, ou 200 GWh/km<sup>2</sup>, suppose une couverture optimale, possible sur de petites installations (toitures). La production de centrales solaires au sol est de l'ordre de 100 GWh/km<sup>2</sup>.

## 24 - LES SURFACES DÉJÀ ARTIFICIALISÉES SUFFISENT-ELLES POUR ATTEINDRE LES OBJECTIFS ÉNERGÉTIQUES À L'HORIZON 2050 ?



### En résumé

Oui, un potentiel de production solaire PV de 200 TWh/an est déjà identifié en utilisant les technologies commerciales disponibles aujourd'hui et des surfaces déjà artificialisées (toitures, friches, parkings). Les scénarios les plus ambitieux pour 2050 (150 à 250 TWh/an) semblent donc réalisables.

### Pour aller plus loin

#### Des besoins en solaire PV de 150 TWh à 250 TWh :

Les scénarios de mix électrique en 2050 qui incluent la plus forte part de solaire PV estiment les besoins entre 150 TWh (Negawatt 2022, scénarios N1 et M23 RTE 2021) et 250 TWh (scénarios M0 et M1 RTE 2021). Plus de détails sur la [Fiche n°22](#).

#### Un potentiel actuel de l'ordre de 200 TWh :

- Un potentiel de toiture d'au moins 125 TWh ([Fiche n°25](#)).
- Un potentiel en friches industrielles ou ombrières de parking de 69 TWh ([Fiche n°26](#)).
- De nouveaux modes d'implantation à l'étude, dont le potentiel n'a pas encore été estimé : en façade des bâtiments, en agrivoltaïsme, en installation flottante... ([Fiches n°27](#), [28](#) et [29](#)).

Les estimations actuelles sont assez conservatrices sur les surfaces disponibles et les rendements des modules PV utilisés, généralement de 20 % ou moins. Des rendements de modules PV de plus de 24 % ont déjà été démontrés avec des technologies industrielles qui devraient être commercialisées d'ici quelques années. Cette augmentation des rendements amène le potentiel de production à au moins 240 TWh (toitures, friches et ombrières uniquement). **Le développement du solaire PV ne nécessite donc pas l'artificialisation de nouvelles surfaces.**

**Un point sur les surfaces artificialisées en France** : d'après un rapport de l'ADEME [1], la surface artificialisée en France métropolitaine a augmenté environ 3 fois plus vite que la population au cours des deux dernières décennies. Elle représentait environ 9 % du territoire en 2018, avec la répartition suivante : 17 % des surfaces artificialisées correspondent à des sols bâtis (maisons, immeubles...), 44 % à des sols revêtus ou stabilisés (routes, parkings...) et 38 % à d'autres espaces (jardins, chantiers...) [2].

1. Note de synthèse intitulée "Alléger l'empreinte environnementale de la consommation des Français en 2030. Vers une évolution profonde des modes de production et de consommation". <https://bibliothèque.ademe.fr/dechets-economie-circulaire/2658-alleger-l-empreinte-environnementale-de-la-consommation-des-francais-en-2030.html> (voir le [rapport de synthèse](#), page 27).
2. Rapport de l'Agreste, "L'occupation du sol entre 1982 et 2018" : [https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/Dos2103/Dossiers%202021-3\\_TERUTI.pdf](https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/Dos2103/Dossiers%202021-3_TERUTI.pdf).



## 25 - QUEL EST LE POTENTIEL POUR LE PV SOLAIRE EN FRANCE ? LES TOITURES.



### En résumé

La France a un potentiel de production PV en toiture de 90 TWh/an à un coût inférieur à 0,12 €/kWh et jusqu'à 125 TWh/an à un coût inférieur à 0,15 €/kWh (coûts 2019). C'est le plus fort potentiel en toiture en Europe [1].

### Pour aller plus loin

Ces chiffres sont discutables et potentiellement sous-estimés. Ils sont obtenus avec une surface de toiture estimée par imagerie satellite à 1346 km<sup>2</sup> [1], alors que l'ADEME évalue la surface totale de toitures à 2276 km<sup>2</sup> en utilisant une base de données de l'IGN [2]. Les coûts sont établis en 2019, les coûts actualisés restent à évaluer.

**Un calcul facile :** On retrouve une estimation de production PV de 125 TWh/an en utilisant une surface de 625 km<sup>2</sup>, qui correspond à peu près à la moitié des 1346 km<sup>2</sup> de toiture disponible en France estimée par l'étude [1], avec une irradiation moyenne de 1 MWh/m<sup>2</sup>/an, et un rendement de conversion de 20 %. A noter que la référence [1] réalise une analyse technico-économique plus complexe.

### Remarques :

- Ces chiffres ci-dessus ne comprennent pas le PV en façade, les ombrières de parking, l'agrivoltaïque, les centrales au sol dans des zones inexploitablees comme les anciennes carrières ou les installations militaires, le PV flottant,...
- L'étude [1] est basée sur l'analyse d'images satellites à l'échelle européenne.
- Une étude antérieure de l'ADEME publiée en 2016 [2] évalue les gisements PV en surface, capacité installable et énergie produite à (1507 km<sup>2</sup>, 241 GW, 265 TWh/an) pour les toitures résidentielles et (769 km<sup>2</sup>, 123 GW, 134 TWh/an) pour les toitures industrielles. Cette étude utilise une base de données IGN pour les surfaces de toit, et applique des ratios par région pour déterminer la part exploitable pour une installation PV, et pour estimer la production annuelle.
- Des sources plus récentes évaluent la surface de toitures "exploitables" pour le PV à 1181 km<sup>2</sup> [3] et 4693 km<sup>2</sup> [4].

1. Bódis, K. et al., A high-resolution geospatial assessment of the rooftop solar photovoltaic potential in the European Union, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109309>
2. <https://bibliothèque.ademe.fr/recherche-et-innovation/2881-mix-electrique-100-renouvelable-analyses-et-optimisations.html>, voir le document "annexe\_eolienvp.pdf", page 36/51.
3. Joshi, S. et al., High resolution global spatiotemporal assessment of rooftop solar photovoltaics potential for renewable electricity generation, Nature Communications 12, 5738 (2021). Voir la Table 7 du Supplementary <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25720-2>.
4. <https://france-potentiel-solaire.cadastre-solaire.fr/>.

## 26 - QUEL EST LE POTENTIEL POUR LE PV SOLAIRE EN FRANCE ? LES FRICHES ET PARKINGS.



### En résumé

Le potentiel de production annuel du solaire photovoltaïque installé sur des friches et des parkings (ombrières) est évalué à environ 70 TWh par an.

### Pour aller plus loin

Dans une étude publiée en avril 2019 [1], l'ADEME a évalué le gisement national des zones délaissées (friches) et des parkings propices au déploiement du photovoltaïque.

**Au total, l'ADEME estime le potentiel français à 53 GW, réparti à 93 % sur les zones délaissées (49 GW) et à 7 % sur les parkings (4 GW).**

Avec une production annuelle en France de l'ordre de 1300 kWh/kW (facteur de charge de 15%), **le potentiel est donc d'environ 69 TWh/an pour les friches et parkings.**

#### Remarques :

- Cette étude porte sur l'évaluation du gisement potentiel national français des zones délaissées (friches industrielles, tertiaires, commerciales, autres sites pollués et délaissés – friches agricoles exclues) et parkings pour l'implantation de centrales photovoltaïques (> 250 kW), en France métropolitaine et Corse.
- Ces chiffres sont encore sujets à débat. Récemment, une capacité potentielle de 31,7 GW a été estimée **pour les parkings** (à comparer aux 4 GW de l'ADEME), représentant une production annuelle de 31,2 TWh [2].

1. Etude de l'ADEME « Evaluation du gisement relatif aux zones délaissées et artificialisées propices à l'implantation de centrales photovoltaïques » (2019) : communiqué (<https://presse.ademe.fr/2019/05/etude-limportant-potentiel-des-friches-et-des-parkings-pour-developper-lenergie-photovoltaïque.html>), rapport (<https://librairie.ademe.fr/energies-renouvelables-reseaux-et-stockage/846-evaluation-du-gisement-relatif-aux-zones-delaissées-et-artificialisées-propices-a-l-implantation-de-centrales-photovoltaïques.html>).
2. <https://france-potentiel-solaire.cadastre-solaire.fr/>.

## 27 - VERS DE NOUVEAUX MODES DE DÉPLOIEMENT DU PHOTOVOLTAÏQUE ? LES PANNEAUX VERTICAUX.



### En résumé

Il est possible d'installer des panneaux photovoltaïques verticalement, par exemple sur les façades des bâtiments ou comme mur anti-bruit.

### Pour aller plus loin

Les deux principaux exemples de **panneaux PV** placés verticalement sont les installations sur les **façades des bâtiments**, et le remplacement de **murs anti-bruit ou de clôtures** qui bordent par exemple les autoroutes ou les voies ferrées [1].

#### Avantages :

- La production de panneaux installés verticalement est plus forte lorsque le soleil est bas sur l'horizon (début et fin de journée, hiver), donc a priori mieux adaptée aux besoins [2].
- Les panneaux verticaux bénéficient plus de la réflexion de la lumière sur le sol (albédo).
- Il y a moins de conflits d'usage du foncier qu'avec des panneaux "horizontaux".

#### Inconvénients :

- Pour une surface de panneaux donnée, la production moyenne sera inférieure à une installation au sol ou en toiture dont l'inclinaison et l'orientation seraient optimisées (autour de 30° en orientation sud).
- Les panneaux utilisés pour ces usages sont généralement spécifiques et donc un peu plus onéreux. On privilégiera des panneaux bifaciaux [3,4], avec une étanchéité renforcée pour former des murs ou des clôtures, ou des panneaux à l'esthétique soignée, par exemple d'aspect uni noir ou coloré, pour un usage en façade de bâtiments.

**A noter :** Le calcul de la production PV sur les façades des bâtiments en ville est complexe à cause de l'impact de l'environnement comme les ombrages, les réflexions sur les bâtiments voisins ou encore les îlots de chaleur (voir la [Fiche n°42](#)). Il fait actuellement l'objet de recherches académiques. Il n'est donc pas encore possible d'estimer précisément le gisement solaire en façade.

1. [https://tecsol.blogs.com/mon\\_weblog/2021/12/cnr-innove-en-lan%C3%A7ant-son-1er-d%C3%A9monstrateur-de-parc-photovolta%C3%AFque-lin%C3%A9aire-bifacial-vertical.html](https://tecsol.blogs.com/mon_weblog/2021/12/cnr-innove-en-lan%C3%A7ant-son-1er-d%C3%A9monstrateur-de-parc-photovolta%C3%AFque-lin%C3%A9aire-bifacial-vertical.html).
2. <https://www.pv-magazine.com/2022/07/11/the-stabilizing-effect-of-vertical-east-west-oriented-pv-systems/>
3. Kopecek, R., & Libal, J. (2018). Towards large-scale deployment of bifacial photovoltaics. Nature Energy, 3(6), 443-446. <https://doi.org/10.1038/s41560-018-0178-0>.
4. Kopecek, R., & Libal, J. (2021). Bifacial photovoltaics 2021: Status, opportunities and challenges. Energies, 14(8), 2076. <https://doi.org/10.3390/en14082076>.

## 28 - VERS DE NOUVEAUX MODES DE DÉPLOIEMENT DU PHOTOVOLTAÏQUE ? L'AGRIVOLTAÏSME



### En résumé

L'agrivoltaïsme désigne des installations photovoltaïques situées sur des parcelles agricoles, combinant ainsi production électrique et agricole. L'intérêt de ce type d'installation est de disposer de grandes surfaces, tandis que le risque est de mettre en compétition deux ressources vitales. Un cadre doit être mis en place pour que son développement ne mette pas en péril les installations agricoles.

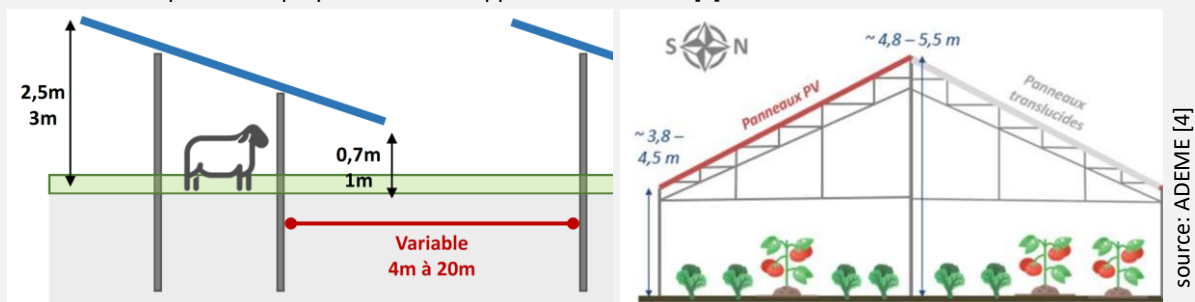
### Pour aller plus loin

Les installations agrivoltaïques peuvent prendre différentes formes, par exemple des panneaux solaires installés sur des serres, des pâturages ou encore des champs. En 2022, l'ADEME dénombre en France 167 projets d'agrivoltaïsme pour une capacité de 1,3 GW [1]. Leur intérêt est de permettre l'accès à de grandes surfaces. En 2019, 52 % de la superficie de la France métropolitaine est utilisée à des fins agricoles, soit 26,8 millions d'hectares [2]. Moins de 0,2 % de cette surface serait nécessaire pour atteindre les objectifs de puissance installée de la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie (PPE) de 2028, soit 44 GW dans sa fourchette haute (voir [Fiche n°21](#)), à raison d'1 MW installé par hectare.

La limite de cette stratégie est qu'elle peut faire entrer en compétition les productions agricoles et énergétiques. Une telle confrontation serait exacerbée par la différence des loyers proposés par unité de surface, estimés au moins 10 fois plus élevés pour une installation photovoltaïque. Cette différence risque d'entraîner une augmentation du coût de location des terres, mettant en péril l'équilibre économique de certaines activités agricoles.

Un premier enjeu de gouvernance est d'encadrer le développement de l'agrivoltaïsme pour prévenir de tels impacts négatifs. Un second enjeu, technique, est de trouver des conditions permettant une synergie entre les deux productions, par exemple avec des panneaux solaires inclinables, laissant passer la lumière quand les plantes en ont besoin, et se refermant lorsqu'une protection physique peut être bénéfique (rayonnement trop important, grêle...).

La loi relative à l'accélération de la production d'énergies renouvelables de mars 2023 [3] cherche à aller dans ce sens, en considérant qu'une installation ne peut être qualifiée d'agrivoltaïque que si elle permet un maintien significatif de la production et des revenus agricoles. Elle doit également apporter au moins l'un des services suivants : l'amélioration du potentiel et de l'impact agronomiques, l'adaptation au changement climatique, la protection contre les aléas ou l'amélioration du bien-être animal. Elle doit de plus être réversible. Cet encadrement reprend des propositions des rapports de l'ADEME [4].



1. Rapport au nom de la commission des affaires économiques sur la proposition de loi en faveur du développement de l'agrivoltaïsme, par M. Franck MENONVILLE, sénateur, 2022. <https://www.senat.fr/rap/l22-013/l22-013.html>
2. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/5039859?sommaire=5040030>.
3. Loi n°2023-175 du 10 mars 2023 relative à l'accélération de la production d'énergies renouvelables : <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000047294244/>.
4. ADEME, I Care & Consult, Ceresco, Cétiac. 2021. [Caractériser les projets photovoltaïques sur terrains agricoles et l'agrivoltaïsme](#).

## 29 - VERS DE NOUVEAUX MODES DE DÉPLOIEMENT DU PHOTOVOLTAÏQUE ? LE PHOTOVOLTAÏQUE FLOTTANT



### En résumé

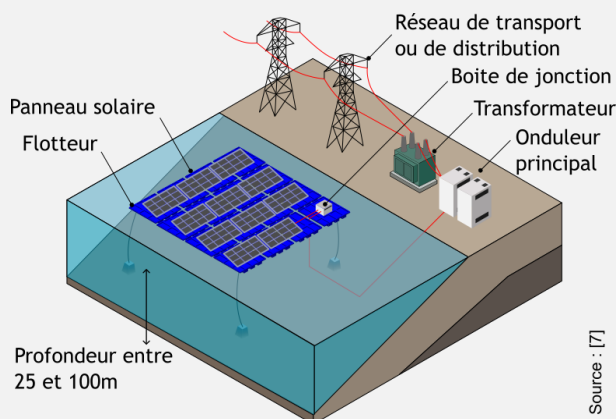
Le photovoltaïque flottant désigne des installations PV situées sur des étendues d'eau (le plus souvent douce). Même si les impacts environnementaux ne sont pas encore bien connus, certains avantages potentiels tels que la grande disponibilité de ces zones et des bénéfices secondaires tels que la réduction de l'évaporation de l'eau, rendent ces installations attractives et expliquent leur fort développement actuel dans le monde.

### Pour aller plus loin

Le photovoltaïque flottant désigne l'ensemble des pratiques visant à installer des panneaux PV sur des étendues d'eau. Le principal intérêt du PV flottant est la forte disponibilité de ces surfaces. Par exemple, l'étude [1] estime que couvrir 10 % des surfaces des lacs de barrage avec des panneaux PV suffirait à produire autant d'électricité que l'ensemble des usines à énergie fossile. Actuellement, les installations en PV flottant représentent environ 2,6 GW [2]. En France la première centrale de 20 MW vient de voir le jour dans les Alpes, inaugurée par EDF [3]. Le PV flottant est en développement et on dispose de peu de recul sur cette technologie.

#### Avantages potentiels :

- Le refroidissement des panneaux qui permet une meilleure efficacité [4].
- Une facilité d'installation et désinstallation puisqu'il n'y a besoin que de très peu d'infrastructures permanentes (comparé à d'autres fermes solaires)
- La synergie avec les installations hydroélectriques : réduction de la formation d'algues dans la retenue [5], limitation de l'évaporation de l'eau et connexion au réseau facilitée [6].



**Inconvénients potentiels :** L'impact environnemental de ces installations, surtout à grande échelle, est encore mal connu en particulier sur l'écosystème aquatique. De trop grandes étendues pourraient affecter le taux de dissolution d'oxygène dans l'eau ainsi que la photosynthèse des plantes aquatiques [5]. Les panneaux eux-mêmes seraient exposés à des conditions d'humidité accrues et pour certains projets de déploiement en mer feraient face à des défis tels que la corrosion [6]. Les systèmes d'ancrage, de câbles d'amarrage et de pontons sont également à l'étude pour la durabilité des installations [5].

1. Almeida et al., "Floating solar power could help fight climate change — let's get it right", Nature 606, 246, 2022.
2. Ramasamy et al. 2021. [Floating Photovoltaic System Cost Benchmark](#). NREL.
3. [Annonce de la centrale solaire flottante de Lazer](#).
4. Kakoulaki et al., "Benefits of pairing floating solar photovoltaics with hydropower reservoirs in Europe", Renewable and Sustainable Energy Reviews, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112989>
5. Ganzaku et al., Sustainability 13, 4317, 2021. <https://doi.org/10.3390/su13084317>
6. Pouran et al., iScience 25, 105253, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.105253>
7. L'énergie solaire photovoltaïque, Daniel Suchet et Erik Jonhson, EDP Sciences, 154 pages, 2023.

# Démêlons le vrai du faux

*Réponses à quelques critiques courantes  
entendues dans le débat public*





1. « Il faut dépenser plus de CO<sub>2</sub> pour faire le panneau [photovoltaïque] que pour faire la centrale nucléaire. » Entendu dans [1]



### En résumé

Il faut faire une analyse des émissions sur le cycle de vie des moyens de production électrique, et pas uniquement au moment de la construction. Si le PV génère des émissions supérieures au nucléaire, ces dernières restent du même ordre de grandeur (10-40 gCO<sub>2</sub>eq/kWh), largement inférieures à celles des centrales à gaz, charbon ou fioul (500-1000 gCO<sub>2</sub>eq/kWh). L'empreinte carbone de la production d'électricité solaire PV continue de diminuer et n'est pas un enjeu majeur.

### Pour aller plus loin

RTE prévoit une baisse des émissions des installations PV liée à (i) une augmentation de la durée de vie des installations, (ii) l'amélioration de l'efficacité des modules et (iii) la réduction de la quantité d'énergie nécessaire à leur fabrication. Ces progrès pourraient conduire la filière à réduire les émissions des panneaux à ~15 gCO<sub>2</sub>eq/kWh à terme (2050) et davantage en prenant en compte la décarbonation de l'énergie nécessaire à leur fabrication [2]. En effet, aujourd'hui 73 % des panneaux PV viennent de Chine [3], mais un nombre croissant de projets d'usines en Europe pourrait contribuer à la diminution de l'empreinte carbone des panneaux. À titre de comparaison, les émissions moyennes du système électrique européen étaient de 279 gCO<sub>2</sub>eq/kWh en 2021, contre 544 en Chine [6].

D'autres estimations sont même inférieures à 10 gCO<sub>2</sub>eq/kWh pour le PV solaire installé en 2050, et elles sont compatibles avec les scénarios permettant de limiter le réchauffement climatique à 2°C d'ici 2050 [7].

Technologie	Emissions (gCO <sub>2</sub> eq/kWh)	Source
<b>Photovoltaïque (Si cristallin)</b>		
Mix électrique chinois	43,9	[4]
Mix électrique européen	32,3	
Mix électrique français	25,2	
<b>Eolien</b> (moy. terrestre et en mer)	15	[2]
<b>Hydroélectrique</b>	6	[2]
<b>Centrale Nucléaire</b>		
France	7	[2]
Monde	12	[5]
Centrale à gaz	500	[2]
Centrale à charbon	1100	
Centrale à fioul	930	

1. J.-M. Jancovici, 14 mai 2020, France culture, [L'Invité\(e\) des Matins \(2ème partie\)](#).
2. RTE 2022, [Futurs énergétiques 2050](#), chapitre 12 L'analyse environnementale.
3. Woodhouse et al., "Crystalline Silicon Photovoltaic Module Manufacturing Costs and Sustainable Pricing", NREL report. <http://www.osti.gov/servlets/purl/1495719/>.
4. Rapport final du projet INCER-ACV soutenu par l'ADEME ([page web](#), [rapport pdf](#)). Rapport Photoscope, France Nature Environnement, 2022 ([lien](#)).
5. Rapport du GIEC AR5, annexe III [ipcc\\_wg3\\_ar5\\_annex-iii.pdf](#)
6. Our world in Data <https://ourworldindata.org/grapher/carbon-intensity-electricity?tab=table>.
7. M. Pehl et al., [Understanding future emissions from low-carbon power systems by integration of life-cycle assessment and integrated energy modelling](#), Nature Energy 2, 939-945 (2017).

1. « Il faut 1000 fois plus de surface, 1000 fois plus de surface pour faire la même quantité d'électricité dans l'année en solaire qu'en nucléaire, 1000 fois plus de surface au sol, artificialisée donc, il faut entre 10 et 100 fois plus de métal par kWh produit quand vous utilisez de l'éolien ou du solaire qui exploitent des énergies très diffuses que quand vous utilisez du nucléaire qui est une énergie très concentrée. » Entendu dans [1]
2. « Énergie diffuse [solaire PV]. Il y a besoin de tellement d'espace que ça commence à empiéter sur les forêts, les cultures et les espaces protégés. » Lu dans [2]



### En résumé

**Oui, l'énergie solaire est diffuse, et ça n'est pas forcément un inconvénient.** L'énergie solaire est abondante, sans le danger que constitue toute source d'énergie concentrée. Elle est disponible partout et adaptée à l'autoconsommation. **Non, le développement du solaire photovoltaïque ne nécessite pas d'empiéter sur les espaces naturels ou agricoles,** il ne se fera pas forcément au détriment des forêts, des cultures ou des espaces protégés (voir [Fiche n°24](#), [n°25](#) et [n°26](#)). **Il n'est pas nécessaire d'augmenter l'artificialisation des sols pour atteindre les objectifs de neutralité carbone en 2050 !**

### Pour aller plus loin

- **Non, le développement du solaire photovoltaïque tel que prévu par les différents scénarios de transition énergétique ne doit pas nécessairement augmenter de manière significative l'artificialisation des sols.** Les surfaces déjà artificialisées (toitures, façades, friches industrielles, parkings...) et les usages mixtes (agrovoltaïsme, photovoltaïque flottant...) pourraient fournir une ressource suffisante. Voir [Fiche n°24](#), [n°25](#) et [n°26](#).
- **Non, il ne faut pas 1000 fois plus de surface pour le photovoltaïque que pour le nucléaire, mais 100 fois plus** (calcul ci-dessous), et de toute façon **ça n'est pas un problème puisque ces surfaces sont disponibles sans conflit d'usage !**

**Comparons l'énergie produite par unité de surface par des installations solaire et nucléaire :**

- L'énergie solaire reçue en France est d'environ 1 MWh par mètre carré et par an. Avec un rendement de conversion de 15 %, facilement obtenu par les systèmes PV actuels, on obtient donc 0,15 MWh/m<sup>2</sup>/an d'électricité d'origine solaire (3 MWh par an avec une surface de toit de 20 m<sup>2</sup>), ou 0,15 TWh/km<sup>2</sup>/an.
- La production nucléaire française est d'environ 400 TWh par an pour une capacité de 63 GW, ce qui donne une production d'environ 6 TWh par GW de capacité installée, et un facteur de charge de l'ordre de 75 %. La centrale du Bugey dispose de 4 réacteurs de 900 MW soit 3,6 GW, qui produisent environ 21,6 TWh sur une surface de 1,3 km<sup>2</sup>, soit 16,6 TWh/km<sup>2</sup>/an. La centrale de Saint-Alban (2 réacteurs de 1,3 GW) a produit 17,7 TWh en 2014 sur une surface de 0,73 km<sup>2</sup>, soit 24 TWh/km<sup>2</sup>/an.

1. Jean-Marc Jancovici, interviewé par Guillaume Erner sur France Culture le 14 mai 2020, <https://www.franceculture.fr/emissions/linvitee-des-matins-2eme-partie/la-pandemie-va-t-elle-accelerer-la-transition-energetique>.
2. BLAIN Christophe et JANCOVICI Jean-Marc, Le Monde Sans Fin, Dargaud, 2021.

1. « D'autre part, la stabilité de la fréquence (50 Hertz en Europe) du système électrique est aujourd'hui assurée par les rotors des alternateurs des centrales thermiques (nucléaires et fossiles). Sans eux, comment assurer cette stabilité puisque les convertisseurs de puissance, associés aux parcs éoliens et aux panneaux photovoltaïques et utilisés pour leur connexion au réseau, sont inopérants ? » Lu dans [1]
2. « Il est inéluctable que nous allons droit à des difficultés considérables et même à une impasse, nous empêchant techniquement de remplir les objectifs que nous prétendons solennellement avoir fixés ! (...) L'essor de technologies permettant la stabilité de la fréquence du réseau: cette stabilité est assurée aujourd'hui par la régularité de la rotation des machines tournantes dans les centrales électronucléaires, thermiques ou hydrauliques mais n'est pas garantie en cas de déploiement massif d'éoliennes et de panneaux solaires. » Lu dans [2]
3. « Si Enedis et RTE ne gèrent que des réseaux à courant alternatif, les producteurs d'énergies renouvelables leur fournissent bel et bien un tel courant, qui ne diffère en rien de ceux d'autres producteurs. » Lu dans [3]



### En résumé

S'il est exact que la production photovoltaïque ne contribue pas spontanément à la stabilité du réseau comme peuvent le faire d'autres générateurs (turbines), **“il existe un consensus scientifique sur l'existence de solutions technologiques permettant de maintenir la stabilité du système électrique”** (RTE [4]). Ces solutions technologiques ne sont pas aujourd'hui nécessaires, mais pourraient être déployées pour assurer la stabilité du réseau sans impact économique majeur [5].

### Pour aller plus loin

#### Extrait adapté de [5].

Le développement des productions renouvelables connectées par de l'électronique de puissance conduit à une baisse de l'inertie du système électrique européen, rendant les déviations de fréquence plus rapides quand surviennent des aléas temps réel sur l'équilibre entre la production et la consommation. Au-delà de certains seuils (suivant le réseau, 60 % à 80 % de production instantanée de l'éolien et du solaire sur la production totale), la stabilité du système peut être menacée en raison du manque de réglages stabilisateurs.

Deux solutions permettent d'avoir une part très élevée de production éolienne et photovoltaïque raccordée via de l'électronique de puissance, quelle que soit celle des machines synchrones [thermiques] qui resteront en fonctionnement : les compensateurs synchrones (technologie mature) ou les onduleurs grid-forming (technologie émergente). Le développement de solutions grid-forming par des onduleurs ou des compensateurs synchrones induit des coûts annualisés supplémentaires de même ordre de grandeur, variant suivant les scénarios entre 200 et 900 millions d'euros en 2060. Ce montant est faible comparé au coût total du système dans les différents scénarios.

1. Sébastien Candé et Marc Fontecave, [tribune](#) parue dans Le Monde le 4 mars 2021.
2. Note N°4 du Haut-Commissariat au Plan datée du 23 mars 2021, intitulée : Électricité : le devoir de lucidité. <https://www.gouvernement.fr/electricite-le-devoir-de-lucidite>.
3. [Lettre ouverte du SER](#), 31 mars 2021.
4. Rapport RTE-AIE « Conditions et prérequis en matière de faisabilité technique pour un système électrique avec une forte proportion d'énergies renouvelables à l'horizon 2050 » publié en janvier 2021.
5. RTE, [Futurs Énergétiques 2050](#), chapitre 7 (Garantir la sécurité d'approvisionnement), 2021.

1. « Le dernier problème [des énergies renouvelables] découle de la nécessité de développer de nouvelles infrastructures de réseaux électriques, puisque le transport et la distribution de l'électricité d'origine éolienne et solaire ne peuvent malheureusement pas s'appuyer sur le réseau actuel sans modifications, adaptations, extensions et renforcement. Le coût économique de cette transformation, qui prendra du temps, est très élevé. » Lu dans [1]



### En résumé

Pour la prochaine décennie, les infrastructures actuelles constituent une bonne ossature pour le développement des énergies renouvelables. Des adaptations du réseau de transport électrique seront nécessaires, notamment à partir de 2030-2035, mais leur ampleur restera modérée.

### Pour aller plus loin

Le rapport RTE-AIE publié en janvier 2021 apporte des détails sur l'impact des futurs mix électriques prévus dans les différents scénarios [2] :

« Pour la prochaine décennie, ces évolutions sont déjà intégrées aux programmes publics. (...) Pour permettre l'intégration des EnR, ces programmes prévoient non seulement des adaptations du réseau de transport d'électricité, mais aussi une optimisation de son utilisation en généralisant l'utilisation en temps réel des flexibilités, et en particulier de l'écrêtement des EnR (principalement des parcs éoliens). »

« A cet horizon de moyen terme [2035], le besoin de nouvelles infrastructures de réseau en France demeurera modéré : l'ampleur des adaptations à engager est inférieure à celle des années 1980 pour le parc électronucléaire. »

### Pour résumer :

1. Pour la décennie en cours, le réseau public de transport français constitue une bonne ossature sur laquelle s'appuyer. Il ne risque pas de devenir un facteur limitant pour l'intégration d'une part plus importante d'EnR si des adaptations ciblées sont mises en œuvre. Ces adaptations nécessaires restent limitées par rapport au rythme de développement du réseau au 20<sup>e</sup> siècle.

2. Au-delà de 2030, une extension, un renforcement et une restructuration en profondeur du réseau seront nécessaires pour atteindre des parts élevées d'EnR. Compte tenu du temps nécessaire pour consulter les parties prenantes et obtenir les autorisations, ces développements doivent être planifiés rapidement et décidés dans les années à venir.

1. Sébastien Candé et Marc Fontecave, tribune parue dans Le Monde le 4 mars 2021, [https://www.lemonde.fr/idees/article/2021/03/04/sebastien-candel-et-marc-fontecave-il-est-temps-de-reconsiderer-favorablement-la-place-de-l-energie-nucleaire-en-france\\_6071876\\_3232.html](https://www.lemonde.fr/idees/article/2021/03/04/sebastien-candel-et-marc-fontecave-il-est-temps-de-reconsiderer-favorablement-la-place-de-l-energie-nucleaire-en-france_6071876_3232.html).
2. Rapport RTE-AIE « Conditions et prérequis en matière de faisabilité technique pour un système électrique avec une forte proportion d'énergies renouvelables à l'horizon 2050 » publié en janvier 2021, <https://www.rte-france.com/actualites/rte-aie-publie-etude-forte-part-energies-renouvelables-horizon-2050>.

1. [Au sujet du recyclage des panneaux photovoltaïques] « *Si le verre et l'aluminium sont recyclables, ce n'est pour l'instant pas le cas des métaux et des matériaux polymères. (...) Problème : certains de ces métaux - dont le silicium métal - font partie des matériaux critiques, et le risque pour l'industrie d'être confrontée à des difficultés d'approvisionnement est réel.* » Lu dans [1]



### En résumé

Attention aux mauvaises interprétations : le silicium n'est pas un matériau *rare*. En revanche, le silicium métallurgique peut être considéré comme *critique* car il est produit par peu d'acteurs à l'échelle mondiale (voir [Fiche n°18](#)).

### Pour aller plus loin

Le silicium est un matériau extrêmement abondant dans la nature, mais dont les méthodes de raffinage actuelles nécessitent d'exploiter des gisements très purs (principalement de quartz). Il n'existe pas à ce jour d'estimation fiable des stocks actuellement exploitables, mais aucune limitation n'a été identifiée d'après le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM). Notons également que les capacités de raffinage du silicium ne sont pas limitées aujourd'hui, puisqu'elles sont environ 2 fois plus importantes que la production mondiale annuelle. Si le silicium métallurgique est décrit comme critique, c'est parce que la Chine détient près de 70 % de la production mondiale, ce qui peut être perçu comme une menace pour certains marchés [2].

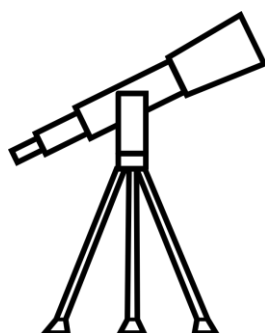
En outre, l'immense majorité des panneaux PV (la technologie silicium) n'utilise pas de "terres rares", ni même de matériaux *rare*s, comme vu dans la [Fiche n°17](#). Le problème de l'industrie du PV est donc bien l'utilisation de matériaux *critiques*, dont l'utilisation industrielle est sous tension, comme l'argent ou le silicium métallurgique, mais qui restent disponibles en larges quantités. De nombreuses pistes sont poursuivies par l'industrie du PV pour réduire sa dépendance aux matériaux critiques, comme le remplacement de l'argent par d'autres métaux. A ce jour, le recyclage ne permet pas de produire des volumes significatifs de matière première économiquement viables (voir [Fiche n°15](#)).

La confusion entre matériaux rares et critiques reste néanmoins courante, par exemple dans "*La guerre des métaux rares*", livre à succès de Guillaume Pitron paru en janvier 2018, qui écrit "*Or les métaux rares permettent précisément de produire une électricité propre : ils (...) transforment les rayons du soleil en courant par le biais des panneaux photovoltaïques.*" [3]. Une note de bas de page viendra néanmoins rectifier le propos dans l'édition de poche parue en octobre 2019 en précisant "*C'est plus particulièrement le cas pour les panneaux solaires fabriqués à partir de CIGS (cuivre, indium, gallium et sélénium).*" [4]

**On retiendra que le développement du solaire photovoltaïque n'est pas contraint à court terme par l'approvisionnement de matériaux rares, bien que des aménagements technologiques soient nécessaires pour continuer d'augmenter la production à moyen et long terme.**

1. Sciences et Vie N° 1253, Février 2022. Dossier "Déchets énergétiques. L'autre péril écologique".
2. "[Silicium, un élément abondant, un affinage stratégique](#)", Le portail français des ressources minérales.
3. "[La guerre des métaux rares. La face cachée de la transition énergétique et numérique.](#)" Guillaume Pitron, édition Les liens qui libèrent, 296 pages, date de parution : 10/01/2018.
4. cf [3], [édition de poche](#), 310 pages, date de parution : 09/10/2019.

**Pour voir plus loin...**



## 35 - LE PV CONTRIBUE-T-IL AUX ÎLOTS DE CHALEUR URBAINS ?



### En résumé

A ce jour il n'y a pas de consensus sur l'impact des systèmes PV sur les températures urbaines.

### Pour aller plus loin

Lors de l'installation en toiture d'un système photovoltaïque, on recouvre et/ou remplace une surface existante (toiture en tuile, ardoise, toit plat, etc.) par un système photovoltaïque. Cela entraîne une modification des propriétés thermiques de la paroi. En effet, un système PV n'absorbe pas nécessairement la même quantité de chaleur que la paroi qu'il recouvre. De plus, le système PV convertit une part de l'énergie solaire en énergie électrique, modifiant ainsi la part qui pourrait être directement rejetée dans l'environnement. Enfin, les propriétés d'inertie thermique et de réflexivité des panneaux PV sont différentes de celles du matériau qu'ils remplacent.

Alors que pour des systèmes relativement petits et isolés, l'impact sera très certainement négligeable, la question peut se poser pour des systèmes de grande taille et installés sur un grand nombre de toitures.

A ce jour, plusieurs études, numériques et expérimentales, ont été menées pour répondre à cette question. Cependant il n'y a pas de consensus établi, certaines études concluant à une augmentation de la température locale de quelques degrés [1], d'autres à une réduction [2].

Une récente revue de la littérature scientifique a compilé les quelques études expérimentales et les études numériques les plus complètes (et récentes). D'après leurs conclusions, le PV urbain réchaufferait l'environnement local en journée, et le refroidirait la nuit [3]. Cependant il est probable que cette conclusion ne soit pas universelle, et dépende largement des conditions locales. Les études s'accordent cependant sur un impact limité sur la température urbaine, souvent de quelques dixièmes de degrés.

### Sources

1. Barron-Gafford et al., "The Photovoltaic Heat Island Effect: Larger solar power plants increase local temperatures", Scientific Reports, 2016, <https://doi.org/10.1038/srep35070>.
2. Masson et al., "Solar panels reduce both global warming and urban heat island", Frontiers in Environmental Science, 2014, <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2014.00014/full>.
3. Sailor et al., "Photovoltaics in the built environment: A critical review", Energy and Buildings, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111479>.



## 36 – COMMENT LE PHOTOVOLTAÏQUE A T-IL ÉTÉ INVENTÉ ?



### En résumé

La découverte de l'effet photovoltaïque remonte à 1839, en France, par Edmond Becquerel. D'abord utilisé pour la mesure de l'illumination, les applications énergétiques ne démarrent vraiment qu'avec l'invention de dispositifs en silicium en 1954 et les besoins de l'industrie spatiale naissante.

### Pour aller plus loin

La première description de l'effet photovoltaïque date de 1839 [1], elle est rapportée dans une communication à l'académie des sciences par Edmond Becquerel (le père d'Henri Becquerel, découvreur de la radioactivité naturelle, avec qui il est souvent confondu [2]). S'apercevant que la lumière permet de générer un courant électrique à l'interface entre une électrode métallique et un électrolyte, il met au point le premier détecteur d'intensité lumineuse [3].

L'effet photovoltaïque dans un matériau solide, le sélénium, a été mis en évidence en 1879 par W. Adams et D. Day ouvrant la porte à de premières applications, concrétisées par Charles Fritts qui fabrique la première cellule solaire fonctionnelle et installe en 1884 le premier système photovoltaïque sur un toit de New York [3]. Le rendement encore faible, inférieur à 1 %, limite les applications commerciales dans le domaine de la production d'énergie.

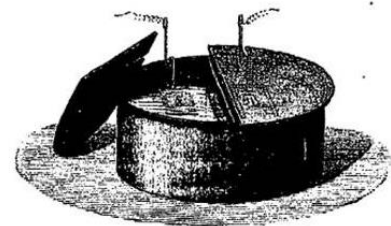
Suite aux progrès dans le domaine de la science des matériaux et de la physique des semiconducteurs, les premières diodes électroniques apparaissent, et Russel Ohl fabrique la première cellule solaire à base de silicium en 1941. Celle-ci est perfectionnée, et en 1954 Chapin, Pearson et Fuller démontrent un rendement de 6 %. Cette technologie sera utilisée en 1958 pour alimenter le satellite américain Vanguard inaugurant les premières applications industrielles.

Le développement de la technologie et de ses applications est alors lancé, en particulier dans le spatial. De nombreux autres matériaux et systèmes permettant la conversion photovoltaïque vont être découverts par la suite, les rendements ne vont cesser de s'améliorer, et les technologies de se perfectionner permettant une réduction des coûts et une amélioration de la fiabilité. Les applications terrestres vont se développer à un rythme exponentiel avec un doublement de la production tous les 2,5 ans sur les 3 dernières décades, et une réduction des coûts de 25 % à chaque doublement [4].

### COMPTE RENDU DES SÉANCES DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES.

SÉANCE DU LUNDI 4 NOVEMBRE 1839.

PRÉSIDENTE DE M. CHEVREUL.



1. E. Becquerel, Compte-rendu de l'Académie des Sciences 1839, disponible à l'adresse : <https://www.ipvf.fr/wp-content/uploads/2020/07/Article-original-Edmond-Becquerel-1839.pdf>
2. <https://www.ipvf.fr/fr/symposium-edmond-becquerel/>
3. Daniel Lincot, "Energie Solaire Photovoltaïque et Transition Énergétique", Leçon inaugurale du Collège de France, Fayard, 2022, 80 pages.
4. <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>

## 37 – QUELLES SONT LES TECHNOLOGIES DU SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE ? (1/2)



### En résumé

Les cellules solaires en silicium représentent actuellement 95 % du marché, mais il existe également des cellules solaires commerciales en couches minces de CdTe et CIGS (moins de 5 % du marché), en matériaux organiques (légères et souples) pour des applications de niche, et des multi-jonctions à haut rendement (III-V et germanium) pour les applications spatiales [1].

### Pour aller plus loin

#### Les technologies commerciales.

**Le silicium.** Les modules en silicium sont aujourd'hui la technologie dominante (95 % du marché). Les modules sont faits d'assemblages de plaquettes de silicium monocristallin (fabrication voir [pages 14-15](#)), qui remplacent progressivement le silicium polycristallin d'aspect marbré, qui était moins cher à fabriquer mais moins efficace. L'efficacité des modules a augmenté d'environ 0,5 % par an au cours des dernières années grâce à une évolution de la technologie des cellules : la technologie Al-BSF (Aluminium Back Surface Field) utilisée pendant longtemps est aujourd'hui remplacée par la technologie PERC (Passivated Emitter and Rear Cell). Les prochaines technologies, qui commencent à être industrialisées dans les usines les plus récentes, sont les TOPCon (Tunneling Oxide Passivated Contact) et HJT (cellule à hétérojonction). En 2023, les meilleurs modules commerciaux ont des rendements supérieurs à 22 %. Les cellules solaires records ont atteint une efficacité de 26,8 % [2].

**Les couches minces.** Les cellules en couches minces en alliages CdTe et plus marginalement CIGS représentent un peu moins de 5 % du marché. Les matériaux sont déposés en couches de 2 à 4  $\mu\text{m}$  d'épaisseur sur du verre ou sur un substrat flexible, les modules présentent un aspect homogène. Les rendements des modules commerciaux restent inférieurs à 20 %, et les records de cellules sont de 22,3 % pour le CdTe et 23,6 % pour le CIGS) [2]. D'autres alliages formés de matériaux abondants sont à l'étude : CZTS, SbSSe, et les perovskites hybrides (voir [Fiche n°38](#)).

**Les multi-jonctions III-V.** Les applications spatiales utilisent des cellules multi-jonctions en semi-conducteurs III-V (GaAs, AlGaAs) et germanium, malgré leur coût très élevé (de l'ordre de 100 €/W) : l'empilement de plusieurs matériaux permet d'atteindre des efficacités de 32 % pour les cellules commerciales, et 39,5 % pour la cellule record [2].

**Les organiques.** Il existe également des cellules et modules commerciaux formés de matériaux organiques (polymères). Ils ont l'avantage d'être peu chers, légers et souples, mais leurs efficacités sont nettement plus faibles, inférieures à 10 % pour les modules (mais avec un record de cellules à 19,2 % [2]). Cette technologie est aujourd'hui dédiée à des marchés de niche.

1. L'énergie solaire photovoltaïque, Daniel Suchet et Erik Jonhson, EDP Sciences, 154 pages, 2023.
2. <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>

## 38 – QUELLES SONT LES TECHNOLOGIES DU SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE ? (2/2)



### En résumé

Les pérovskites hybrides sont à la base de la technologie émergente qui a connu le plus fort développement au cours des dernières années. La prochaine génération de cellules solaires pourrait être formée de tandems, par exemple pérovskite sur silicium.

### Pour aller plus loin

#### Les technologies émergentes.

**Les pérovskites.** Les pérovskites hybrides, formés d'halogénures de plomb et de ligands organiques, sont apparus récemment et ont connu un fort développement avec l'obtention rapide de rendements très élevés (record de 26,1 % [1]). La production industrielle de cette technologie est en développement. Les obstacles pour leur commercialisation portent en particulier sur la durée de vie des cellules solaires, et sur leur utilisation de plomb.

**Les tandems.** L'efficacité maximale théorique des cellules solaires « simple jonction » en silicium est autour de 30 %. Pour dépasser cette limite, la prochaine génération de cellules devrait être formée de tandems (ou « multi-jonctions ») associant une cellule en couche mince sur une cellule en silicium [2].

Les cellules solaires en pérovskites hybrides, qui peuvent être fabriquées par voie liquide, sont considérées comme la solution la plus prometteuse pour fabriquer des tandems à bas coût avec des efficacités supérieures à 30 %. Les cellules tandems records en pérovskite sur silicium atteignent 33,7 % en 2023 [1].

1. <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
2. L'énergie solaire photovoltaïque, Daniel Suchet et Erik Jonhson, EDP Sciences, 154 pages, 2023.

## 39 – LE SOLAIRE PV EST-IL UNE SOURCE D'ÉLECTRICITÉ VARIABLE, INTERMITTENTE, PILOTABLE, FLEXIBLE, FIABLE, PRÉVISIBLE ? (1/2)



### En résumé

Le solaire PV est une source d'électricité dont le fonctionnement est très fiable mais peu flexible, et dont la production est intermittente. Ses variations ont pour origine l'alternance jour/nuit et les conditions environnementales (voir la [Fiche n°40](#)).

### Pour aller plus loin

Chaque source d'énergie a ses caractéristiques et contraintes propres, qui ont un impact sur ses conditions d'utilisation, sa disponibilité, et son coût. La disponibilité des sources d'électricité dépend de nombreux facteurs (voir également la [Fiche n°40](#)).

**Variabilité et intermittence [1].** La **variabilité** est une notion qui caractérise les fluctuations d'une source, mais ni leur rapidité ni leur amplitude. Parmi les sources variables, la notion d'**intermittence** suggère des variations rapides et de grande amplitude de la source, dont la puissance fournie peut devenir nulle.

**L'intermittence est subie** lorsqu'elle est liée aux conditions environnementales, par exemple dans le cas de sources d'énergie renouvelables (solaire PV, éolien), mais aussi dans le cas de défaillances fréquentes de matériel [2].

**L'intermittence est choisie** lorsqu'on pilote la production d'une source en l'éteignant fréquemment. C'est par exemple le cas des moyens de production de pointe, qui sont allumés ou éteints en l'espace de quelques heures.

**Pilotage et flexibilité :** c'est ce qui caractérise une source d'électricité dont la production peut être modulée suivant les besoins (équilibre production/consommation, stabilité du réseau). Le solaire PV, comme l'éolien, n'est pilotable que par écrêtement, c'est-à-dire en arrêtant ou en réduisant la production [3]. L'écrêtement constitue une perte nette pour le producteur puisque la source pourrait fournir plus d'énergie sans surcoût.

**Fiabilité.** Elle caractérise la probabilité de fonctionnement sans panne sur une période donnée. Le solaire PV est une source d'énergie particulièrement fiable, du fait de l'absence de pièce mobile et donc d'usure mécanique. Le taux de défaillance est très faible [3,4], et sans impact à l'échelle nationale grâce à l'effet de foisonnement (voir la [Fiche n°40](#)).

1. D. Suchet, A. Jeantet, T. Elghozi, Z. Jehl, "Defining and Quantifying Intermittency in the Power Sector", *Energies* 13, 3366 (2020). <https://doi.org/10.3390/en13133366>
2. Disponibilité des moyens de production électrique en France, données de RTE : <https://www.services-rte.com/en/view-data-published-by-rte/downtime-of-generation-resources.html>
3. Site de l'IEA, impact du solaire PV et de l'éolien sur les besoins en écrêtement ([lien](#)).
4. D. C. Jordan, B. Marion, C. Deline, T. Barnes, M. Bolinger, « PV field reliability status—Analysis of 100 000 solar systems », *Prog. in PV* 28, 739-754 (2020). <https://doi.org/10.1002/pip.3262>
5. IEA PVPS, <https://iea-pvps.org/research-tasks/performance-operation-and-reliability-of-photovoltaic-systems/>

## 40 – LE SOLAIRE PV EST-IL UNE SOURCE D'ÉLECTRICITÉ VARIABLE, INTERMITTENTE, PILOTABLE, FLEXIBLE, FIABLE, PRÉVISIBLE ? (2/2)



### En résumé

Le solaire PV est une source d'électricité fiable mais intermittente (voir la [Fiche n°39](#)), dont les fluctuations locales journalières sont atténuées par l'effet de foisonnement, et les variations saisonnières peuvent être en partie compensées par la complémentarité avec l'éolien. La prévisibilité de la production solaire PV doit être considérée à différentes échelles de temps.

### Pour aller plus loin

Le solaire PV est une source d'énergie intermittente, dont les variations ont principalement deux origines :

1. l'alternance jour/nuit et plus généralement la trajectoire du soleil dans le ciel, parfaitement prévisible, et
2. les conditions météorologiques : nuages, ombres, mais aussi la température et le vent. L'efficacité d'une cellule solaire diminue d'environ 0,3 à 0,5 % par degré Celsius, et le vent contribue à son refroidissement.

L'impact de ces variations peut être atténué de différentes manières.

**L'effet de foisonnement**, obtenu par la multiplication de sources éloignées, atténue les effets des fluctuations temporelles aux petites échelles de temps (jusqu'à quelques heures) liées à l'intermittence et la variabilité de la production d'énergie [1,2]. Il n'est donc pas nécessaire de prévoir la production solaire PV à une petite échelle de temps et d'espace.

La **complémentarité** des ressources solaires (maximales en été) et éoliennes (maximales à l'automne et au printemps) permet d'atténuer l'impact des variations saisonnières (voir les scénarios pour le futur mix énergétique, Fiches n°[22](#) et [23](#)) sans faire disparaître l'intermittence.

**Prévisibilité.** Prévoir la production solaire PV est utile pour faciliter la gestion du réseau électrique (stabilité, équilibre production/consommation) et les besoins de stockage (voir les Fiches n°[32](#) et [41](#)). La prévisibilité de la production solaire PV doit être considérée à différentes échelles de temps.

- Aux temps courts (quelques heures à quelques jours), le foisonnement diminue le besoin d'une prévision locale, qui dépend de la fiabilité des prévisions météorologiques. Pour la prévision à 24 heures de l'irradiation solaire intégrée sur une heure, les erreurs sont de l'ordre de 5 à 10 % [3,4].
- Sur le temps long, les variations saisonnières sont importantes mais facilement prévisibles. Pour un lieu et un mois donnés, la production PV mensuelle est soumise à des variations inter-annuelles relativement faibles. Au centre de la France, on trouve par exemple que l'irradiation solaire mensuelle varie d'un facteur 5 entre décembre et juillet, mais les variations inter-annuelles sont de l'ordre de 10 % pendant la période de production maximale (mars-octobre) [5].

1. <https://www.cre.fr/Pages-annexes/Glossaire/FOISONNEMENT>
2. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1367-2630/18/6/063027/meta>
3. Caicheng Liu et al., « A Review of Multitemporal and Multispatial Scales Photovoltaic Forecasting Methods », IEEE Access 10, 35073 (2022). <https://doi.org/10.1109/access.2022.3162206>
4. S. Sobri, S. Koohi-Kamali, N. Abd. Rahim, « Solar photovoltaic generation forecasting methods: A review », Energy Conversion and Management 156, 459-497 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.11.019>
5. Ecarts-types relatifs sur la période 2005-2020 au centre de la France [Lat/Lon: 46,339°/2,432°] d'après la base de données PVGIS-SARAH2, [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/fr/](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/fr/)

## 41 - ADAPTER LE RÉSEAU AU NOUVEAU MIX ÉNERGÉTIQUE À L'HORIZON 2050... À QUEL COÛT ?



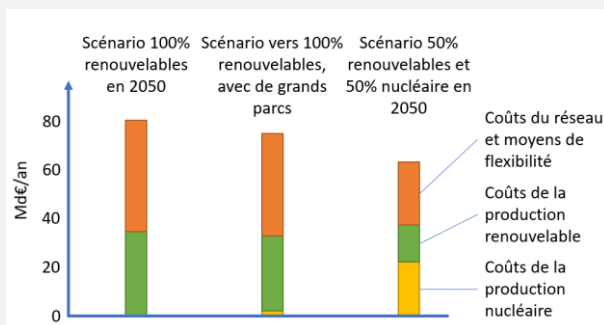
### En résumé

L'intégration massive d'énergies renouvelables nécessitera de nouveaux moyens de flexibilité. D'ici 2035, on estime que les outils existants ou déjà prévus seront suffisants. Au-delà, de nouvelles installations seront nécessaires et engendreront un surcoût. Celui-ci peut être estimé en développant des scénarios pour les mix énergétiques futurs.

### Pour aller plus loin

Le solaire photovoltaïque est une énergie intermittente dont la production n'est pas en parfaite adéquation avec la consommation. La complémentarité avec d'autres sources d'énergies, comme l'éolien, permet d'atténuer partiellement ce problème. Néanmoins, avec l'accroissement des énergies renouvelables, des moyens d'adaptation seront nécessaires : sources d'énergies non-renouvelables et pilotables, stockage, flexibilité de la demande. RTE estime que nous disposons de moyens suffisants jusqu'à l'intégration de 50 % d'énergies renouvelables, suivant la PPE jusqu'en 2035 [1].

Au-delà, des moyens de flexibilité supplémentaires seront nécessaires et généreront un surcoût qui dépend du mix énergétique. Le développement de scénarios futurs permet de les évaluer, malgré de fortes incertitudes, voire des paris technologiques.



RTE a ainsi estimé les coûts complets de production et de gestion du réseau (maintenance, développement, flexibilité) à l'horizon 2050 dans différents scénarios [2]. Ce coût complet est estimé à 80 milliards d'euros par an (Md€/an) pour un mix 100 % renouvelables, et 60 Md€/an pour un mix reposant à parts égales sur les renouvelables et le nucléaire. Le rapport explore également différentes variantes. Par exemple le coût complet d'un réseau 100 % renouvelable, basé prioritairement sur de grandes centrales, serait de 70 Md€/an.

1. RTE et IEA, Conditions et prérequis en matière de faisabilité technique pour un système électrique avec une forte proportion d'énergies renouvelables à l'horizon 2050, 01/2021, <https://www.rte-france.com/actualites/rte-aie-publient-etude-forte-part-energies-renouvelables-horizon-2050>.
2. RTE, FUTURS ÉNERGÉTIQUES 2050, 10/2021, <https://www.rte-france.com/analyses-tendances-et-prospectives/bilan-previsionnel-2050-futurs-energetiques>.



## 42 - QUELLE SOURCE D'ÉNERGIE POUR PRODUIRE DE L'HYDROGÈNE PAR ÉLECTROLYSE ?



### En résumé

L'hydrogène peut être produit par électrolyse, et servir à l'industrie chimique, en substitution aux énergies carbonées et pour le stockage de l'énergie.

### Pour aller plus loin

**Verbatim** : Lu dans Le Monde du 17/11/2021: "La France a un avantage sur les autres grands pays, car elle a « un nucléaire solide, installé » qui lui permet de « produire de l'hydrogène beaucoup plus massivement », a plaidé lundi le président de la République." [1]

Le nucléaire procure-t-il vraiment un avantage pour la production d'hydrogène, en particulier par rapport au solaire PV ? Sur le plan économique ?

**Question** : Pour produire de l'hydrogène par électrolyse, est-il plus intéressant économiquement d'installer des centrales nucléaires ou solaires photovoltaïques ?

**Réponse rapide** : cela dépend du ratio entre le coût de l'électrolyseur et le coût du kWh électrique qui l'alimente. Le PV solaire est plus intéressant si le coût du kWh est prépondérant dans l'équation, le nucléaire prend l'avantage si c'est l'électrolyseur qui est le premier facteur de coût, car son facteur de charge sera plus élevé.

#### Solaire PV pour la production d'H2 par électrolyse

Avantage : l'électricité est moins chère, les nouvelles centrales au sol permettent de produire l'électricité à un coût de l'ordre de 50 €/MWh, voire moins.

Inconvénient : le facteur de charge est de l'ordre de 15%, ce qui renchérit le coût des électrolyseurs si le PV est la seule source d'alimentation.

#### Nucléaire pour la production d'H2 par électrolyse

Avantages : le facteur de charge est de l'ordre de 75-80%, ce qui optimise l'usage des électrolyseurs sans besoin de stockage ou de mix d'alimentation. L'utilisation de la chaleur de la centrale (actuellement perdue) peut permettre de pour diminuer le coût énergétique de l'électrolyse.

Inconvénient : c'est probablement plus cher au kWh électrique, avec des estimations qui vont de 60 €/MWh à plus de 100 €/MWh. Pour les futurs réacteurs d'Hinkley Point au Royaume-Uni, un prix de l'électricité de 92,5 £ par MWh (106 €/MWh) est garanti pendant 35 ans [2].

### Sources

1. [https://www.lemonde.fr/planete/article/2021/11/16/france-2030-emmanuel-macron-annonce-1-9-milliard-d-euros-pour-les-projets-d-hydrogene\\_6102297\\_3244.html](https://www.lemonde.fr/planete/article/2021/11/16/france-2030-emmanuel-macron-annonce-1-9-milliard-d-euros-pour-les-projets-d-hydrogene_6102297_3244.html).
2. [https://www.lemonde.fr/economie/article/2018/11/10/au-royaume-uni-vers-la-fin-du-financement-prive-du-nucleaire\\_5381712\\_3234.html](https://www.lemonde.fr/economie/article/2018/11/10/au-royaume-uni-vers-la-fin-du-financement-prive-du-nucleaire_5381712_3234.html).



# Des ressources documentaires pour approfondir

- <https://www.ademe.fr/>  
Le site de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie est une source très riche d'informations et d'études sur les énergies renouvelables et le photovoltaïque en particulier.
- <https://www.photovoltaique.info/>  
Ce site est lié au Centre National de Ressources sur le Photovoltaïque a été créé en 2007 par l'association [Hespul](#). C'est une source d'informations très complète et régulièrement mise à jour, très précieuse pour les producteurs PV actuels ou futurs.
- <https://reseaux.photovoltaique.info/>  
Également créé par l'association [Hespul](#), ce site est complémentaire du précédent. Il apporte des informations plus générales sur les enjeux et perspectives des énergies renouvelables et le fonctionnement du réseau électrique.
- <https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/recent-facts-about-pv-in-germany.html> (en anglais), *Recent Facts about Photovoltaics in Germany* (en anglais), Harry Wirth, Fraunhofer ISE.  
Le Fraunhofer ISE, institut allemand de référence dans le domaine de la recherche sur le photovoltaïque et l'énergie solaire, a publié une Foire aux Questions très complète sur le développement du photovoltaïque en Allemagne, qui a inspiré ce travail.
- *L'énergie solaire photovoltaïque*, Daniel Suchet et Erik Jonhson, livre, 154 p., EDP Sciences, 2023.  
Ce livre propose un tour d'horizon de l'énergie solaire photovoltaïque : son histoire et ses perspectives, les principes de fonctionnement et les différentes technologies, les ordres de grandeur, les coûts, et ses impacts économiques et écologiques. Il s'adresse à un large public.
- Soirée-débat sur l'agrivoltaïsme organisée par l'atelier SolairePV qui prépare et édite ce guide, à l'occasion des Journées Nationales du PhotoVoltaïque du 29 novembre au 2 décembre 2022. Redifusion :  
[https://solairepv.fr/wp-content/uploads/Soiree-debat\\_Agrivoltaisme\\_JNPV2022.mp4](https://solairepv.fr/wp-content/uploads/Soiree-debat_Agrivoltaisme_JNPV2022.mp4)
- Cartes interactives mises à jour régulièrement :
  - <https://www.euroserv-er.org/online-database/> (en anglais)  
Les principaux indicateurs sur le développement des énergies renouvelables en Europe. Les données sont issues d'Eurostat, de l'Agence Européenne de Statistique, et d'EurObserv'ER.
  - <https://geoservices.ign.fr/portail-cartographique-enr>  
Système de cartographie pour le développement des énergies renouvelables en France publié très récemment, en version bêta.
  - <https://france-potential-solaire.cadastre-solaire.fr/>  
Cadastre solaire pour la France, nécessite une inscription (gratuite).
  - <https://www.solarpowereurope.org/insights/interactive-data/solar-manufacturing-map>  
Cartographie des industries du solaire en Europe, par spécialité.

# Glossaire

**Énergie décarbonée** : Une ressource est “décarbonée” si elle fournit de l’énergie sans émission de CO<sub>2</sub>. Toutes les énergies renouvelables ainsi que l’énergie nucléaire sont considérées comme décarbonées, tandis que les énergies fossiles sont catégorisées comme carbonées. En pratique, aucune énergie n’émet « zéro carbone » si l’on intègre les étapes en amont et en aval de la production d’énergie (fabrication du panneau solaire, de l’éolienne, du réacteur nucléaire...), dans une analyse du cycle de vie. En toute rigueur, il faudrait donc parler d’énergies « faiblement carbonées ».

**Facteur de charge** : le facteur de charge d’une unité de production électrique est le rapport entre l’énergie électrique effectivement produite et l’énergie qu’elle aurait produite si elle avait fonctionné à sa puissance nominale (ensoleillement de 1 kW/m<sup>2</sup> à 25°C) sur une période donnée. Il est exprimé en pourcentage et calculé sur une période d’un an. Par exemple, pour un panneau de puissance nominale de 1 kW, un facteur de charge de 0.15 signifie qu’il fournit l’équivalent d’une puissance de 1 kW pendant 15 % des 8760 heures d’une année, soit une énergie annuelle de 1314 kWh (ou 1.3 MWh).

**Kilowatt heure (kWh)** : Le kilowatt-heure ou kilowattheure est une unité d’énergie. Un kilowatt-heure vaut 3,6 méga (million de) joules. Si de l’énergie est produite ou consommée à puissance constante sur une période donnée, l’énergie totale en kilowatts-heures est égale à la puissance en kilowatts multipliée par le temps en heures.

**Scénarios énergétiques** : Ces scénarios modélisent les évolutions possibles du système énergétique d’un territoire. Ils explorent la faisabilité et les implications des différentes options disponibles, par exemple le recours plus ou moins prononcé aux énergies renouvelables, au nucléaire, aux économies d’énergies, la diminution plus ou moins rapide de la consommation des énergies fossiles... Ces scénarios ayant un aspect prospectif, ils intègrent différents niveaux d’incertitude, et peuvent inclure des paris technologiques. Nous faisons régulièrement référence dans les fiches questions - réponses aux scénarios de RTE (Réseau de Transport d’Electricité), qui documentent plusieurs trajectoires possibles vers la neutralité carbone en 2050 en France.

<https://www.rte-france.com/analyses-tendances-et-prospectives/bilan-previsionnel-2050-futurs-energetiques#Lesdocuments>

**Surface artificialisée** : L’artificialisation consiste à transformer un sol naturel, agricole ou forestier, par des opérations d’aménagement pouvant entraîner une imperméabilisation partielle ou totale, afin de les affecter notamment à des fonctions urbaines ou de transport (habitat, activités, commerces, infrastructures, équipements publics...).

Source : ministère de l’écologie (<https://www.ecologie.gouv.fr/artificialisation-des-sols>)

**Watt crête (Wc)** : Parfois appelé “watt nominal”, il s’agit de l’unité de mesure de puissance d’un panneau solaire. Il correspond à la délivrance d’une puissance électrique de 1 Watt, sous les conditions nominales d’ensoleillement (1 kW/m<sup>2</sup>) et d’orientation (incidence normale). En anglais, on parle de “watt peak”, abrégé en “Wp”.

# Acronymes

**AIE** : Agence Internationale de l'Energie.

**ADEME** : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie.  
Egalement appelée "Agence de la transition écologique", l'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.  
<https://www.ademe.fr/>

**CRE** : La Commission de Régulation de l'Énergie est une autorité administrative indépendante française créée le 24 mars 2000 et chargée de veiller au bon fonctionnement du marché de l'énergie et d'arbitrer les différends entre les utilisateurs et les divers exploitants. <https://www.cre.fr/>

**EnR** : Sigle pour "Energies renouvelables". On lit sur le site de l'ADEME ([Lien](#)) :  
*"On appelle énergies renouvelables, les énergies issues de sources non fossiles renouvelables. Elles servent à produire de la chaleur, de l'électricité ou des carburants. Les techniques de cogénération permettent de produire à la fois chaleur et électricité. Les principales énergies renouvelables sont : l'énergie hydroélectrique, l'énergie éolienne, l'énergie de biomasse, l'énergie solaire, la géothermie, les énergies marines."*

**LCOE** : Sigle anglais de *Levelized Cost of Energy*, signifiant « coût actualisé de l'énergie ». Il correspond au prix complet d'une énergie (l'électricité dans la plupart des cas) sur la durée de vie de l'équipement qui la produit. (Source : Wikipédia)

**PPE** : Programmation pluriannuelle de l'énergie (voir [fiche n°21](#)).

**PV** : acronyme de *PhotoVoltaïque*, désigne souvent le photovoltaïque solaire, c'est-à-dire un dispositif permettant de convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique.

**RTE** : Réseau de Transport de l'Electricité. C'est le gestionnaire de réseau de transport français responsable du réseau public de transport d'électricité haute tension en France métropolitaine.  
<https://www.rte-france.com/>

**SER** : Syndicat des Energies Renouvelables.

**SNBC** : Stratégie Nationale Bas Carbone contenue dans la loi énergie-climat.

**TURPE** : Tarif d'Utilisation des Réseaux Publics d'Electricité, c'est le tarif payé par les utilisateurs des réseaux d'électricité. Les producteurs d'électricité photovoltaïque contribuent au financement des réseaux électriques par des frais de raccordement au réseau à la mise en service, puis la facturation annuelle du TURPE à Enedis pour l'injection de la production sur le réseau en vue de sa vente.

## Unités

**gCO<sub>2</sub>eq/kWh** : gramme de CO<sub>2</sub> équivalent émis par kilo-Watt heure d'électricité produite, quantité de gaz à effet de serre émis par unité d'énergie produite.

**W, kW** : Watt ou kilo-Watt, unité de puissance (énergie produite ou consommée par seconde).

**Wc** : Watt-crête

**Wh, kWh** : Watt Heure, ou kilo-Watt heure, unité d'énergie.

# Crédits

**La première version de ce guide** est née d'un atelier mené par des équipes du Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies (C2N, CNRS, Université Paris-Saclay) et de l'Unité Mixte de Recherche de l'Institut Photovoltaïque d'Ile-de-France (IPVF, CNRS, Ecole Polytechnique), et rejointes par d'autres membres de la Fédération de recherche du Photovoltaïque (FedPV),

sous l'impulsion et la supervision de Stéphane Collin et Jean-Francois Guillemoles,

et avec la participation d'Amaury Delamarre, Thomas Vezin, Guillaume Vidon, Capucine Tong, Bérengère Frouin, Marie Legrand, Mohamed Amara, Tiphaine Mathieu, Lucas Gavotto, Daniel Suchet...

Une première étape a été menée en octobre et novembre 2021 pour préparer une soirée-débat organisée aux Journées Nationales du PhotoVoltaïque (JNPV) le mercredi 1er décembre 2021, intitulée *Le photovoltaïque solaire en France : réalité, potentiel, et défis*. Les premiers résultats de ce travail ont alors été partagés et ont reçu un accueil enthousiaste de la part de la communauté scientifique du photovoltaïque. Cette étape a permis d'étoffer l'équipe de l'atelier et d'enrichir les questions abordées.

La version 1 du guide a été publiée le 7 mars 2022, puis le 13 juin 2022 avec la correction de quelques coquilles. L'équipe de l'*Atelier SolairePV* remercie Daniel Lincot pour avoir inspiré ce travail, ainsi que les très nombreux relecteurs.

**Dans cette deuxième version du guide SolairePV, l'ensemble des fiches a été revu, les chiffres et références ont été mis à jour. Le guide s'est également enrichi d'une quinzaine de fiches thématiques. Nous présentons en particulier la fabrication et l'industrie des modules photovoltaïques (visuels pages 14 et 15, fiches n°9 à 14). Nous analysons de manière plus approfondie les notions de matériaux rares et critiques (n°17 et 18), et les installations près des monuments historiques (n°20), verticales (n°27), pour l'agrivoltaïsme (n°28) et le PV flottant (n°29). Et pour voir plus loin, nous proposons une discussion sur les îlots de chaleur urbains (n°35), un bref historique du PV (n°36), un panorama des technologies du PV (n°37 et 38), et nous introduisons les notions de sources d'électricité intermittentes, variables, fiables, pilotables, flexibles et prévisible (n°39 et 40).**

L'*Atelier SolairePV*, supervisé par Stéphane Collin et Jean-François Guillemoles, a bénéficié pour cette deuxième édition du guide de la très forte implication de Thomas Vezin (animation, mise en page, figures) et Amaury Delamarre (animation, soirée-débat), des participations assidues de Maxime Levillayer, Martin Thebault, Guillaume Vidon, Tiphaine Mathieu, Mohamed Amara, Nao Harada, Daniel Suchet et Antoine Perelman, et des contributions de l'ensemble du collectif également composé de Léopold Boudier, Lucas Gavotto, Léo Choubrac, Capucine Tong, Inès Revol (Massiot), José Alvarez, Judikael Lerouzo, Amaury Martin, Jean-Baptiste Puel, Antoine Tiberj, James Connolly, Bérengère Frouin, Marie Legrand.

Version du 14/09/2023.

Ce document sera complété et mis à jour régulièrement, et disponible sur le site :

<https://solairepv.fr>

Contact : [stephane.collin@cnrs.fr](mailto:stephane.collin@cnrs.fr)

Le contenu de ce document peut être réutilisé librement en citant la source :

*Le solaire photovoltaïque en France : réalité, potentiel et défis*, version du 14/09/2023, disponible sur : <https://solairepv.fr/>

Le guide collectif SolairePV (le site web <https://solairepv.fr> et ce document pdf) ont été labellisés [Année de la physique 2023-2024](#).

# ANNÉE 2023-2024 DE LA PHYSIQUE

Ce document a été édité grâce au soutien du [CNRS](#), du Centre de Nanosciences de de Nanotechnologies ([C2N](#)), de l'Institut Photovoltaïque d'Ile-de-France ([IPVF](#)) et de la Fédération de Recherche Photovoltaïque ([FedPV](#)).

