

Le solaire photovoltaïque en France : réalité, potentiel et défis

Des questions...



...et des réponses

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

Fédération de recherche du Photovoltaïque

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 07/03/2022, disponible sur : <http://solairepv.fr>

ou :

- <http://solairepv.fr> (07/03/2022)

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 erronés.

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 CO₂, 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 *pour faire simple*, 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 <http://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 photovoltaïque (PV) est un dispositif qui permet de transformer le rayonnement solaire en électricité.

[En savoir plus... p. 11](#)

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

En 2021, le solaire PV a fourni **14,3 TWh**, soit **3 % de l'énergie électrique consommée en France** (contre 2,8 % en 2020).

[En savoir plus... p. 12](#)

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 m² 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. 13](#)

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. Note : 2 €/W correspond environ à 400 €/m² avec les technologies actuelles.

[En savoir plus... p. 14](#)

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 toiture résidentielle.

[En savoir plus... p. 15](#)

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. 16](#)

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 utilisant des modules en silicium monocristallin fournit l'énergie qui a été nécessaire pour sa fabrication en environ **1 an**.

[En savoir plus... p. 17](#)

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

Une installation PV peut fonctionner à plus de 80 % de son efficacité initiale pendant **30 ans** (la perte d'efficacité est de l'ordre de 0,5 %/an). Les panneaux PV bénéficient d'une garantie de 25 à 30 ans selon les constructeurs. Les onduleurs ont une durée de vie d'environ 10 ans.

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

Photovoltaïque, environnement et société

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

En masse, près de **95 % d'un module en fin de vie est valorisé**, mais sous une forme dégradée. Il reste des efforts à fournir pour mieux valoriser les matériaux récupérés lors du recyclage.

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

10 - Quelles sont les émissions de CO₂ d'un système PV ?

Une installation PV sur toiture à base de panneaux en silicium monocristallin émet en moyenne **30 gCO₂eq/kWh**. Les émissions ont lieu essentiellement au moment de la fabrication des panneaux (71 %).

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

11 - Les modules PV utilisent-ils des matériaux rares ?

Les modules PV ne contiennent pas de *terres rares*. Seuls quelques métaux utilisés dont les ressources sont limitées (argent, indium) nécessiteront une adaptation des technologies industrielles à long terme, mais **la rareté des matériaux n'est pas un verrou pour le déploiement du PV à grande échelle**.

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

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

La filière solaire PV française représente environ **8000 emplois** (équivalent temps plein) en 2020, en hausse de 5,6 % par rapport à 2019.

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

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

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

La programmation pluriannuelle de l'énergie prévoit 20 GW installés en 2023 et entre 35 et 44 GW en 2028. **En décembre 2021, 13,2 GW étaient raccordés, soit 66 % de l'objectif 2023.**

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

14 - Quelle est la capacité de solaire PV prévue par les différents scénarios ?

La majorité des scénarios pour le futur mix énergétique prévoit une **augmentation du solaire PV d'un facteur 7 à 20 d'ici 2050**, avec une production comprise entre 150 TWh et 250 TWh par an.

[En savoir plus... p. 26](#)

15 - 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 km², soit un chiffre **très inférieur aux surfaces déjà artificialisées (~ 50 000 km²)**.

[En savoir plus... p. 27](#)

16 - 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 et disponibles (toitures, friches, parkings). Les scénarios les plus ambitieux (150 à 250 TWh/an) semblent donc réalisables.

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

17 – Quel est le potentiel pour le PV solaire en France ? - Les toitures.

D'un point de vue économique, la France a le plus fort potentiel de production PV en toiture en Europe, avec environ 90 TWh/an à un coût inférieur à 0,12 €/kWh (LCOE), et 125 TWh pour un coût allant jusqu'à 0,15 €/kWh.

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

18 – 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. 30](#)

19 – Quel est le potentiel pour de nouveaux types de PV solaire en France ? 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. 31](#)

20 – Quel est le potentiel pour de nouveaux types de PV solaire en France ? L'agrivoltaïsme.

L'**agrivoltaïsme** consiste à concilier l'installation de panneaux PV avec des pratiques agricoles (élevage, serres).

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

Démêlons le vrai du faux !

Réponses à quelques critiques courantes entendues dans le débat public

21 - Le solaire PV, de fortes émissions de CO₂ ?

Non, le solaire PV **n'a pas un mauvais bilan carbone** ! Les énergies décarbonées (renouvelables et nucléaire) génèrent des émissions de 10 à 40 gCO₂eq/kWh (30 gCO₂eq/kWh pour le PV), plus de 10 fois inférieures aux énergies fossiles, gaz ou charbon (500 à 1000 gCO₂eq/kWh).

[En savoir plus... p. 34](#)

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

Oui, l'énergie solaire est diffuse, et c'est un atout : 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. **Il n'est pas nécessaire d'augmenter l'artificialisation des sols pour atteindre les objectifs de neutralité carbone en 2050 !**

[En savoir plus... p. 35](#)

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

Non, le développement du solaire PV **ne fait pas courir de risque sur la stabilité du réseau**. **Oui**, à moyen et long terme, **des investissements sur les infrastructures seront nécessaires**, mais des solutions technologiques existent et pourront être déployés sans impact économique majeur.

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

24 – Les énergies renouvelables, un problème pour les infrastructures ?

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.

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

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

Non, le silicium n'est pas un matériau critique, au contraire c'est l'un des éléments les plus abondants sur Terre. **Non**, il n'y a pas de risque de difficulté d'approvisionnement pour la fabrication de cellules solaires en silicium. Il est néanmoins vrai que l'on ne sait pas encore bien valoriser le silicium lors du recyclage des modules PV.

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

Pour voir plus loin...

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

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

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

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

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 limitant encore plus le coût et l'impact environnemental du PV, et en facilitant les usages (modules flexibles, esthétiques,...).

Les axes de recherche portent par exemple sur l'augmentation de l'efficacité, la diminution de la quantité de matériaux utilisés, la conception d'architectures facilitant le recyclage des panneaux en fin de vie ou de nouvelles applications (modules flexibles, colorés,...).

Des ressources documentaires pour approfondir

[p. 42](#)

Glossaire

[p. 43](#)

Acronymes et unités

[p. 44](#)

Crédits

[p. 45](#)

En été, à midi, sans nuage

1000
W/m²

Technologie la plus répandue: le silicium

Puissance Nominale

Coût indicatif (installation résidentielle)

Empreinte Carbone

Si

1 panneau (1,7 m²)

~ 350 Wc

~ 700 €

~ 30 gCO₂eq/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

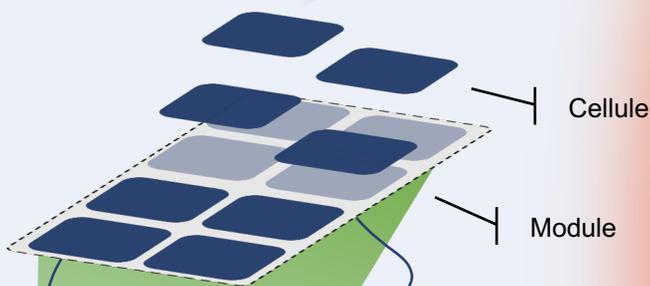


~15%

Facteur de charge

Energie lumineuse reçue

1300
kWh/an/m²



~20%

Rendement

Électricité récupérable

260
kWh/an/m²

20m²

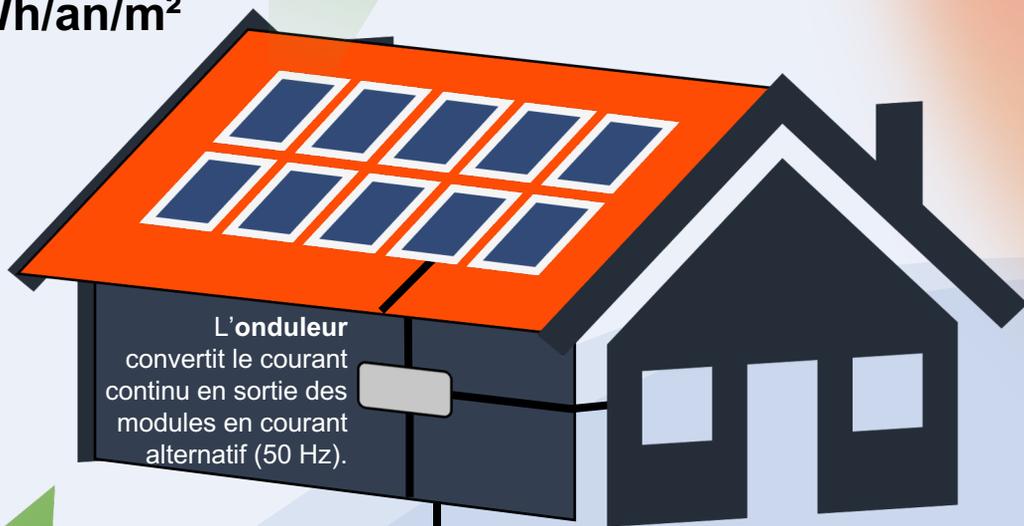
Sur un toit orienté sud

4,2kW

Puissance nominale

5MWh

Production annuelle



Injection sur le réseau et vente du surplus



Consommation d'une famille de 4 (hors chauffage)

1000
W/m²

En France, en milieu d'une journée d'été, la **puissance du rayonnement solaire** est d'environ **1000 W/m²** (1 kW/m²).

1300
kWh/an/m²

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/m²**.

~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 m² éclairé par une puissance de 1000 W/m² fournit donc une **puissance électrique nominale de 200 W** (on parle également de puissance crête de 200 Wc).

260
kWh/an/m²

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 $200 \times 0,15 \times 8760 = 263 \text{ kWh/m}^2$, qui correspond bien à 20 % de l'énergie lumineuse reçue par m².

20 m²

Sur un toit orienté sud

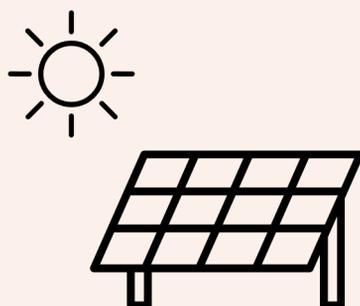
EXEMPLE

5 MWh

Production annuelle

une installation solaire photovoltaïque de **20 m² 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).

Les installations solaires photovoltaïques aujourd'hui





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

Pour faire simple

Un panneau (ou module) PV permet de transformer le rayonnement solaire en électricité. Il est principalement 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 m², 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 2021, les panneaux commerciaux sont généralement formés de silicium (96 % du marché mondial en 2021 [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 semi-conducteurs) 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, 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 2021*. https://iea-pvps.org/trends_reports/trends-in-pv-applications-2021/
2. NREL Champion Photovoltaic Module Efficiency Chart. <https://www.nrel.gov/pv/module-efficiency.html>



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

Pour faire simple

En 2021, le solaire photovoltaïque a fourni 14,3 TWh, soit 3 % de l'énergie électrique consommée en France (contre 2,8 % en 2020).

Pour aller plus loin

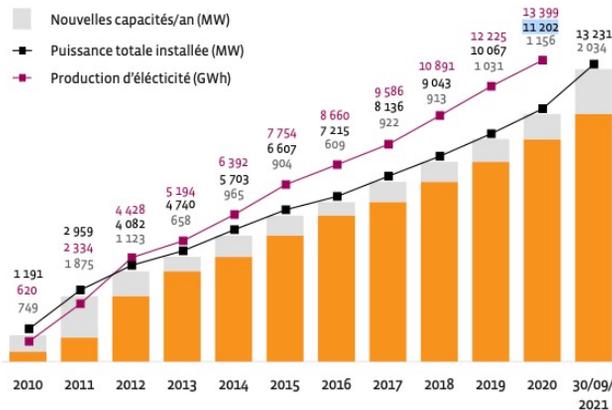
En dix ans (2011-2021), la puissance du parc photovoltaïque installé en France a été multipliée par 5 pour atteindre aujourd'hui 13,2 GW, et la production d'énergie solaire a été multipliée par 6 avec 14,3 TWh en 2021 [1].

Le PV a ainsi permis de couvrir 3 % de la consommation électrique en 2021, contre 2,8 % en 2020. Ce taux de couverture annuel atteint 10,8 % en Corse, et respectivement 8,8 et 7,9 % sur les régions Nouvelle-Aquitaine et Occitanie. Par comparaison, la puissance du parc éolien installé en 2021 était de 18,8 GW, pour une production électrique annuelle de 36,8 TWh, soit 7,8 % de l'électricité annuelle consommée en 2021 (contre 17 GW, 39,7 TWh, et 8,8 % en 2020).

NB: les chiffres diffèrent légèrement selon les sources.

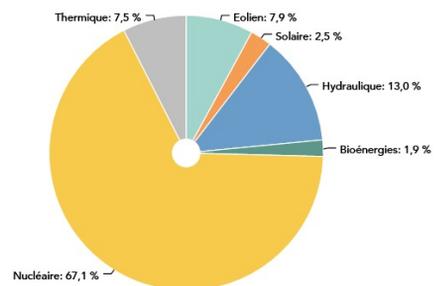
Parc total photovoltaïque et production d'électricité annuelle en France

Sources : Sdes pour les capacités installées, Eurostat pour la production.



Répartition de la production électrique en France en 2020

Figure extraite de : [3]



Source : [2]

Sources

1. Ministère de la transition écologique. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/publicationweb/412>
2. RTE, bilan 2020. <https://bilan-electrique-2020.rte-france.com/production-production-totale/#>
3. Le Baromètre 2021 des énergies renouvelables électriques en France. [Lien]



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

Pour faire simple

Pour une puissance nominale de 1 kW installée en France (5 m² 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 %.

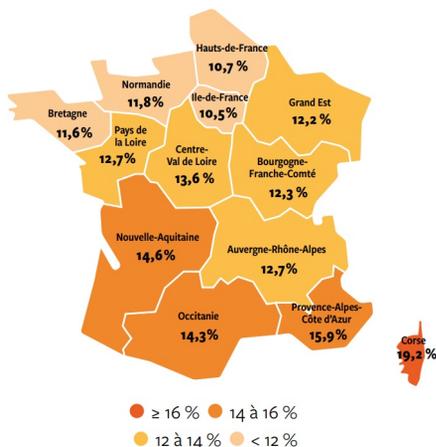
Pour aller plus loin

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/m² à 25°C).

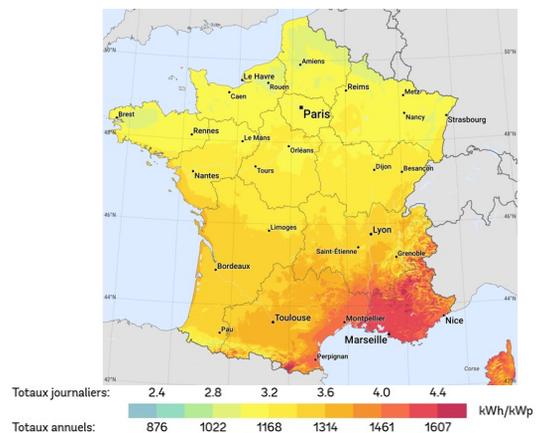
Les cartes ci-dessous donnent la distribution sur le territoire du facteur de charge et de la production par kW nominal (aussi appelé kWc).

A l'échelle des régions, elles montrent une production d'électricité photovoltaïque moyenne 50 % plus élevée dans le sud de la France par rapport au nord.

Facteur de charge solaire moyen en 2021



kWh produit par kW installé



Sources

1. Panorama de l'électricité renouvelable, 31 décembre 2021. [https://www.rte-france.com/analyses-tendances-et-prospectives/le-panorama-de-lelectricite-renouvelable\(02/2021\)](https://www.rte-france.com/analyses-tendances-et-prospectives/le-panorama-de-lelectricite-renouvelable(02/2021)).
2. <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/france>



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

Pour faire simple

Les modules PV, briques de base des installations PV, ont vu leur prix être divisé par 10 en 10 ans. Leur prix avoisine désormais les 0,2 €/W (soit 400 €/m²). 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.

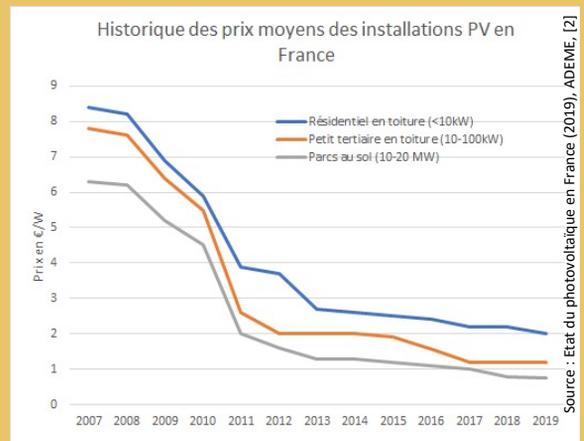
Pour aller plus loin

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 [1], soit une division par 10 en 10 ans !

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 [2]. En 2019 en France, une installation résidentielle en toiture coûtait autour de 2 €/W, une centrale au sol de taille moyenne 0,7 €/W [2].

Exemple pour un particulier d'une installation de 30m² de panneaux PV sur un toit de maison individuelle en 2022 [4] :

- Puissance nominale: **6 kW**.
- Coût d'installation: environ **12 000 €** (sans subvention, voir la fiche n°6) [4]
- Électricité produite par an: **7800 kWh**.
- Au prix du kWh actuel (~0,15 €), cette installation sera rentabilisée en **~10 ans**.
- Consommation annuelle d'une maison hors chauffage: **~5000 kWh** [3].



Sources

1. IEA - <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/evolution-of-solar-pv-module-cost-by-data-source-1970-2020>
2. IEA PVPS Ademe – Etat du photovoltaïque en France, 2019, <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/pvps-etat-photovoltaique-france-2019.pdf>
3. Rapport de l'ADEME, "Alléger l'empreinte environnementale de la consommation des Français en 2030". [Lien]
4. <http://forum-photovoltaique.fr/viewforum.php?f=22>



5 - LE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE EST-IL COMPÉTITIF ?

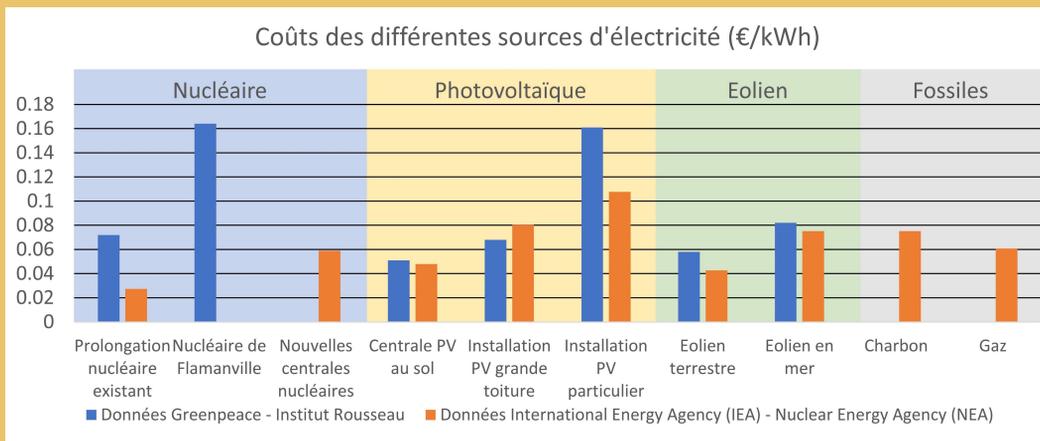
Pour faire simple

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 précédente). 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.



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 calculs 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].

Sources

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 ?

Pour faire simple

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

Il existe différentes formes d'aides publiques directes ou indirectes (subventions) révisées chaque trimestre dont les détails sont disponibles sur les sites [1], [2] et [3]:

- Une **prime d'investissement** réservée aux petites installations avec autoconsommation partielle de la production, allant de 0,08 à 0,38 €/W selon la puissance installée.
- Un dispositif d'**obligation d'achat** de la production injectée sur le réseau pour les installations de faible puissance (jusqu'à 500 kW, ou 100 kW en cas d'autoconsommation). 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 0,1 et 0,18 €/kWh. Il est garanti par contrat sur 20 ans.
- Pour les puissances plus importantes, le soutien se fait à travers une **mise en concurrence** dans le cadre d'**appels d'offre** dédiés, par exemple, aux installations sur bâtiments, au sol ou

pour des ombrières de parking. Ce sont 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.

Exemple pour un particulier : imaginons un particulier qui souhaiterait installer 6 kW de panneaux PV sur son toit.

- s'il opte pour une installation en injection totale, il bénéficiera d'un tarif de rachat de 0,1789 €/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'installation de 0,38 €/W (soit 2280 € au total pour un coût d'environ 12000 €) et d'un tarif de rachat de 0,1 €/kWh.

Sources

1. <https://www.photovoltaique.info/fr/tarifs-dachat-et-autoconsommation/tarifs-dachat/>
2. <https://www.ecologie.gouv.fr/solaire>
3. <https://www.economie.gouv.fr/particuliers/aides-installation-photovoltaiques>



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

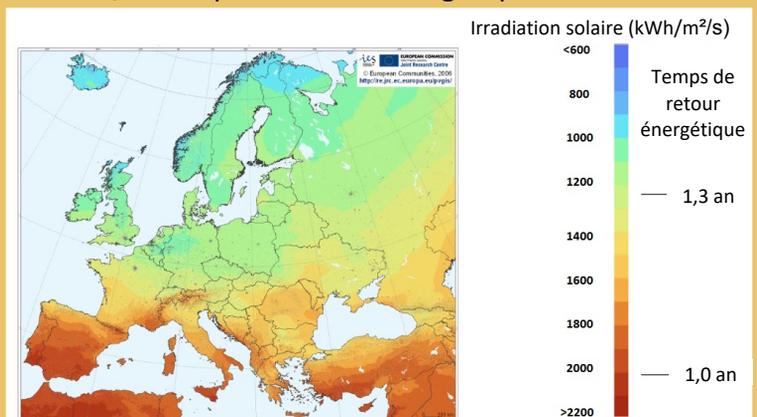
Pour faire simple

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 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: la fabrication des modules (plus de la moitié de l'énergie consommée sur le cycle de vie), les autres équipements, le transport, l'installation, et son démantèlement en fin de vie. Sa valeur 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 1.2 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'un an ou moins [2].



Source: Photovoltaics Report, Fraunhofer ISE, 27/07/2021

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 initialement. En France, il est estimé à 30 [1]. Ce calcul, comme le temps de retour énergétique, est calculé 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].

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] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE with support of PSE Projects GmbH, Photovoltaics Report, Report, 27 July 2021

[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 ?

Pour faire simple

La durée de vie d'une installation est estimée à 30 ans [1], avec une perte d'efficacité de l'ordre de 0,5 %/an [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 [2,3].

Pour aller plus loin

L'Agence Internationale de l'Energie (IEA) définit la durée de vie d'un panneau PV par le temps au bout duquel son rendement a été réduit de 20 % [2]. La perte de performance d'un module PV au cours du temps est un phénomène connu lié à la dégradation de certains composants du module, dont 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 [4]. Les principales sources de dégradation des modules PV sont la **corrosion** des connexions métalliques, 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** et le **PID** (potential-induced degradation) [4].

Bien qu'annoncée à 25 ou 30 ans par les fabricants, la durée de vie réelle des panneaux PV **peut dépasser largement celle garantie par les fabricants**. Des études ont même montré que les panneaux se dégradent moins vite que prévu : 60 % des modules étudiés dans [5,6] ont une efficacité supérieure à 80% de leur efficacité initiale après 35 ans d'exploitation (climat tempéré, 288 modules, installation en 1982), soit une dégradation de 0,2 % par an pour ces modules. L'IEA a aussi modélisé la dégradation des panneaux PV et arrive à la même conclusion [2].

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 10 ans.

Sources

1. V. Fthenakis and E. Leccisi, Prog. in Photovoltaics, 2021. <https://doi.org/10.1002/pip.3441>
2. PVPS Task, "Service Life Estimation for Photovoltaic Modules Task 13 Performance, Operation and Reliability of Photovoltaic Systems," Accessed: Jan. 10, 2022. [Online]. Available: www.iea-pvps.org.
3. D. C. Jordan, S. R. Kurtz, K. Vansant, and J. Newmiller,, 2016, doi: 10.1002/pip.2744.
4. A. Ndiaye, "Étude de la dégradation et de la fiabilité des modules PV- Impact de la poussière sur les caractéristiques électriques de performance. ", 2013. [Link](#)
5. A. Virtuani et al., *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 27, no. 4, pp. 328–339, Apr. 2019, doi: 10.1002/pip.3104.
6. E. Annigoni et al., *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 27, no. 9, pp. 760–778, June. 2019, doi: 10.1002/pip.3146.

Photovoltaïque, environnement et société





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

Pour faire simple

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 collectes 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 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 %). 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 difficile 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.

Il n'est donc pas aujourd'hui possible de fabriquer un nouveau panneau solaire à partir d'un panneau en fin de vie. C'est en revanche une voie explorée en laboratoire [6]. Des recherches visent également 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.

Si des méthodes de valorisation existent déjà, la filière prendra une tout autre envergure dans les années à venir : les modules ont des durées de vie d'au moins 25 ans, tandis que la quasi-totalité des installations actuelles ont été réalisées après 2010 en France.

Pour approfondir cette problématique au-delà de la question du recyclage, nous conseillons la lecture du rapport de l'ADEME publié en 2021 et intitulé : "Comment mener la filière photovoltaïque vers l'excellence environnementale ?" [7].

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 [Cabriiss](#), 2015-2018
6. <https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2022/solar-cells-from-recycled-silicon.html>
7. Rapport de l'ADEME "Comment mener la filière photovoltaïque vers l'excellence environnementale ?", 2021. [\[Lien\]](#)



10 - QUELLES SONT LES ÉMISSIONS DE CO₂ D'UN SYSTÈME PV ?

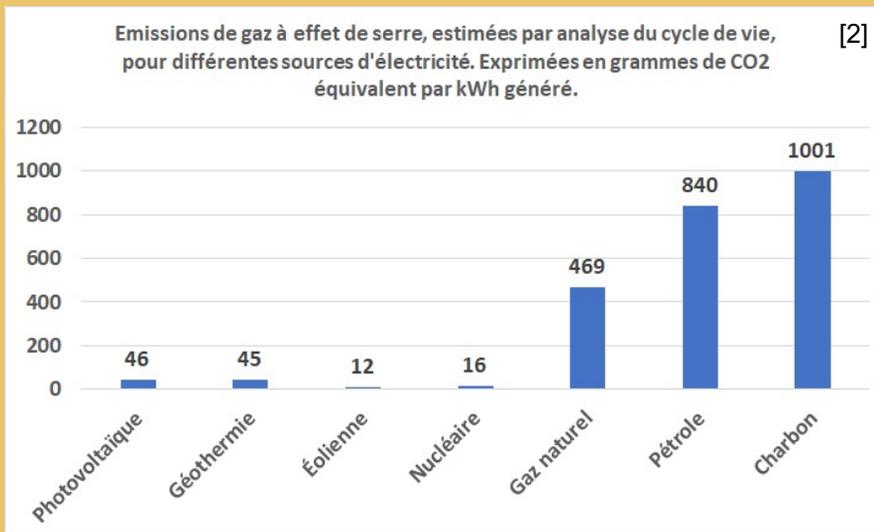
Pour faire simple

Une installation PV sur toiture à base de panneaux en silicium monocristallin émet en moyenne 30 gCO₂eq/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 ~30 gCO₂eq/kWh selon les études les plus récentes [1] (46 gCO₂eq/kWh selon [2]), soit environ 25 fois moins que les centrales fonctionnant au pétrole (de l'ordre de ~800 gCO₂eq/kWh [2]).

Ces émissions sont majoritairement dues au procédé de fabrication [2], et notamment à la phase de raffinement du silicium, qui est chauffé à plus de 1500°C pendant environ 36h [3]. Le bilan carbone des installations PV sera progressivement amélioré par l'augmentation de la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique alimentant les usines.



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. INCER-ACV [incer-acv-2021-rapport.pdf](https://www.ademe.fr/energies-renouvelables/photovoltaic/incer-acv-2021-rapport.pdf) (ademe.fr)
3. Tawalbeh et al. *Science of the Total Environment*, 759 (2021) doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143528
4. Woodhouse et al., NREL Technical Report (TP-6A20-72134), 2019



11 - LES MODULES PV UTILISENT-ILS DES MATÉRIAUX RARES ?

Pour faire simple

Les modules PV ne contiennent pas de *terres rares*. Seuls quelques métaux utilisés dont les ressources sont limitées (argent, indium) nécessiteront une adaptation des technologies industrielles à long terme, mais **la rareté des matériaux n'est pas un verrou pour le déploiement du photovoltaïque à grande échelle.**

Pour aller plus loin

Les terres rares constituent un ensemble d'éléments du tableau périodique qui ne sont pas tous... rares [1] ! Quoi qu'il en soit, aucun de ces éléments n'est utilisé dans les technologies photovoltaïques actuelles.

Les modules PV utilisent-ils d'autres éléments critiques, c'est-à-dire dont la disponibilité peut poser problème ?

Les modules en silicium (96% du marché en 2021) utilisent actuellement deux métaux disponibles en quantité limitée : l'argent (Ag) et l'indium (In). Le bismuth (Bi) est également envisagé pour remplacer le plomb (Pb) dans les contacts (soudures). Des solutions technologiques existent pour limiter voire éviter l'usage de ces éléments, afin de permettre un développement industriel du photovoltaïque à l'échelle de plusieurs TW par an [2]. Les contraintes imposées par les ressources disponibles pour ces métaux vont donc obliger l'industrie à adapter ses technologies, mais aucun verrou n'est attendu.

Pour ce qui est du silicium utilisé pour la fabrication, sa quantité a diminué de 16 g/W en 2004 à 3 g/W en 2020 [3].

Les technologies couches minces actuellement sur le marché (moins de 4 % en 2021) reposent sur l'utilisation de plusieurs métaux rares [4] : 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 [5,6], voire à l'échelle du TW avec de nouvelles ruptures technologiques [6].

En conclusion, le développement du solaire photovoltaïque n'est pas limité par la disponibilité des ressources en matériaux.

Sources

1. Terres rares, énergies renouvelables et stockage d'énergie, fiche technique de l'ADEME. [\[Lien\]](#)
2. Energy Environ. Sci., 2021, 14, 5587. [\[Lien\]](#)
3. Photovoltaics Report, Fraunhofer ISE, 27/07/2021. [\[Lien\]](#)
4. The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions, IEA, World Energy Outlook Special Report, mai 2021. [\[Lien\]](#)
5. V. Fthenakis et al., Sustainability evaluation of CdTe PV: An update, Renewable and Sustainable Energy Reviews 123, 109776 (2020). [\[Lien\]](#)
6. Indium Availability for CIGS thin-film solar cells (2021). [\[Lien\]](#)



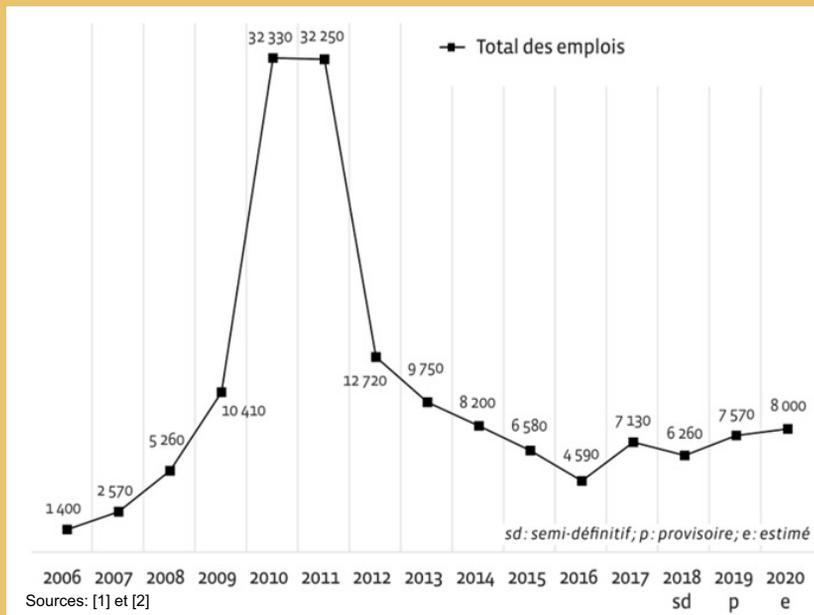
12 - QUEL EST L'IMPACT DE LA FILIÈRE PV SUR L'EMPLOI EN FRANCE ?

Pour faire simple

La filière solaire photovoltaïque française représente environ **8000 emplois** (équivalent temps plein) en 2020, en hausse de 5,6 % par rapport à 2019.

Pour aller plus loin

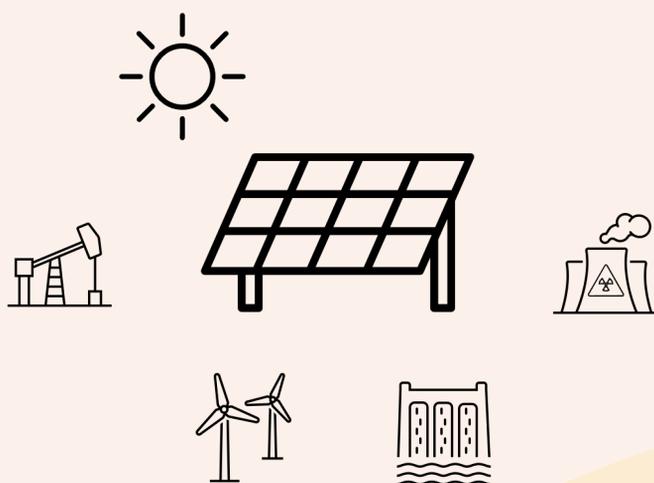
On estime que la filière photovoltaïque représentait 8000 emplois en 2020 (en équivalent temps plein) [1, 2]. On peut voir sur la figure ci-dessous qu'un pic d'activité a eu lieu en 2010-2011, porté par les installations individuelles et les tarifs d'achats. Ceux-ci ont ensuite fortement diminué, suivi 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 concernent l'installation des systèmes photovoltaïques, suivi de l'exploitation et la vente de l'énergie, puis de la fabrication des équipements.



Sources

1. Le Baromètre 2021 des énergies renouvelables électriques en France. [\[Lien\]](#)
2. Marchés et emplois concourant à la transition énergétique dans le secteur des énergies renouvelables et de récupération, rapport de l'ADEME, juillet 2021. [\[Lien\]](#)

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





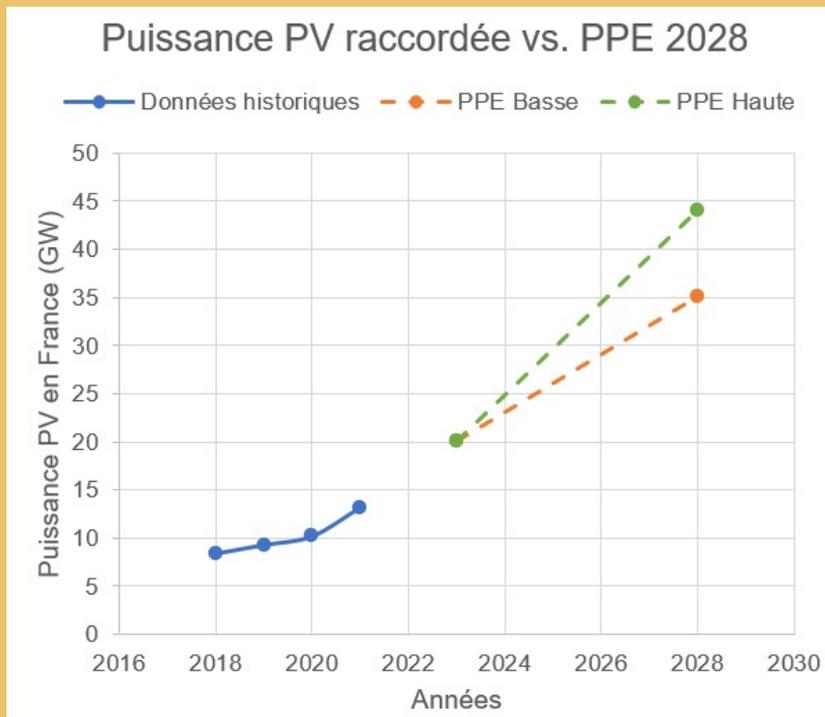
13 - OÙ EN EST LE DÉVELOPPEMENT DU SOLAIRE PV PAR RAPPORT AUX OBJECTIFS DE LA PPE ?

Pour faire simple

La programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) prévoit 20 GW installés en 2023 et entre 35 et 44 GW en 2028 [1]. En décembre 2021, 13,2 GW étaient raccordés [2], soit 66 % de l'objectif 2023.

Pour aller plus loin

La Programmation Pluriannuelle de l'Energie (PPE) est un outil de pilotage dont s'est doté la France avec l'objectif de réduire nos émissions de CO₂. 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.



Sources

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/publicationweb/412>



14 - QUELLE EST LA CAPACITÉ DE SOLAIRE PV PRÉVUE PAR LES DIFFÉRENTS SCÉNARIOS ?

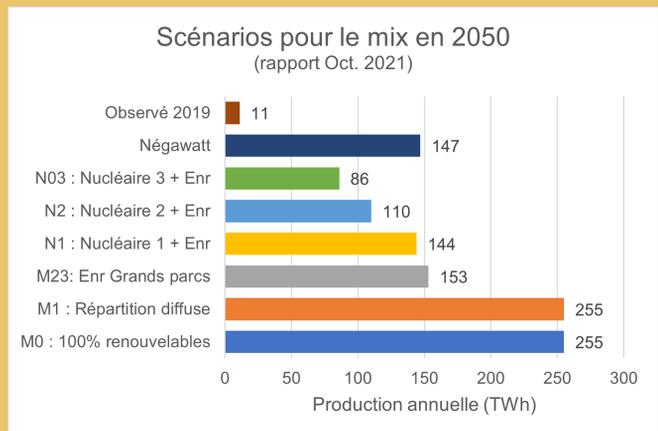
Pour faire simple

Les six scénarios de RTE pour le futur mix énergétique prévoient une augmentation importante de la place du solaire PV d'ici 2050. Dans tous les cas, la puissance du parc PV devrait être 7 à 20 fois supérieure en 2050 par rapport à aujourd'hui. Selon la majorité des scénarios, l'énergie solaire PV produite serait comprise entre 150 et 250 TWh par an.

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 +60 % de plus qu'en 2020) liée à une électrification importante des usages. La production électrique est envisagée soit de manière intégralement renouvelable, ou par des mix diversifiés impliquant la construction de nouvelles centrales nucléaires. Dans tous les cas, la production et la puissance installées du solaire PV devraient être multipliées par 7 à 20.

Une production solaire PV annuelle d'environ 250 TWh est anticipée pour les scénarios 100 % renouvelables de RTE, alors que les mix nucléaire + renouvelables supposent une production solaire PV de l'ordre de 150 TWh, du même ordre que le scénario Negawatt [3].



Les scénarios 100 % renouvelables proposent le photovoltaïque comme première source d'électricité avec 36 % de la production. Différents types de production solaire sont à distinguer. 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.

Sources

1. [Futurs-Energetiques-2050-principaux-resultats.pdf \(rte-france.com\)](#)
2. [BP2050 rapport-complet chapitre5 scenarios-mix-production-consommation 1.pdf \(rte-france.com\)](#)
3. Scénario négaWatt 2022. <https://negawatt.org/>



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

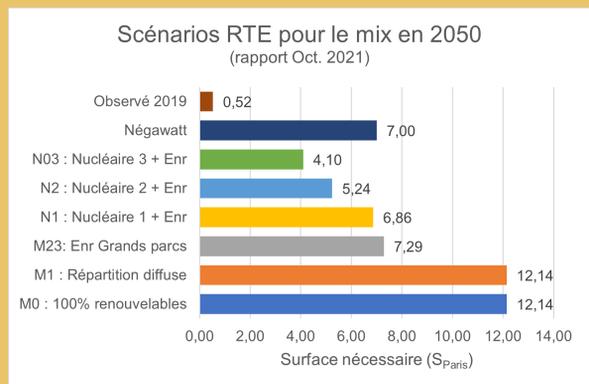
Pour faire simple

Les surfaces nécessaires pour le solaire PV sont très dépendantes du scénario considéré, et se situent entre 400 et 1200 km², soit une surface **très inférieure aux surfaces déjà artificialisées**.

Pour aller plus loin

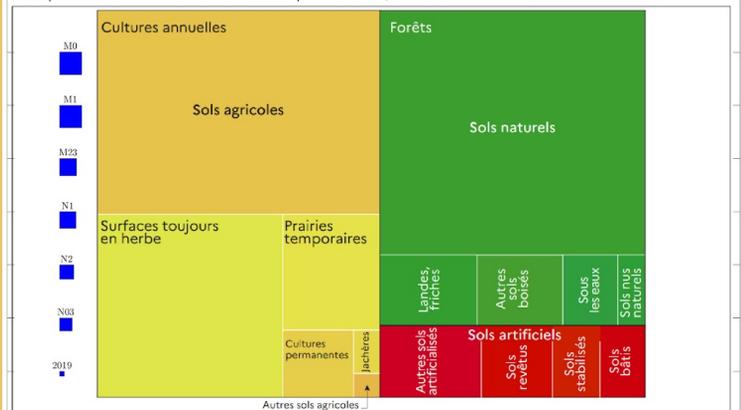
Nous pouvons comparer les surfaces de panneaux PV nécessaires à la surface de Paris intra-muros (105 km²), dans les différents scénarios (figure de droite). Dans la figure ci-dessous, la surface de solaire PV nécessaire (carrés bleus à gauche) est comparée aux différents types de surfaces en France métropolitaine (rectangles colorés). Pour ces calculs, les productions annuelles estimées dans les scénarios sont divisées par une irradiation annuelle moyenne (1000 kWh/m²) et multipliées par une efficacité de 20 %.

Même dans les scénarios incluant le plus de PV (M0 et M1), la surface nécessaire à la production PV est équivalente à 12 fois la surface de Paris, soit 0,2 % de la surface de la France métropolitaine, et moins de 3 % des surfaces déjà artificialisée (voir la fiche n°16).



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

Sources

1. [BP2050 rapport-complet chapitre5 scenarios-mix-production-consommation 1.pdf \(rte-france.com\)](#)
2. [Dossiers 2021-3 TERUTI.pdf \(agriculture.gouv.fr\)](#)



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

Pour faire simple

Oui ! Un potentiel de production solaire PV de 200 TWh/an est déjà identifié en utilisant des technologies commerciales 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 2021, scénarios N1 et M23 RTE 2021) et 250 TWh (scénarios M0 et M1 RTE 2021). Plus de détails sur la fiche n°14.

Un potentiel actuel de l'ordre de 200 TWh:

- Un potentiel de toiture d'au moins 125 TWh (fiche n°17).
- Un potentiel en friches industrielles ou ombrières de parking de 69 TWh (fiche n°18).
- 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°19 et 20)

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 et 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 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].

Sources

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", page 27. <https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/2984-alleger-l-empreinte-environnementale-de-la-consommation-des-francais-en-2030-synthese.htm>
2. Rapport Agreste 2021 "L'occupation du sol entre 1982 et 2018" [Dossiers 2021-3 TERUTI.pdf](#) (agriculture.gouv.fr)



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

Pour faire simple

La France a le plus fort potentiel économiquement intéressant de production PV en toiture en Europe, avec environ 90 TWh/an à un coût inférieur à 0,12 €/kWh (LCOE), et 125 TWh pour un coût allant jusqu'à 0,15 €/kWh [1].

Pour aller plus loin

Ces chiffres sont potentiellement sous-estimés. Ils sont obtenus avec une surface de toiture estimée par imagerie satellite à 1346 km² [1], alors que l'ADEME évalue la surface totale de toitures à 2276 km² en utilisant une base de données de l'IGN [2].

Remarques :

1. Ces chiffres ne comprennent pas le PV en façade, les ombrières de parking, l'agri-photovoltaïque, les centrales au sol dans des zones inexploitablees comme les anciennes carrières, installations militaires, le PV flottant,...
2. Cette étude [1] est basée sur l'analyse d'images satellites à l'échelle européenne.
3. Une étude antérieure de l'ADEME publiée en 2016 [2] évalue les gisements PV en surface, capacité installable et énergie produite à (1507 km², 241 GW, 265 TWh/an) pour les toitures résidentielles et (769 km², 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.
4. Une étude plus récente publiée en octobre 2021 évalue la surface de toitures à 3938 km², et retient le chiffre de 1181 km² pour l'estimation du potentiel PV [3].

Un petit calcul facile à faire :

Pour obtenir une énergie PV de 125 TWh/an, il faut une surface de 625 km² (irradiation moyenne de 1 MWh/m²/an, rendement de 20 %), ce qui correspond à peu près à la moitié des 1346 km² de toiture disponible estimée en France [1].

Sources

1. Bódis, K.; Kougias, I.; Jäger-Waldau, A.; Taylor, N. & Szabó, S., A high-resolution geospatial assessment of the rooftop solar photovoltaic potential in the European Union, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 114, 109309 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109309>
2. <https://librairie.ademe.fr/recherche-et-innovation/2881-mix-electrique-100-renouvelable-analyses-et-optimisations.html>, voir le document "annexe_eolienpv.pdf", page 36/51.
3. Joshi, S.; Mittal, S.; Holloway, P.; Shukla, P. R.; Gallachóir, B. Ó. & Glynn, J., High resolution global spatiotemporal assessment of rooftop solar photovoltaics potential for renewable electricity generation, *Nature Communications* 12, 5738 (2021). Voir la Supplementary Table 7 <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25720-2>



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

Pour faire simple

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 [1,2], 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.

Sources

1. <https://presse.ademe.fr/2019/05/etude-limportant-potentiel-des-friches-et-des-parkings-pour-developper-lenergie-photovoltaique.html>
2. <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>



19 - QUEL EST LE POTENTIEL POUR DE NOUVEAUX TYPES DE PV SOLAIRE EN FRANCE ? LES PANNEAUX VERTICAUX.

Pour faire simple

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].

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 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.

Avantages :

- La production de panneaux installés verticalement est mieux répartie durant la journée et pendant l'année, avec une production plus forte lorsque le soleil est bas sur l'horizon (début et fin de journée, hiver), a priori mieux adaptée aux besoins.
- Il n'y a pas de conflit d'usage du foncier.

A noter : Le calcul de la production PV sur les façades des bâtiments en ville est complexe (impact de l'environnement comme les îlots de chaleur et les réflexions sur les bâtiments voisins) et fait actuellement l'objet de recherches académiques. Il n'est donc pas encore possible d'estimer précisément le gisement solaire en façade.

Sources

1. https://tecsol.blogspot.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



20 - QUEL EST LE POTENTIEL POUR DE NOUVEAUX TYPES DE PV SOLAIRE EN FRANCE ? L'AGRIVOLTAÏSME.

Pour faire simple

L'**agrivoltaïsme** consiste à concilier l'installation de panneaux photovoltaïques avec des pratiques agricoles (élevage, serres).

Pour aller plus loin

L'**agrivoltaïsme** est à l'étude, avec des retours d'expériences contrastés [1,2]. C'est une pratique dont le développement est encore récent.

On peut citer un exemple intéressant et potentiellement prometteur [2] : une étude de l'INRAE est en cours sur une centrale au sol combinée à un élevage bovin. Les résultats préliminaires semblent montrer les bénéfices de l'installation de panneaux photovoltaïques pour le pâturage. Sous les panneaux, une meilleure pousse de l'herbe est observée, notamment en période de sécheresse, associée à une plus grande humidité du sol. La productivité annuelle en biomasse semble préservée par rapport à la même surface de pâturage sans panneau, avec un étalement de la production sur l'année.

Ces résultats dépendent certainement de la région et du climat, et ne sont donc pas forcément généralisables.

A noter : l'organisme de certification AFNOR a publié un Label Projet Agrivoltaïque sur culture en décembre 2021, offrant un gage de qualité et de transparence des projets, et une évaluation en amont (phase de conception) et tout au long du cycle de vie des projets agrivoltaïques [3].

Sources

1. https://www.6play.fr/dossier-tabou-p_6188
2. <https://www.jpee.fr/agrivoltaisme-premiers-resultats-encourageants-pour-letude-menee-par-inrae-jpee-et-photosol-sur-lagrivoltaisme/>
3. Label Projet agrivoltaïque, AFNOR Certification, version 1.1, décembre 2021. <https://telechargement-afnor.org/certification-referentiel-label-projet-agrivoltaique>

Démêlons le vrai du faux

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





«Il faut dépenser plus de CO₂ pour faire le panneau [photovoltaïque] que pour faire la centrale nucléaire.» Entendu dans [1]

En réalité...

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. **Le PV et le nucléaire génèrent des émissions du même ordre de grandeur (10-40 gCO₂eq/kWh)**, largement inférieures à celles des centrales à gaz, charbon ou fioul (500-1000 gCO₂eq/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 gCO₂eq/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 231 gCO₂eq/kWh en 2020 [7].

D'autres estimations sont même inférieures à 10 gCO₂eq/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 [5].

Technologie	Emissions (gCO ₂ eq/kWh)	Source
Photovoltaïque (Si cristallin)		
Mix électrique chinois	43.9	[4]
Mix électrique européen	32.3	
Mix électrique français	25.2	
Eolien (moy. terrestre et en mer)	15	[2]
Hydroélectrique	6	[2]
Centrale Nucléaire		
France	7	[2]
Monde	12	[5]
Centrale à gaz	500	[2]
Centrale à charbon	1100	
Centrale fioul-vapeur	930	

Sources

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 [\[Lien\]](#)
3. Woodhouse et al., "Crystalline Silicon Photovoltaic Module Manufacturing Costs and Sustainable Pricing", NREL report. [\[Lien\]](#)
4. INCER-ACV [incer-acv-2021-rapport.pdf \(ademe.fr\)](#)
5. GIEC AR5, annexe III [ipcc_wg3_ar5_annex-iii.pdf](#)
6. 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). <https://doi.org/10.1038/s41560-017-0032-9>
7. European Environment Agency, Greenhouse gas emission intensity of electricity generation by country. [\[Lien\]](#)



«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]



«Energie 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 réalité...

Oui, l'énergie solaire est diffuse, et c'est un atout : l'énergie solaire est abondante, disponible partout, sans le danger que constitue toute source d'énergie concentrée. **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 fiches n°16 à 18). **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 augmenter de manière significative l'artificialisation des sols.** Les surfaces déjà artificialisées (toitures, façades, friches industrielles, parkings,...) et les usages mixtes (agrivoltaïsme, photovoltaïque flottant,...) doivent fournir une ressource suffisante. Voir fiches n°16, 17 et 18.
- **Non, il ne faut pas 1000 fois plus de surface pour le photovoltaïque que pour nucléaire, mais 100 fois plus** (calcul ci-dessous), et de toutes façons **ça n'est pas un problème** puisque ces surfaces sont disponibles !

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/m²/an d'électricité d'origine solaire (3 MWh par an avec une surface de toit de 20 m²), ou 0,15 TWh/km²/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 km², soit 16,6 TWh/km²/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 km², soit 24 TWh/km²/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-acceler-la-transition-energetique>
2. BLAIN Christophe et JANCOVICI Jean-Marc, Le Monde Sans Fin, Dargaud, 2021



« 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]



« 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]



« 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 réalité...

S'il est exact que la production photovoltaïque ne contribue pas spontanément à la stabilité du réseau comme peuvent le faire des productions thermiques, **“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 déployés pour assurer la stabilité du réseau sans impact économique majeur.

Pour aller plus loin

Extraits adaptés de [4].

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.

Sources

1. Sébastien Candell et Marc Fontecave, tribune parue dans Le Monde le 4 mars 2021. [Lien](#)
2. Note N°4 du Haut-Commissariat au Plan datée du 23 mars 2021, intitulée : Électricité : le devoir de lucidité. [Lien](#)
3. Lettre ouverte du SER, 31 mars 2021. [Lien](#)
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. [Lien](#)
5. Futurs Énergétiques 2050, chapitre 7 (Garantir la sécurité d'approvisionnement), RTE, 2021. [Lien](#)



«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 réalité...

Pour la prochaine décennie, les infrastructures actuelles constituent un bon 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^e 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.

Sources

1. Sébastien Candé et Marc Fontecave, tribune parue dans Le Monde le 4 mars 2021. [Lien](#)
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>



[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 réalité...

Non, le silicium n'est pas un matériau critique, au contraire c'est l'un des éléments les plus abondants sur Terre. **Non**, il n'y a pas de risque de difficulté d'approvisionnement pour la fabrication de cellules solaires en silicium. Il est néanmoins **vrai** que l'on ne sait pas encore valoriser le silicium lors du recyclage des modules PV.

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 des quartz). Il n'existe à ce jour pas d'estimation fiable des stocks actuellement exploitables, mais aucune limitation n'a été identifiée. Notons également que les capacités de raffinage ne sont pas limitées aujourd'hui, puisqu'elles sont environ 2 fois plus importantes que la production mondiale annuelle. Si le silicium est parfois décrit comme un "matériau critique", c'est parce que la Chine produit plus de 70 % du silicium mondial, ce qui peut être perçu comme une menace pour certains marchés [4].

Dans son livre à succès "La guerre des métaux rares" paru en janvier 2018, Guillaume Pitron écrit: "*Or les métaux rares permettent précisément de produire une électricité propre : ils font tourner les rotors de certaines éoliennes et transforment les rayons du soleil en courant par le biais des panneaux photovoltaïques.*" [2]. Néanmoins, il ajoute la note suivante dans l'édition de poche parue en octobre 2019 : "*C'est plus particulièrement le cas pour les panneaux solaires fabriqués à partir de CIGS (cuivre, indium, gallium et sélénium).*" [3] Dont acte, cette précision était nécessaire, et même dans le cas du CIGS la situation n'est pas considérée comme critique (voir fiche n°11).

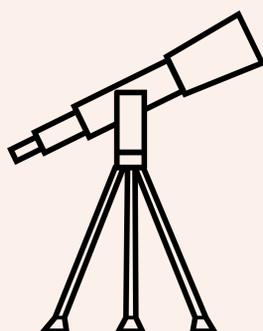
On retiendra que le développement du solaire photovoltaïque n'est pas contraint par l'approvisionnement de matériaux rares.

Voir aussi la fiche sur le recyclage (n°9) et les matériaux critiques (n°11).

Sources

1. Sciences et Vie N° 1253, Février 2022. Dossier "Déchets énergétiques. L'autre péril écologique".
2. "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. [\[Lien\]](#)
3. "La guerre des métaux rares. La face cachée de la transition énergétique et numérique." Guillaume Pitron, édition Les liens qui libèrent, édition de poche, 310 pages, date de parution : 09/10/2019. [\[Lien\]](#)
4. Le portail français des ressources minérales.
<https://www.mineralinfo.fr/fr/ecomine/silicium-un-element-chimique-tres-abondant-un-affinage-strategique>

Pour voir plus loin...





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

Pour faire simple

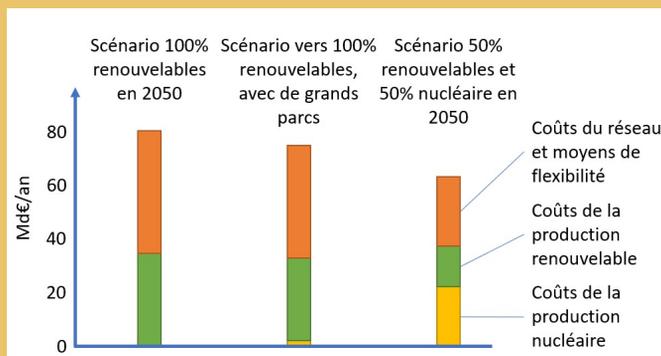
L'intégration massive d'énergies renouvelables nécessitera de nouveaux moyens de flexibilité. D'ici 2035, on estime que les outils existants ou déjà prévus seront suffisants. Au-delà, de nouvelles installations seront nécessaires et engendreront un surcoût. Celui-ci peut être estimé en développant des 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 génèreront 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 à l'horizon 2050 dans différents scénarios [2]. Ce coût complet est estimé à 80 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 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
2. RTE, FUTURS ÉNERGÉTIQUES 2050, 10/2021



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

Pour faire simple

L'hydrogène est identifié comme un potentiel moyen de stockage de l'électricité renouvelable excédentaire. **Pour produire de l'hydrogène par électrolyse, est-il plus intéressant économiquement d'installer des centrales nucléaires ou solaires photovoltaïques ?**

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.

Solaire PV pour la production d'H₂ par électrolyse

Avantage : c'est moins cher, les nouvelles centrales au sol permettent de produire l'électricité à un coût de l'ordre de 50 €/kWh, 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. Un cycle combiné peut potentiellement utiliser la chaleur de la centrale (actuellement perdue) 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 (voir fiche N°10). Pour les futurs réacteurs d'Hinkley Point au Royaume-Uni, un prix de l'électricité de 92,5 £ par MWh (106 €/MWh 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
2. 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.

Glossaire

Énergie décarbonée : Une ressource est “décarbonée” si elle fournit de l’énergie sans émission de CO₂. 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/m² 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/m²) et d’orientation (incidence normale). En anglais, on parle de “watt peak”, abrégé en “Wp”.

Acronymes

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 "Énergies 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°13).

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

gCO₂eq/kWh : gramme de CO₂ 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

Ce document est issu 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.

L'équipe de l'*Atelier SolairePV* remercie Daniel Lincot pour avoir inspiré ce travail, ainsi que ses très nombreux relecteurs.

Version du 07/03/2022.

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

<http://solairepv.fr>.

Contact : 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 07/03/2022, disponible sur : <http://solairepv.fr/>

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](#)).

