



Renouvelables



Les panneaux photovoltaïques sont-ils recyclables ?

Les éoliennes et les panneaux solaires ne rejettent pas de polluants en phase de fonctionnement. Il importe néanmoins que ces filières génèrent le moins possible de déchets sur l'ensemble de leur cycle de vie, et tout particulièrement en fin de vie. Certains composants sont régulièrement accusés de ne pas être recyclables. Qu'en est-il exactement ? Quels matériaux les composent et comment les industriels peuvent-ils les recycler et les récupérer ? Cet article apporte des éléments de réponse sur les éoliennes, quand un second traite des éoliennes.



Publié le 10 février 2021
Modifié le 20 mars 2023

Cet article apporte des éléments de réponse sur la filière photovoltaïque, [quand un second traite des éoliennes](#).

En quelques mots

La très grande majorité des matériaux composant les panneaux photovoltaïques – dont la durée de vie est d'au moins 30 ans – est recyclable. **Plus de 90 % de la masse des panneaux (verre, plastiques et aluminium) sont recyclés dans les filières industrielles existantes.** Les composants comme le silicium ou des métaux en bien plus faibles quantités (argent, cuivre, et autres complexes semi-conducteurs) sont, eux aussi, récupérables et recyclables. Certains pourront être réutilisés pour fabriquer de nouveaux panneaux photovoltaïques.

Malgré le peu d'équipements aujourd'hui en fin de vie, le recyclage des panneaux solaires est déjà opérationnel : les constructeurs ont d'ailleurs l'obligation de récupérer les panneaux usagés et de mettre en place une filière de recyclage. **Le développement et le renforcement de la filière de recyclage sont nécessaires afin d'être en capacité de traiter les volumes à venir.**

Dans cet article, nous nous intéressons spécifiquement au recyclage des panneaux photovoltaïques, hors équipements annexes (onduleurs, supports, raccordement électrique). Cette question du recyclage mérite l'attention, puisque si peu d'installations ont aujourd'hui atteint leur limite d'âge, le volume de modules photovoltaïques en fonctionnement commence à être conséquent (9 500 MW installés en France en 2019¹) et le sera encore plus à l'avenir.

Avant d'être recyclé, un panneau photovoltaïque peut être utilisé pendant au moins 30 ans

Au fur et à mesure qu'il vieillit, essentiellement par usure liée aux intempéries, un panneau solaire photovoltaïque perd progressivement une part de sa capacité à produire de l'électricité. Aujourd'hui, la plupart des fabricants garantissent que leurs panneaux perdront au plus 20 % d'efficacité après 25 ans d'utilisation². En réalité, il apparaît que les panneaux photovoltaïques sont plus résistants que la garantie donnée par les fabricants. Une étude, réalisée sur les premiers panneaux installés en France en 1992, a montré qu'après 20 ans ils fournissaient encore plus de 91 % de leur puissance initiale³ ! L'installation ne doit pas être démontée pour autant après 25 ans, puisqu'elle reste encore en mesure de produire au moins 80 % de sa puissance de départ. La fin de vie est à l'appréciation du producteur d'électricité : en fonction du niveau minimum de production requis et des contraintes économiques, celui-ci peut juger nécessaire de remplacer les anciens panneaux par des nouveaux plus performants. Dans ce cas, notons que les panneaux démontés peuvent être réutilisés ailleurs et avoir ainsi une seconde vie sur d'autres installations pour lesquelles les contraintes de rendement sont moins fortes.

Quel volume de panneaux devrons-nous recycler d'ici 2050 ?

Pour évaluer les volumes de panneaux en fin de vie (voir graphique ci-après), l'Agence internationale des énergies renouvelables (IRENA) a construit des projections de développement de la filière solaire photovoltaïque dans le monde jusqu'en 2050. Ces projections s'appuient sur les résultats de travaux antérieurs réalisés par l'IRENA et l'Agence Internationale de l'Energie (AIE). Elles prévoient au niveau mondial 1 632 GW de puissance installée cumulée



en 2030 et 4 512 GW en 2050 (pour 627 GW de puissance installée cumulée dans le monde en 2019⁴). Les volumes de panneaux en fin de vie sont estimés sur la base de ces projections et suivant deux scénarios : le premier suppose des pertes de puissance des panneaux « normales » alors que le second suit l'hypothèse de pertes plus précoces en raison de problèmes d'installations, de défauts techniques, etc.

En France

Avec 9 435 MW photovoltaïques installés en France fin 2019¹, ce sont environ 850 000 tonnes de panneaux⁵ qui devront être recyclés dans les 15 à 30 ans à venir. Ce marché du recyclage devrait augmenter puisque l'objectif de la France est de porter la puissance installée à 20 100 MW fin 2023⁶. Selon les estimations de l'IRENA, le volume cumulé de panneaux solaires à traiter en 2030 sera compris entre 45 000 tonnes (scénario avec pertes de puissance « normales ») et 200 000 tonnes (scénario avec pertes de puissance précoces). PV Cycle, l'éco-organisme chargé d'organiser la collecte et le traitement des panneaux photovoltaïques usagés en France, estime quant à lui que 151 000 tonnes de panneaux photovoltaïques auront atteint leur fin de vie utile d'ici 2030⁷. Pour fonder son estimation, l'organisme se base sur les chiffres les plus récents (2019) de mises sur le marché et des puissances raccordées au réseau électrique chaque année en France.

Le photovoltaïque se recycle ! – Source : PV CYCLE France – www.pvcycle.fr
Licence CC BY-NC-ND 3.0

Dans le monde

Le volume cumulé de panneaux en fin de vie dans le monde était estimé fin 2016 entre 43 500 et 250 000 tonnes. Cela représente 0,1 % à 0,6 % du volume de panneaux photovoltaïques installés⁸. En prenant une durée de vie moyenne de 30 ans, le volume cumulé de panneaux à recycler commencera à être important à partir de 2030, où il représentera environ 35 fois le volume de 2016. En 2050, il pourrait dépasser les 60 millions de tonnes, dont plus de la moitié en Chine, aux États-Unis, au Japon et en Inde. À titre de comparaison, le volume de déchets électriques et électroniques pour la seule année 2014 était de près de 42 millions de tonnes dans le monde. Assurer le recyclage des panneaux photovoltaïques s'avère donc crucial dès aujourd'hui, avec un enjeu de taille quant au futur changement d'échelle industrielle.

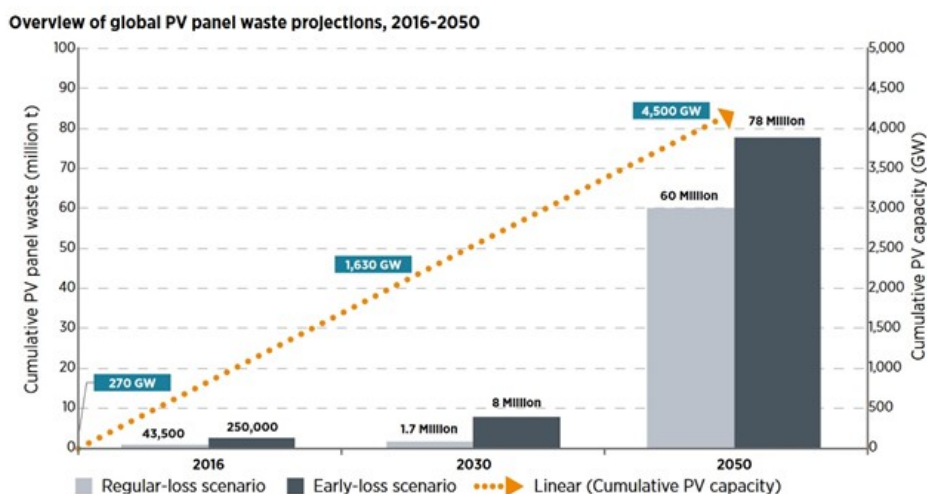


Figure 1 : Évolution possible des quantités cumulées de déchets issus des panneaux photovoltaïques dans le monde – Source : IRENA

Traduction de la légende :

- Axe des ordonnées (à gauche) : Déchets cumulés des panneaux PV (million de tonnes / barres grises)
- Axe des ordonnées (à droite) : Capacités cumulées en photovoltaïque (GW, courbe en pointillé)

Démantèlement des installations photovoltaïques

Les installations très dégradées ou hors d'usage doivent être démantelées et les matériels qui les composent collectés.



Panneaux photovoltaïques en fin de vie – Source : PV CYCLE France – www.pvcycle.fr
Licence CC BY-NC-ND 3.0

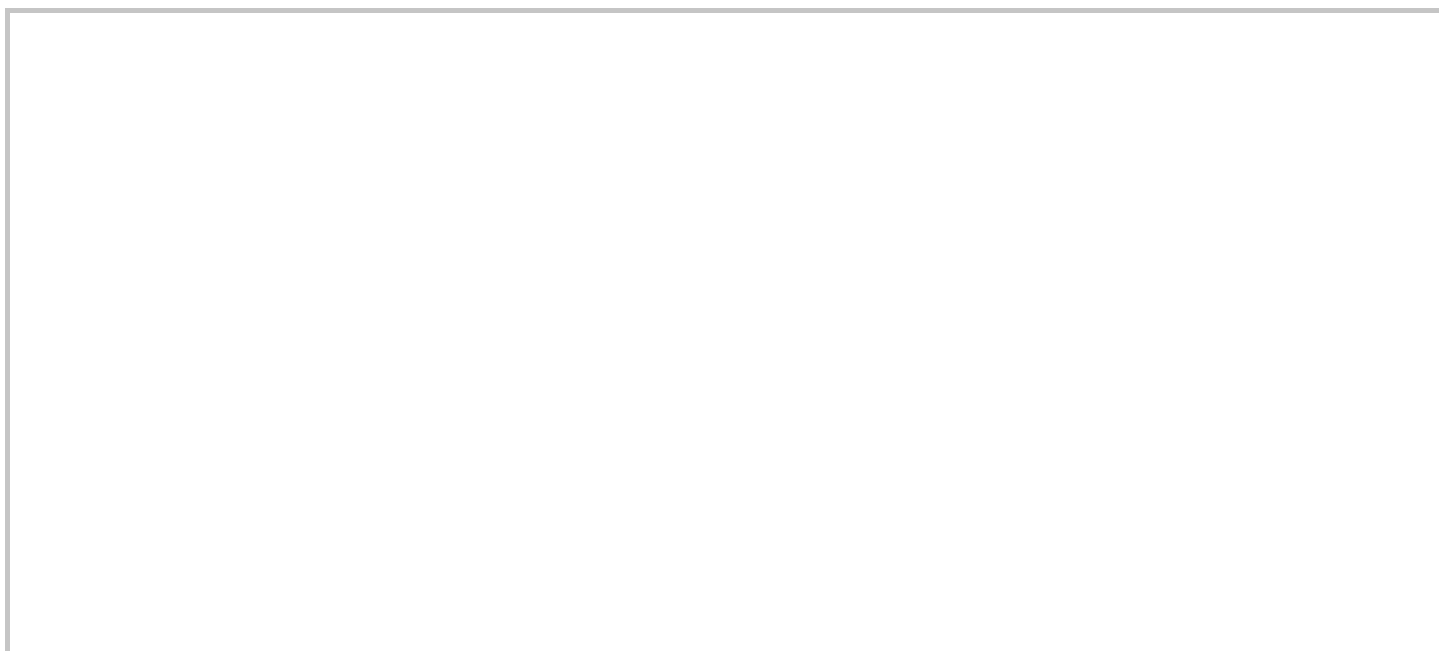
Le démantèlement d'une installation photovoltaïque consiste à déposer tous les éléments constitutifs du système, depuis les modules jusqu'aux câbles électriques en passant par les structures support. Une installation peut être démontée soit en totalité pour tri et recyclage, soit partiellement.

Les opérations de collecte sont d'ordre logistique. Couvertes par la directive européenne relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE)⁹, elles sont à la charge des fabricants des panneaux photovoltaïques. En France, ces fabricants ont une obligation de collecte et de traitement imposée par un décret du 19 août 2014¹⁰. PV CYCLE France est l'éco-organisme à but non lucratif agréé par les pouvoirs publics pour organiser la collecte et le traitement des panneaux photovoltaïques usagés¹¹.

Récupération des matériaux composant les panneaux photovoltaïques

Les panneaux photovoltaïques font l'objet de différents traitements afin de séparer tous les éléments qui les composent (câbles, boîtes de jonction, cadres métalliques, verre, composés métalliques, etc.) et en récupérer un maximum pour recyclage.

Que leur technologie repose sur du silicium cristallin ou sur des « couches minces », les panneaux sont majoritairement constitués de verre (voir encadré), une matière première pouvant être intégralement recyclée¹².



Deux grandes familles de modules photovoltaïques

Le marché du solaire photovoltaïque se partage en deux grandes catégories : les technologies à base de silicium cristallin (silicium monocristallin, polycristallin ou amorphe), qui sont de loin les plus utilisées aujourd'hui (plus de 95 % en 2017, cf. graphique ci-dessous), et les technologies dites « couches minces », utilisant des complexes de matériaux en fines couches. Fortement médiatisées il y a quelques années, ces dernières restent cependant très minoritaires.

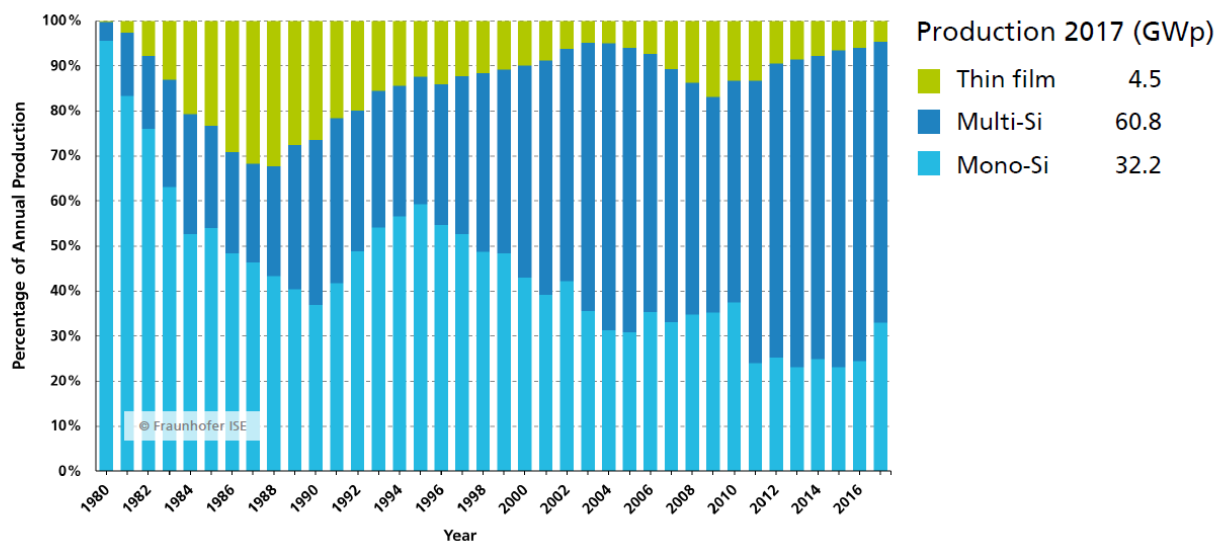


Figure 2 : Répartition de la production photovoltaïque par type de technologie utilisée
Source : ©Fraunhofer ISE, Photovoltaics Report, updated 14.11.2019

Traduction de la légende :

- Production 2017 (GWcrête)
- Ordonnée : Pourcentage de la production annuelle
- (vert) : Couches minces
- (bleu foncé) : Silicium polycristallin
- (bleu clair) : Silicium monocristallin

Les modules à base de silicium cristallin représentent plus de 95 % de la production mondiale. Ils sont constitués presque exclusivement de matériaux intégralement recyclables. En effet, en pourcentage de la masse d'un panneau, il y a surtout du verre (plus de 75 %), des polymères (10 %) et de l'aluminium (8 %) qui sont classifiés comme des déchets non dangereux et réutilisables. Les polymères sont des plastiques de type Tedlar. Le reste est composé de silicium (environ 5 %), de cuivre (1 %) et de moins de 0,1 % d'argent et d'autres métaux (principalement de l'étain et du plomb) qui, même s'ils demandent plus d'attention, peuvent être recyclés.

Les technologies couches minces représentent moins de 5 % de la production photovoltaïque. Elles mettent en jeu des complexes semi-conducteurs d'une très faible épaisseur (3 micromètres, soit 0,003 millimètre) déposés sur un substrat simple comme du verre ou une feuille métallique. Ces complexes sont composés de mélanges de type Cadmium/Tellure (CdTe), Cuivre-Indium-Sélénium (CIS) ou Cuivre-Indium-Gallium-Sélénium (CIGS).

Les panneaux CdTe sont composés, en masse, de 97 % de verre et 3 % de semi-conducteurs.

Les panneaux CIS-CIGS contiennent 89 % de verre, 7 % d'aluminium et 4 % de semi-conducteurs.

Pour trier les différents matériaux, le traitement des modules repose sur une combinaison d'actions. La première est la séparation mécanique, en utilisant des concasseurs, aimants, tamis, trieurs à inductions, etc. Elle permet de trier la grande majorité de la masse d'un panneau (85 % pour un module à silicium cristallin). Elle est complétée :

- soit par un traitement thermique, en particulier pour éliminer le polymère encapsulant le panneau : en le brûlant, on sépare les différents éléments du module photovoltaïque (cellules, verre et métaux). Des techniques de pyrolyse sont testées, par exemple au Japon, pour améliorer ces procédés thermiques ;
- soit par un traitement chimique. Les éléments restants du module, broyés finement, sont plongés dans un ou plusieurs solvants pour extraire des matériaux secondaires par fractions. Cela permet d'extirper les contacts métalliques et la couche antireflet.

Les modules « couches minces » en fin de vie doivent être traités avec une attention particulière afin de récupérer les complexes métalliques semi-conducteurs qu'ils contiennent, car certains comme le cadmium sont toxiques. Néanmoins, les études réalisées sur le cadmium présent dans les couches minces sous la forme de tellure de cadmium (CdTe) soulignent la grande stabilité de ce composé, ce qui minimise le risque. La filière est au stade de la recherche et des méthodes efficaces sont déjà testées. Certains travaux (Sinha et Cossette, 2012) montrent qu'il est possible de récupérer 90 % du verre et 95 % des semi-conducteurs (en masse) d'un panneau par traitement mécanique puis chimique : mélange d'acide sulfurique et de peroxyde d'hydrogène pour filtrer les différentes matières broyées, puis précipitation pour récupérer les métaux. On peut noter que le fabricant de panneaux et prestataire de traitement First Solar obtient déjà aujourd'hui des taux de récupération de 90 % pour le verre et 90 % pour le matériaux semi-conducteur (CdTe)¹³.

Quelles valorisations pour les matières premières récupérées ?

Les filières de valorisation des matériaux extraits lors des opérations de recyclage sont de deux types : la production de modules photovoltaïques

(recyclage dit « en boucle fermée ») et les filières traditionnelles des matières premières secondaires comme le verre et l'aluminium ainsi que le marché des métaux pour le cuivre, l'argent, le cadmium, le tellure, etc. (recyclage dit « en boucle ouverte »).

Même s'il contient une fraction de polymère, de silice ou de métaux, le verre récupéré, peut être mélangé avec d'autres verres recyclés (à hauteur de 15 à 20 %), notamment pour l'industrie de la fibre de verre.

Les polymères représentent 10 % de la composition des modules à base de silicium cristallin. Une fois séparés, ils sont transformés en combustible solide de récupération et peuvent ainsi être utilisés comme source d'énergie, notamment pour les fours de cimenterie notamment. Notons que d'une manière générale, si le recyclage des plastiques est préférable d'un point de vue environnemental, la valorisation énergétique s'applique a priori aux plastiques qui n'ont pas été triés, qui ont été contaminés par d'autres déchets ou qui sont composés d'un mélange de polymères rendant leur recyclage trop complexe. Bertrand Lempkowicz, chargé de communication de PV Cycle, indique que les polymères utilisés dans les panneaux photovoltaïques « pourraient être utilisés comme liant pour de la peinture, mais [que] cela nécessiterait de les nettoyer. Il est de fait plus écologique de [les] incinérer (en incinérateur filtré) que d'utiliser des tonnes d'eaux pour [les] nettoyer¹⁴ ».

À titre de comparaison, le taux de valorisation (par recyclage ou valorisation énergétique) de l'ensemble des déchets plastiques avoisine 62 % en France en 2019, mais leur taux de recyclage atteint seulement 22 %¹⁵.

L'aluminium et le cuivre des câbles peuvent également être intégrés dans les industries existantes du recyclage de ces métaux.

Quant aux plaquettes de silicium, elles peuvent être recyclées de deux façons :

- soit elles sont intégrées dans le process de fabrication de cellules et utilisées pour la fabrication de nouveaux modules, si elles ont été récupérées dans leur intégrité (par exemple, les rebuts de fabrication n'ayant pas quitté l'usine). Ce recyclage du silicium en boucle fermée¹⁶ a été étudié dans les années 2000 dans une ligne pilote de l'entreprise allemande SolarWorld (un des plus grands fabricants de panneaux photovoltaïques) mais n'a jamais été déployé car le prix du silicium solaire a fortement chuté entre 2006 et 2010.
- soit elles sont fondues et intégrées dans le process de fabrication des lingots de silicium, utilisables dans les industries qui en ont besoin. Ainsi, le silicium récupéré dans les lignes de traitement repart dans les filières des alliages métalliques ou dans celle du verre plat.

Dans la composition d'un panneau photovoltaïque, si le cadre en aluminium et le verre sont majoritaires en poids (entre 83 % et 97 % du poids selon les technologies) ils sont minoritaires en valeur¹⁷. Le silicium, le cuivre et l'argent utilisés pour la fabrication des cellules solaires sont des matériaux de très haute valeur. Il y a donc un fort intérêt à développer des solutions technologiques permettant de les récupérer en recherchant la pureté la plus élevée possible. L'amélioration des procédés de recyclage et le développement des filières de valorisation font l'objet de projets de recherche. On citera par exemple le projet européen CABRISS¹⁸, mené entre 2015 et 2018, qui visait le développement d'une économie circulaire fondée sur le recyclage, la réutilisation et la récupération d'indium, de silicium et d'argent, principalement pour l'industrie photovoltaïque, mais aussi pour la production de verre et de composants électroniques.

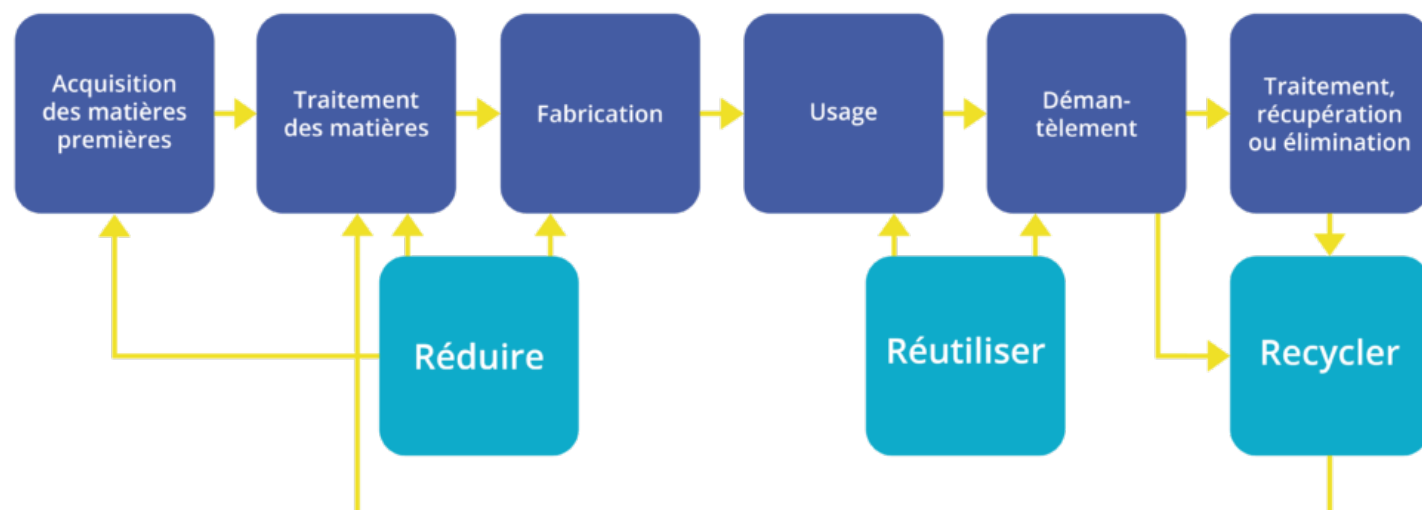
Réduire, réutiliser et recycler : une obligation du producteur

La loi n°2020-105 du 10 février 2020 relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire¹⁹ oblige désormais les producteurs²⁰ à adopter une démarche d'écoconception, en application du principe de responsabilité élargie du producteur. Ainsi, les fabricants sont désormais tenus de mettre en œuvre les trois « R » (réduire, réutiliser et recycler) :

- réduire la quantité de matériaux nécessaire à la fabrication d'un panneau. Par exemple, on s'attend à ce que d'ici 2030, les panneaux cristallins comportent plus de verre (facilement recyclable) et moins de silicium ;
- réutiliser certains matériels exploitables d'un ancien à un nouveau panneau, voire même commercialiser des panneaux de seconde main à des prix allégés (un tel marché commence à émerger sur des plateformes internet allemandes, comme www.secondsol.de ou www.pvXchange.com) ;
- recycler les matériaux après traitement en amont du processus de fabrication, mais également accroître la recyclabilité de leurs produits.

Objectifs et perspectives à l'échelle européenne

En Europe, depuis 2012, les fabricants de panneaux photovoltaïques doivent, dans le respect de la directive sur les déchets électriques et électroniques, réaliser à leurs frais la collecte et le recyclage de leurs produits. Cette directive fixe un objectif minimal de collecte de « 65 % du poids moyen de tous les équipements électriques et électroniques mis sur le marché au cours des trois années précédentes dans l'État membre concerné, ou de 85 % des déchets d'équipements électriques et électroniques produits, en poids, sur le territoire dudit État membre ». De plus, depuis août 2018, au moins 80 % des panneaux photovoltaïques collectés doivent ensuite être préparés pour réutilisation ou recyclage¹⁰.



Adapté de Fthenakis (2000)

Figure 3 : Diagramme des flux durant le cycle de vie d'un panneau photovoltaïque et des opportunités pour réduire, réutiliser ou recycler.

Selon le rapport de l'IRENA⁸, le recyclage des panneaux photovoltaïques au niveau mondial, à l'horizon 2030, permettrait de réutiliser plus de 900 000 tonnes de verre, plus de 100 000 tonnes de polymères, 75 000 tonnes d'aluminium et 29 500 tonnes de silicium. Pour les autres composants, les volumes sont logiquement moins importants : 7 200 tonnes de cuivre, 390 tonnes de l'ensemble des autres métaux (zinc, nickel, plomb, cadmium, gallium, indium, sélénium et tellure), 310 tonnes de semi-conducteurs et 90 tonnes d'argent.

Tous ces matériaux recyclés auraient une valeur économique estimée à 450 millions d'euros. Grâce à eux, 60 millions de nouveaux panneaux solaires pourront être fabriqués. Les chiffres seraient 30 fois plus élevés en 2050 si la puissance installée de panneaux solaires dans le monde atteignait 4 500 GW (voir figure n°1) .

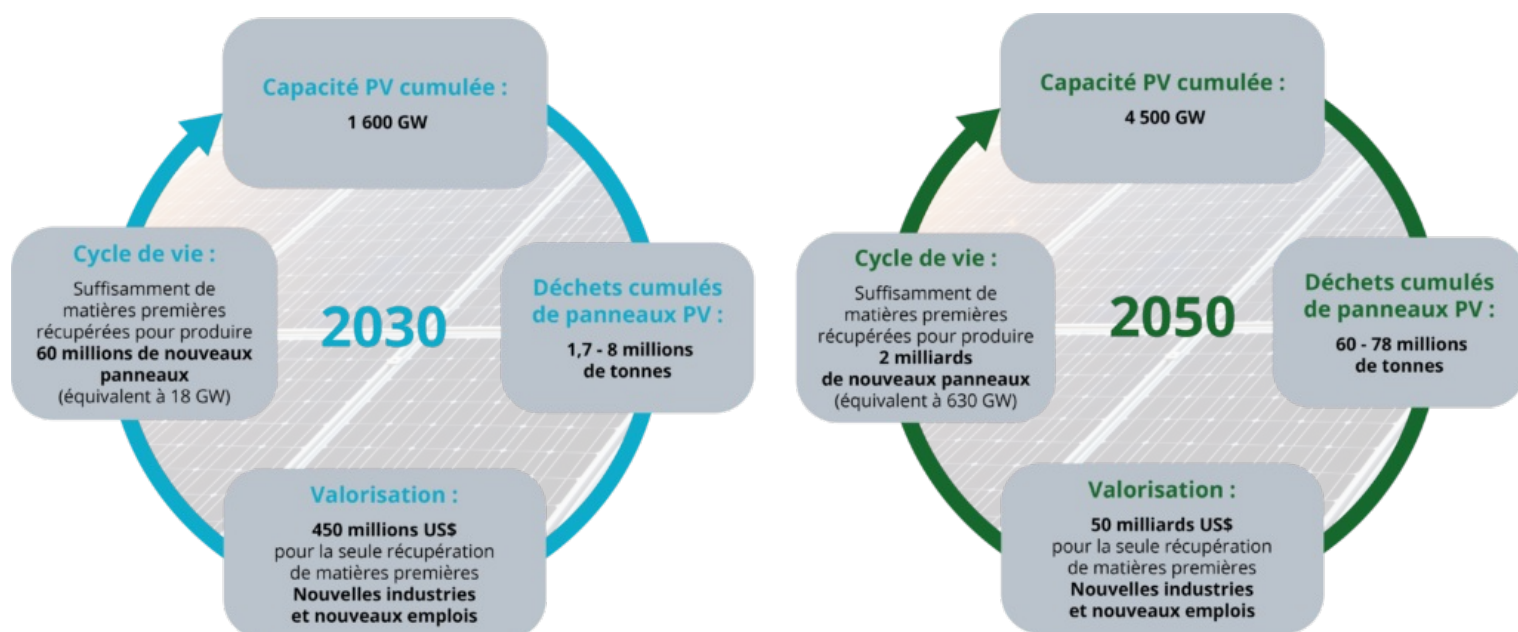


Figure 4 : Valorisation potentielle par la gestion de la fin de vie des panneaux PV

Le recyclage en nécessaire progression

En France, la filière de recyclage des panneaux photovoltaïques – gérée par PV Cycle – a mis en place un réseau de collecte de 177 points d'apport volontaire²¹. En 2016, 295 tonnes de panneaux usagés avaient été collectées, dont 222 tonnes traitées en Belgique puisque le premier site de traitement en France n'a démarré qu'en 2018.

Cette unité française dédiée de traitement des panneaux photovoltaïques en fin de vie de type « silicium cristallin » est implantée à Rousset, dans les Bouches-du-Rhône²². Selon PV Cycle, l'usine atteint aujourd'hui un taux de valorisation de 94,7 % pour un module photovoltaïque à base de silicium cristallin avec cadre en aluminium. Les matériaux valorisés sont le verre ainsi que les fractions minoritaires potentiellement à forte valeur économique (silicium métal, cuivre, argent...). Selon Bertrand Lempkowicz, « 95 % est un chiffre exceptionnel en matière de recyclage, surtout sur un produit multi-

composants », à titre de comparaison « une machine à laver n'approche pas les 70 % de recyclage ». Quant aux 5,3 % de matière non valorisée, il s'agit principalement de « poussières emprisonnées dans les filtres après broyage [...] [qui] peuvent également être incinérées ou utilisées comme substitut au sable dans la construction, puisque le verre, le silicium et le silicone sont tous des dérivés du sable »¹⁴.

En 2019, ce sont plus de 5 000 tonnes de panneaux photovoltaïques usagés qui ont été collectés en France, soit près de 280 000 panneaux solaires en fin de vie recyclés à 95 %²³. Toutefois, compte tenu des prévisions de développement de la filière et de l'évolution possible des quantités cumulées de déchets issus des panneaux photovoltaïques, de nouvelles unités locales de traitement devront être mises en œuvre à court et moyen terme. PV Cycle annonce ainsi qu'une seconde unité de traitement est déjà à l'étude.

Conclusion

L'installation d'un nombre grandissant de panneaux photovoltaïques répond à une exigence de la transition énergétique : multiplier la production décentralisée d'électricité d'origine renouvelable. L'économie circulaire, limitant la consommation et le gaspillage des ressources et la production de déchets est également un objectif majeur de cette transition énergétique.

Au terme de leur exploitation, les matériaux constituant les panneaux photovoltaïques doivent donc être récupérés et recyclés au maximum des possibilités techniques, à un coût économique acceptable. La majorité de ces matériaux sont courants (verre, aluminium, cuivre) avec des filières matures de recyclage. D'autres matériaux, comme le silicium, exigent des processus de traitement spécifiques, qui se mettent en place progressivement. Le recyclage des panneaux photovoltaïques prend donc graduellement forme, avec la nécessaire exigence de réutiliser la très grande majorité des éléments qui les composent.

Les panneaux photovoltaïques présentent un potentiel de recyclage important, avec un taux de recyclage déjà élevé aujourd'hui et une filière de traitement prometteuse. Ils génèrent néanmoins certaines pollutions, comme toute activité. Il ne serait donc pas acceptable de déployer des installations photovoltaïques sans réfléchir en premier lieu à nos consommations. Le rôle de la sobriété reste primordial dans la transition énergétique.

La filière photovoltaïque dans le scénario négaWatt

Le scénario négaWatt²⁴ prévoit un véritable essor de la filière solaire photovoltaïque, à la fois par le biais de petites installations sur maisons individuelles, d'installations de taille moyenne sur des bâtiments plus importants, d'ombrières de parkings ou de grands parcs au sol sur des friches industrielles ou des terrains délaissés par l'agriculture. 135 GW de panneaux photovoltaïques devraient ainsi être installés en 2050 pour une production de 147 TWh. Entre 2020 et 2050, cela pourrait représenter un total cumulé de plus de 6,8 millions de tonnes de panneaux photovoltaïques supplémentaires²⁵ – dont une partie sera déjà en fin de vie. Une industrialisation importante des filières de recyclage sera donc nécessaire pour accompagner ce déploiement dans des conditions écoresponsables assurant une transition énergétique soutenable.

Sources et références

1. ↑ *Bilan électrique RTE 2019* [en ligne]. RTE, janvier 2020, 173 pages. Disponible sur : https://rte-france.com/sites/default/files/bilan-electrique-2019_1.pdf (29 mai 2020)
2. ↑ *Photovoltaic Degradation Rates – An Analytical Review* [en ligne]. Dirk C. JORDAN and Sarah R. KURTZ, juin 2012, 32 pages. Disponible sur : <https://www.nrel.gov/docs/fy12osti/51664.pdf> (29 mai 2020)
3. ↑ *Brèves*, Septembre 2012 [en ligne]. HESPUL. Disponible sur : https://www.photovoltaique.info/media/filer_public/9e/ca/9ecaccfd-d825-4cd0-9834-60c5dc900b38/breves_pvinfov_2012.pdf, page 19/68 (29 mai 2020)
4. ↑ *Snapshot of Global PV Markets 2020* [en ligne]. IEA-PVPS, avril 2020, 20 pages. Disponible sur : https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/04/IEA_PVPS_Snapshot_2020.pdf (4 septembre 2020)
5. ↑ En supposant un ratio moyen de 90 t/MW et d'après les travaux menés par l'IRENA : *End-of-Life Management : Solar Photovoltaics Panels* [en ligne]. International Renewable Energy Agency (IRENA), juin 2016. Disponible sur : https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_IEAPVPS_End-of-Life_Solar_PV_Panels_2016.pdf (8 juillet 2020)
6. ↑ *Stratégie française pour l'énergie et le climat – Programmation pluriannuelle de l'énergie* [en ligne]. Ministère de la Transition écologique et solidaire, avril 2020. Disponible sur : <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/20200422%20Programmation%20pluriannuelle%20de%20l%27e%CC%81nergie.pdf> (4 septembre 2020)
7. ↑ *Le photovoltaïque se recycle !* [en ligne]. PV CYCLE. Disponible sur : https://www.youtube.com/watch?v=gw_meqs6OCw (8 juillet 2020)
8. ↑ *End-of-Life Management : Solar Photovoltaics Panels* [en ligne]. International Renewable Energy Agency (IRENA), juin 2016. Disponible sur : http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_IEAPVPS_End-of-Life_Solar_PV_Panels_2016.pdf (29 mai 2020)
9. ↑ *Directive 2012/19/UE du Parlement européen et du Conseil du 4 juillet 2012 relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE)* (refonte) [en ligne]. Journal officiel, n° L 197, 24 juillet 2012. Disponible sur : <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:197:0038:0071:fr:PDF> (4 septembre 2020)
10. ↑ *Décret n° 2014-928 du 19 août 2014 relatif aux déchets d'équipements électriques et électroniques et aux équipements électriques et électroniques usagés* [en ligne]. Journal officiel, n° 0193, 22 août 2014. Disponible sur : <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000029387124&categorieLien=id> (4 septembre 2020)
11. ↑ Site internet de PV CYCLE, Disponible sur : <http://www.pvcycle.fr/>
12. ↑ Contrairement à une idée reçue, les panneaux photovoltaïques ne contiennent pas de terres rares, lire à ce sujet l'article *La rareté de certains métaux peut-elle freiner le développement des énergies renouvelables ?* sur Décrypter l'énergie : <https://decrypterlenergie.org/la-rarete-de-certains-metiaux-peut-elle-freiner-le-developpement-des-energies-renouvelables>
13. ↑ *The recycling advantage – Cost effective. Sustainable.* FIRST SOLAR. Disponible sur : <http://www.firstsolar.com/-/media/First-Solar/Sustainability-Documents/Recycling/First-Solar-Recycling-Brochure.ashx> (8 juillet 2020)
14. ↑ *Recyclage des panneaux photovoltaïques : pourquoi n'atteint-on pas une revalorisation à 100 % ?* [en ligne]. PV magazine. Disponible sur : <https://www.pv-magazine.fr/2020/08/24/recyclage-des-panneaux-photovoltaïques-pourquoi-natteint-on-pas-une-revalorisation-a-100/> (11 septembre 2020)
15. ↑ *Stoppons le torrent de plastique ! Guide à destination des décideurs français pour sauver la Méditerranée* [en ligne]. WWF. WWF Mediterranean Marine Initiative, 2019, 19 pages. Disponible sur : https://www.wwf.fr/sites/default/files/doc-2019-07/20190607_Guide_decideurs_Stoppons_le_torrent_de_plastique_WWF-min.pdf (8 juillet 2020)
16. ↑ Soit l'utilisation de la matière de recyclage pour une destination identique, sans perte fonctionnelle de la matière ; voir la définition donnée par l'Ademe : *Le recyclage* [en ligne]. ADEME. Disponible sur : <https://www.ademe.fr/expertises/dechets/passer-a-l'action/valorisation-matiere/dossier/recyclage/chaîne-recyclage-produit-produit-passant-dechet> (8 juillet 2020).
17. ↑ *Recycler les panneaux photovoltaïques : état des lieux et perspectives*, PV Magazine, 2020. Disponible sur : <https://www.pv-magazine.fr/2020/05/04/recycler-les-panneaux-photovoltaïques-etat-des-lieux-et-perspectives/>
18. ↑ *Le recyclage des déchets photovoltaïques stimule l'économie circulaire* [en ligne]. Commission Européenne. Disponible sur : <https://cordis.europa.eu/article/id/240250-recycling-of-photovoltaic-waste-boosts-circular-economy/fr> (15 mai 2020)
19. ↑ *Loi n° 2020-105 du 10 février 2020 relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire* [en ligne]. Journal officiel, n° 0035, 11 février 2020. Disponible sur : <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/loi/2020/2/10/TREP1902395L/jo/texte> (29 mai 2020)
20. ↑ Au sens de la loi n° 2020-105 du 10 février 2020 relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire, le « producteur » désigne « toute personne physique ou morale qui élabore, fabrique, manipule, traite, vend ou importe des produits générateurs de déchets ou des éléments et matériaux entrant dans leur fabrication ».
21. ↑ Site internet du ministère de la Transition écologique et solidaire : <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/solaire#e12>
22. ↑ Site internet de PV CYCLE : <https://pvcycle.fr/recyclage/silicium-cristallin/>
23. ↑ *Plus de 5.000 tonnes de panneaux photovoltaïques usagés collectés en France en 2019* [en ligne]. PV CYCLE. Disponible sur : <https://www.pvcycle.fr/plus-de-5-000-tonnes-de-panneaux-photovoltaïques-usages-collectes-en-france-en-2019/> (29 mai 2020)
24. ↑ *Scénario négaWatt 2017-2050*, ressources disponibles sur : <https://www.negawatt.org/Scenario-negaWatt-2017-2050>
25. ↑ En supposant un ratio moyen de 55 t/MW et d'après les travaux menés par l'IRENA : *End-of-Life Management : Solar Photovoltaics Panels* [en ligne]. International Renewable Energy Agency (IRENA), juin 2016. Disponible sur : https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_IEAPVPS_End-of-Life_Solar_PV_Panels_2016.pdf (14 juillet 2020)