

Recyclage

PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES, LES DÉCHETS DU FUTUR

Utilisés depuis plusieurs années pour la production alternative d'électricité, les panneaux photovoltaïques contiennent des métaux lourds dont la gestion en fin de vie interpelle déjà. La filière de collecte et de traitement commence à se structurer en développant de nouveaux procédés dont l'impact du point de vue des risques chimiques reste à définir.

PHOTOVOLTAIC PANELS, THE WASTE OF THE FUTURE - In use for some years now as alternative means of generating electricity, photovoltaic panels contain heavy metals, end-of-life management of which is already raising questions. The collection and treatment sector is beginning to structure itself by developing new processes, the impacts of which in terms of chemical risks remain to be defined.

RONAN
LEVILLY
INRS,
département
Ingénierie des
procédés

Stimulée par le premier Grenelle de l'environnement en 2007, la filière de l'énergie photovoltaïque a connu un véritable essor en France. De grandes installations systématiquement raccordées au réseau électrique ont ainsi vu le jour. La capacité globale cumulée installée dans l'hexagone est passée de 175 Megawatt-crête (MwC) en 2008 à 5 095 MwC en juin 2014. D'ici 2020, cette capacité atteindra sans doute 5 400 MwC, objectif minimal défini lors du Grenelle.

Un tel déploiement pose des questions sur l'avenir des panneaux photovoltaïques. Certes, leur durée de vie utile étant en moyenne de 30 ans, la problématique de la gestion de ces équipements en fin de vie peut paraître lointaine. Mais les spécialistes du marché prévoient un besoin conséquent en recyclage sur ce type d'équipements dans seulement 10 à 15 ans. Déjà, la réglementation européenne évolue et encadre cette nouvelle problématique (Cf. Encadré 1).

Cette prise de conscience précoce des enjeux liés au recyclage des panneaux photovoltaïques a abouti au développement de plusieurs procédés de traitement au cours de la dernière décennie (*First Solar* [2], *Deutch Solar*, etc.). Pour autant, l'industrie du recyclage photovoltaïque est encore jeune. Les investissements se poursuivent pour optimiser les technologies et accroître les taux de récupération, à l'image des projets *Voltarec*, *FRELP project*, etc. La difficulté tient au fait que plusieurs générations de panneaux photovoltaïques (Cf. Encadré 2) coexisteront dans le futur. De fait,

ENCADRÉ 1 RÉGLEMENTATION

Jusqu'en 2012, la législation européenne en matière de gestion des déchets s'appuyait principalement sur les directives suivantes : la directive cadre sur les déchets 2008/98/CE, la directive 2011/65/CE relative aux exigences d'éco-conception des produits liés à l'énergie, la directive 2002/95/CE dite RoHS limitant l'utilisation de certaines substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques et la directive 2002/96/CE dite DEEE relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (responsabilité élargie des producteurs de matériels). La collecte et le recyclage des onduleurs de raccordement au réseau électrique présents dans les panneaux entraînent donc dans le cadre de la DEEE. Depuis juillet 2012, cette directive a fait l'objet d'une révision entraînant également les panneaux photovoltaïques dans le champ d'application des DEEE. Par conséquent, les producteurs (fabricants ou importateurs) de panneaux photovoltaïques ont dorénavant la charge de la collecte, du transport, du traitement et du recyclage du matériel en fin de vie. Cette directive est applicable depuis sa parution au Journal officiel de l'Union européenne le 27 juillet 2012 et la transposition en droit français est effective depuis la parution du décret [1].



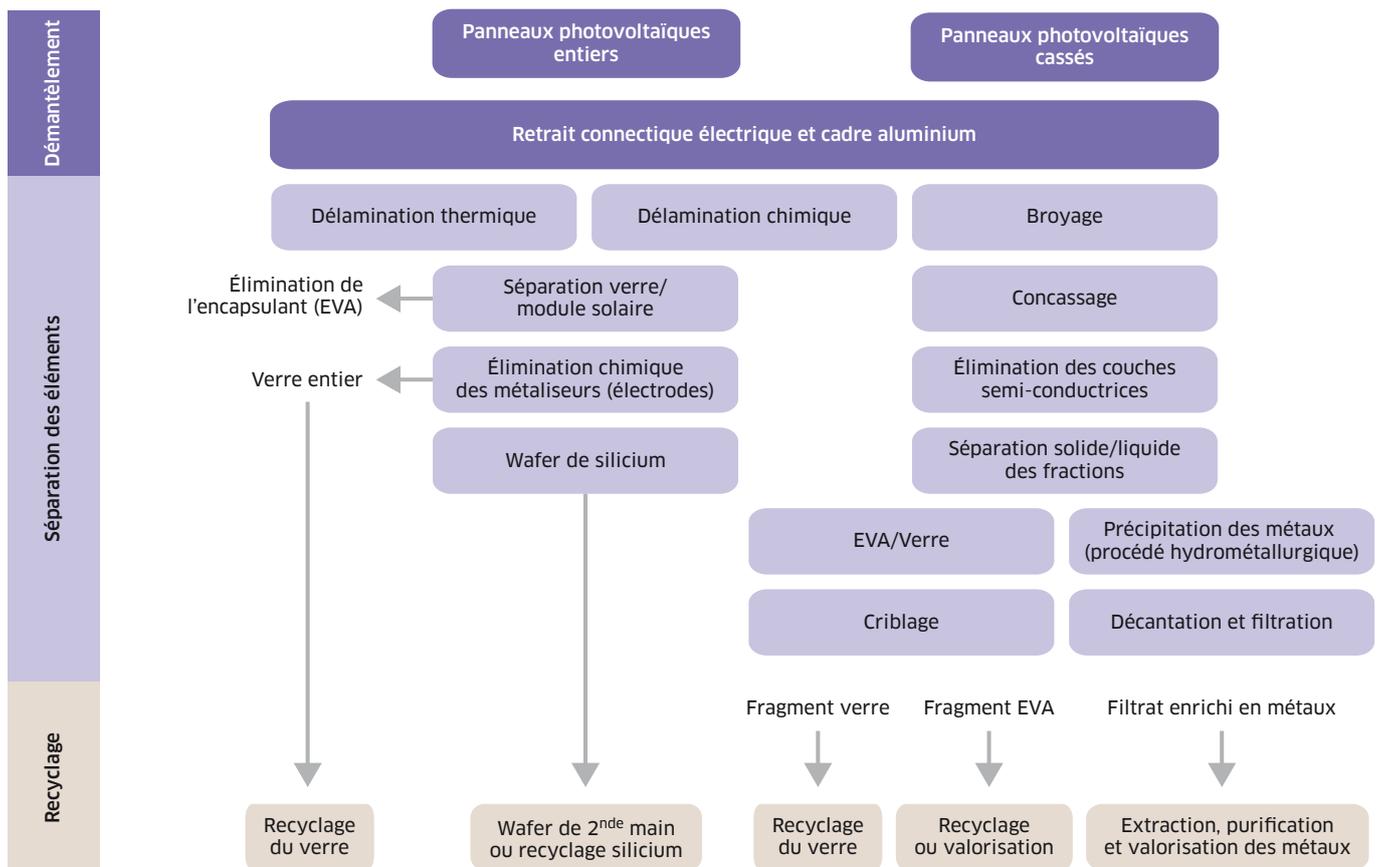
© Séverin Millet pour l'INRS

les options de traitement envisagées varient d'une génération à l'autre (Cf. Figure 1). Compte tenu de la structure en « sandwich » (Cf. Figure 2) des panneaux photovoltaïques, il s'agit tout d'abord de les démanteler en retirant toute la connectique de raccordement électrique ainsi que le cadre métallique l'entourant. Ensuite, deux stratégies de recyclage sont envisageables. La première méthode, baptisée délamination, consiste à ouvrir le panneau en altérant thermiquement ou chimiquement l'encapsulant composé d'éthylène vinyle acétate (EVA) ou de plastique. Dans ce cas de figure, il conviendra d'évaluer les émissions potentielles de gaz issus de l'approche thermique (combustion de l'encapsulant) ou de l'exposition potentielle aux solvants organiques utilisés lors du délamination chimique. Les techniques de délamination du panneau permettent une séparation plus facile du verre des modules photovoltaïques. Il convient par la suite d'éliminer les métalliseurs ou les électrodes métalliques à la surface de la cellule photovoltaïque. Pour atteindre cet objectif, l'utilisation d'acide (acide chlorhydrique, sulfurique, nitrique ou fluorhydrique) est nécessaire, soit seul,

soit en mélange. Pour les panneaux constitués de cellules au tellure de cadmium (CdTe), un traitement supplémentaire au peroxyde d'hydrogène est nécessaire pour libérer le tellure [3]. Après rinçage, il est alors possible de récupérer directement les *wafers*¹ de silicium. Ces derniers, s'ils sont suffisamment purs, peuvent être réutilisés en production de panneaux solaires comme modules solaires de seconde main. En cas de pureté insuffisante, ils rejoignent la filière de recyclage du silicium. Les métaux dissous suite au décapage des électrodes (aluminium, cuivre, nickel, zinc ou argent) peuvent être concentrés et valorisés par électrochimie.

La seconde stratégie de recyclage recourt au broyage en petites fractions de l'ensemble du panneau. Techniquement plus aisée à mettre en place, elle pose l'inconvénient d'émettre des poussières et génère un risque d'exposition aux substances toxiques telles que le cadmium ou le tellure pour le personnel en charge de l'installation ou de sa maintenance. Une fois le panneau broyé, le passage sur un crible vibrant permet de retirer les morceaux résiduels d'encapsulant du reste de la





↑ FIGURE 1
Panorama des différentes stratégies de traitement des panneaux photovoltaïques.

fraction solide. Par la suite, les fragments de panneau sont traités chimiquement par une attaque acide (chlorhydrique ou sulfurique) afin d'éliminer les couches semi-conductrices et les éventuels traitements antireflets.

L'ajout d'un flocculant en complément de l'acide a pour but d'agréger les particules métalliques et les métaux dissous. Il en résulte un mélange contenant des métaux (cadmium, tellure, indium) et du verre. En utilisant une technique de flottation ou un hydrocyclone, il est alors possible de séparer les fragments de verre de la fraction liquide contenant les métaux. Le verre ainsi récupéré rejoindra la filière de recyclage sous forme de calcin alors que la fraction liquide pourra être traitée par différents procédés: hydrométallurgique (ajout de soude pour permettre la précipitation des métaux), membranaire ou électrochimique [4]. Il conviendra, dans le cas où cette opération d'extraction/purification des métaux a lieu sur le site

**ENCADRÉ 2
LES DIFFÉRENTES TECHNOLOGIES DE PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES**

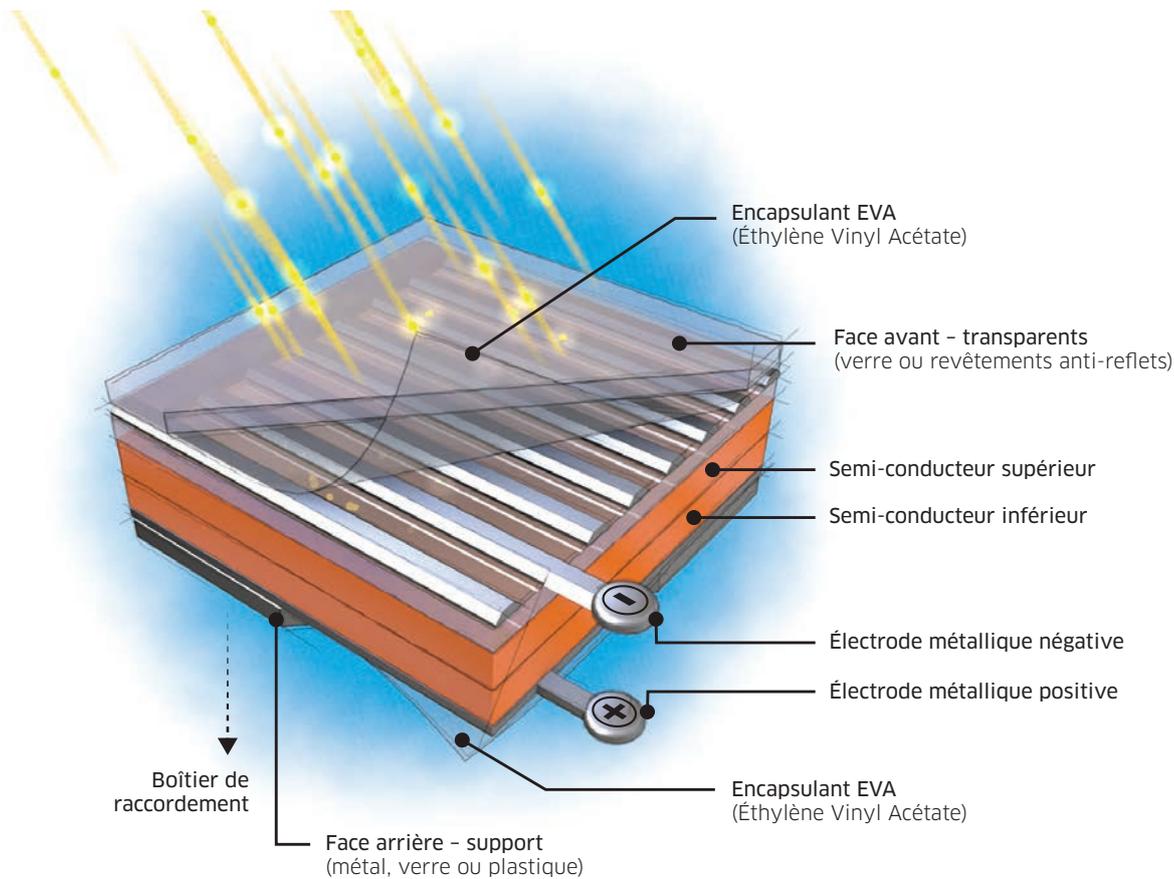
1^{re} génération: La première technologie photovoltaïque développée concerne tous les panneaux à base de silicium mono ou polycristallin. Il s'agit de la technologie la plus répandue sur le marché actuel et disposant des rendements de conversion les plus importants (polycristallin).

2^e génération: Cette technologie regroupe tous les panneaux à couches minces. Elle comprend deux types de cellule: la cellule au tellure de cadmium (CdTe) et la cellule CIGS (cuivre, indium, gallium, sélénium). Moins onéreuses à produire et adaptables sur des supports plus souples, ces cellules ont en revanche un rendement de conversion inférieur aux technologies cristallines.

3^e génération: L'effort de recherche sur les nouvelles technologies photovoltaïques porte principalement sur la technologie des panneaux souples et/ou à hauts rendements. Il s'agit le plus souvent de cellule organique (technologie OPV, cellule de Grätzel ou technologie à pigments photosensibles).

POUR EN SAVOIR +

- Actualités économiques et politiques concernant la filière photovoltaïque sur le site web du syndicat des énergies renouvelables: www.enr.fr.
- Le site web de PV CYCLE, première association européenne à assurer un système de collecte et de recyclage pour les panneaux photovoltaïques: www.pvcycle.org.



© 3 Zéliges pour l'INRS

↑ **FIGURE 2**
Schéma
de principe
d'un panneau
photovoltaïque.

de traitement, d'apporter une attention particulière à la gestion des boues métalliques obtenues. Ces dernières pourront contenir des substances chimiques dangereuses et présenter un risque pour les travailleurs des sites de traitement. À ce jour, aucune installation de traitement des panneaux photovoltaïques n'a été installée en France. Il est donc difficile d'identifier plus clairement les problématiques de risques chimiques liées à cette filière. Des perspectives se dessinent néanmoins. Ainsi, la quantité et le rythme des flux de déchets à venir seront liés à l'évolution des marchés et des politiques nationales sur l'énergie du photovoltaïque. Les professionnels du secteur tablent sur un tonnage annuel collecté de 18 000 tonnes à l'horizon 2020 et de 130 000 tonnes en 2030. Il ne s'agit toutefois que d'estimations. Le contexte actuel du marché du photovoltaïque en France ne laisse pas présager un avenir aussi radieux. En janvier 2014, l'État a en effet supprimé les aides financières destinées à soutenir la filière. À cela s'ajoute la très forte concurrence qui oppose les producteurs de panneaux photovoltaïques européens aux producteurs chinois. Par ailleurs, un certain nombre de producteurs français et européens ont jeté l'éponge compte tenu de la perte de vitesse du marché. Les acteurs de la filière photovoltaïque avaient toutefois anticipé le changement réglementaire

en appliquant le principe de responsabilité élargie des producteurs (REP). Deux associations, PV Cycle [5] et CERES, se sont structurées ces dernières années pour organiser la collecte volontaire et initier le recyclage des panneaux en fin de vie en Europe. Bien que le CERES ait cessé ces activités fin 2013, les principaux producteurs français ont rejoint l'association européenne PV Cycle pour créer une branche française.

Il conviendra par conséquent de suivre la structuration de la filière de collecte et de traitement en France. Au vu de l'état d'avancement, les différents projets de développement ne présagent pas d'implantation avant 2016. ●

1. Wafer : désignation d'une plaque ou « galette » de semi-conducteur dans l'industrie électronique.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Décret n° 2014-928 du 19 août 2014 relatif aux déchets d'équipements électriques et électroniques et aux équipements électriques et électroniques usagés.
- [2] <https://www.bnl.gov/world>
- [3] HELD M. - *Life cycle assessment of CdTe module recycling*. In: 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 2009
- [4] FTHENAKIS V. M. - *End-of-life management and recycling of PV modules*. *Energy Policy*, 2000, (28), 1051-1058.
- [5] <http://france.pvcycle.org>