

SYNTHESE / EXTENDED ABSTRACT
FRANÇAIS / ENGLISH

**FILIERES DE GESTION DES MODULES PHOTOVOLTAÏQUES
EN FIN DE VIE - ÉTAT DE L'ART ET PERSPECTIVES**

***MANAGEMENT OF END-OF-LIFE PHOTOVOLTAIC MODULES
STATE OF THE ART AND OUTLOOK***

avril 2023

A. DEPROUW, M. BORIE, L. ROUQUETTE – In Extenso
Innovation Croissance
M. IGHILHRIZ

In Extenso
Innovation Croissance

Créée à l'initiative du Ministère en charge de l'Environnement, l'association RECORD est depuis 1989, le catalyseur d'une coopération entre industriels, institutionnels et chercheurs.

Acteur reconnu de la recherche appliquée dans le domaine des déchets, des sols pollués et de l'utilisation efficace des ressources, RECORD a comme objectif principal le financement et la réalisation d'études et de recherches dans une perspective d'économie circulaire.

Les membres de ce réseau (groupes industriels et institutionnels) définissent collégialement des programmes d'études et de recherche adaptés à leurs besoins. Ces programmes sont ensuite confiés à des laboratoires publics ou privés.

Avertissement :

Les rapports ont été établis au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.

Ces documents comprennent des propositions ou des recommandations qui n'engagent que leurs auteurs. Sauf mention contraire, ils n'ont pas vocation à représenter l'avis des membres de RECORD.

- ✓ Pour toute reprise d'informations contenues dans ce document, l'utilisateur aura l'obligation de citer le rapport sous la référence :
RECORD, Filières de gestion des modules photovoltaïques en fin de vie - Etat de l'art et perspectives, 2023, 129 p, n°21-0920/1A
- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de la transition écologique)
www.ademe.fr

© RECORD, 2023

RESUME

Avec un parc européen de 164 GW en 2021 et une prévision de plus de 250 GW à horizon 2024, l'installation de panneaux photovoltaïques augmente de manière exponentielle dans toute l'Union Européenne et en France en particulier. Il est donc essentiel de se projeter sur la gestion de la fin de vie des modules photovoltaïques (PV). Cette étude vise à mieux connaître les différents aspects de ce marché en construction. Elle apporte une mise à jour de certains des travaux réalisés par RECORD en 2012 afin de disposer d'une évaluation de l'avenir à court et moyen terme de la filière de gestion des modules photovoltaïques en fin de vie dans le monde. Le travail a été mené en trois étapes. En premier lieu, une étape de cadrage de l'étude et de mise en contexte a permis d'appréhender le cadre global incluant le contexte réglementaire, les technologies des modules PV (silicium cristallin, couches minces, autres) et les gisements à court et moyen termes de modules PV en fin de vie. La seconde étape s'est focalisée sur une vision globale et qualitative des procédés et briques technologiques de démantèlement et de recyclage, quel que soit leur niveau de développement. La troisième étape a conduit à l'analyse d'une dizaine de procédés jugés prioritaires, basée sur leurs caractéristiques économiques, logistiques, techniques et environnementales. Le panorama des procédés de démantèlement et recyclage des panneaux PV en fin de vie a permis d'identifier une dizaine de procédés très prometteurs pour l'avenir de la filière en France et en Europe. Ces procédés ont chacun leurs particularités et permettent de couvrir la diversité du gisement futur de déchets-ressources que constitueront les panneaux PV en fin de vie de ces prochaines années et les besoins à court et moyen terme. L'enjeu principal de la filière est d'être capable d'exploiter ce gisement de déchets de panneaux PV pour garder la main sur sa valeur ajoutée. Le recyclage des modules photovoltaïques est un secteur qui évolue rapidement, ce qui implique d'affiner les informations présentées en fonction des progrès actuels et futurs des travaux.

MOTS CLES

Modules photovoltaïques en fin de vie, recyclage, semi-conducteur, métaux stratégiques, encapsulant, délaminage, DEEE, éco-organisme

SUMMARY

With a European fleet of 164 GW in 2021 and a forecast of more than 250 GW by 2024, the installation of photovoltaic panels is increasing exponentially throughout the European Union and in France in particular. It is therefore essential to focus on the end-of-life management of photovoltaic (PV) modules. This study aims to better understand the different aspects of this market under construction. It updates some of the work carried out by RECORD in 2012 in order to provide an assessment of the short- and medium-term future of the end-of-life PV module management industry worldwide. The work was conducted in three stages. Firstly, a study scoping and contextualisation stage provided a global framework including the regulatory context, PV module technologies (crystalline silicon, thin-film, others) and the short- and medium-term end-of-life PV module deposits. The second step focused on a global and qualitative vision of dismantling and recycling processes and technological building blocks, whatever their level of development. The third stage led to the analysis of ten or so priority processes, based on their economic, logistical, technical and environmental characteristics. The overview of processes for dismantling and recycling PV panels at the end of their life cycle has made it possible to identify ten or so very promising processes for the future of the sector in France and Europe. Each of these processes has its own particularities and covers the diversity of the future waste-resource pool that will be constituted by end-of-life PV panels in the coming years and the short- and medium-term needs. The main challenge for the industry is to be able to exploit this pool of PV panel waste to retain control over its added value. The recycling of photovoltaic modules is a rapidly evolving sector, which means that the information presented needs to be refined according to current and future progress in the work.

KEY WORDS

End-of-life photovoltaic modules, recycling, semiconductor, strategic metals, encapsulant, delamination, WEEE, PROs

Contexte

La filière des panneaux photovoltaïque étant en forte évolution, il est nécessaire de pouvoir disposer d'informations actualisées concernant le contexte sur lequel repose le développement du recyclage (évolution du marché, contexte réglementaire, quantités de déchets prévues), ainsi que sur les évolutions en matière de technologies de démantèlement et recyclage des panneaux photovoltaïques, incluant les impacts environnementaux et sanitaires associés à cette étape de la fin de vie des panneaux photovoltaïques. L'étude fournit une vision complète et actualisée de la problématique du recyclage des panneaux photovoltaïques en fin de vie, incluant une analyse des technologies déployées, des procédés de recyclage les plus prometteurs, et des perspectives de développement pour ces procédés en fonction des évolutions de la réglementation et du marché photovoltaïque.

Ce travail a abouti à la réalisation d'une synthèse, d'un rapport complet détaillé et de fiches synthétiques par technologie de recyclage des panneaux photovoltaïques sélectionnée.

Le recyclage des modules photovoltaïques est un secteur qui évolue rapidement, ce qui implique d'affiner les informations présentées en fonction des progrès actuels et futurs des recherches en matière de technologies de recyclage. Dans ce contexte, ce document doit être considéré comme indicatif.

Objectifs et méthodes

Cette étude vise à apporter une mise à jour de certains des travaux réalisés par RECORD en 2012 afin de disposer d'une évaluation de l'avenir à court et moyen terme de la filière de gestion des modules photovoltaïque en fin de vie dans le monde. L'étude est organisée en 3 phases :

- Une première phase de cadrage de l'étude et de mise en contexte,
- Une deuxième phase présentant une vision globale et une analyse qualitative des technologies de démantèlement et de recyclage,
- Une troisième phase d'analyse quantitative des technologies prioritaires de démantèlement et de recyclage.

L'étude se centre sur les panneaux photovoltaïques installés au sol et sur bâti. Les panneaux photovoltaïques flottants et autres objets connectés sont exclus du périmètre. Les différentes technologies de cellules photovoltaïques, dont les procédés de démantèlement et de recyclage existant ou en développement ont été étudiées, sont les suivantes :

- **Première génération** : silicium monocristallin (mono-Si ou sc-Si en anglais), silicium polycristallin (poly-Si ou mc-Si en anglais) ;
- **Seconde génération** : couches minces de type Tellure de Cadmium (CdTe), couches minces de type Cuivre Indium Gallium Sélénium (CIGS), couches minces de type silicium amorphe hydrogéné (a-Si-H) ;
- **Troisième génération** : hybrides (multi-jonctions, cellules à concentration), organiques.

Les cellules photovoltaïques de 4ème génération (ex. pérovskites) et autres cellules en développement sont considérées comme peu matures sur le marché pour pouvoir étudier leurs données de recyclage et sont donc exclues du périmètre de l'étude.

La plage temporelle considérée par défaut pour les recherches bibliographiques est 2010-2021, avec une volonté de disposer de données actualisées par rapport à l'étude réalisée en 2012. La filière étant en évolution rapide, le périmètre temporel 2016-2021 est privilégié.

Context

As the photovoltaic panel sector is undergoing rapid development, it is necessary to have up-to-date information on the context on which the development of recycling is based (market developments, regulatory context, expected quantities of waste), as well as on developments in technologies for dismantling and recycling photovoltaic panels, including the environmental and health impacts associated with this stage of the end of life of photovoltaic panels. The study provides a complete and up-to-date vision of the issue of recycling end-of-life photovoltaic panels, including an analysis of the technologies deployed, the most promising recycling processes, and the development prospects for these processes according to changes in regulations and the photovoltaic market.

This work resulted in the realization of a synthesis, a detailed comprehensive report and synthetic sheets by selected photovoltaic panel recycling technology.

The recycling of photovoltaic modules is a rapidly evolving sector, which involves refining the information presented according to current and future research advances in recycling technologies. In this context, this document should be considered indicative.

Objectives and methods

This study aims to provide an update of some of the work carried out by RECORD in 2012 in order to have an assessment of the short- and medium-term future of the end-of-life photovoltaic module management sector worldwide. The study is organized in 3 phases:

- *A first phase of framing the study and contextualization,*
- *A second phase presenting an overall review and qualitative analysis of dismantling and recycling technologies.*
- *A third phase of quantitative analysis of priority dismantling and recycling technologies.*

The study focuses on photovoltaic panels installed on the ground and on buildings. Floating photovoltaic panels and other connected objects are excluded from the perimeter. The different photovoltaic cell technologies, whose existing or developing dismantling and recycling processes have been studied, are as follows:

- **First generation:** *monocrystalline silicon (mono-Si or sc-Si in English), polycrystalline silicon (poly-Si or mc-Si in English);*
- **Second generation:** *Cadmium telluride (CdTe) thin films, Copper Indium Gallium Selenium (CIGS) thin films, hydrogenated amorphous silicon (a-Si-H) thin films;*
- **Third generation:** *hybrids (multi-junctions, concentration cells), organic.*

4th generation photovoltaic cells (e.g. perovskites) and other cells under development are considered immature on the market to be able to study their recycling data and are therefore excluded from the scope of the study.

The default time range for bibliographic searches is 2010-2021, with a desire to have updated data compared to the study carried out in 2012. As the sector is changing rapidly, the 2016-2021 time perimeter is privileged.

Pour les éléments de contexte relatifs au recyclage des panneaux, le périmètre étudié est mondial, avec des focus sur la France et l'Union européenne pour la réglementation et l'organisation des acteurs.

Principaux enseignements

Phase 1 : Cadrage de la mission et élément de contexte

Parmi les cellules photovoltaïques, trois grandes catégories peuvent être identifiées.

Les **cellules en silicium cristallin**, qui sont la famille de technologies la plus répandue. Elles sont divisées en deux sous catégories : les cellules monocristallines et les cellules polycristallines. Les cellules monocristallines ont un meilleur rendement énergétique que les polycristallines, mais sont également plus coûteuses à fabriquer. De nombreuses innovations et recherches ont été conduites sur ce type de cellules, et ont notamment permis de passer de 15 à 17 % pour les cellules multicristallines standards et de 18 à 22 % pour les cellules monocristallines les plus sophistiquées entre 1998 et 2018¹.

Les **cellules en couches minces** consomment moins de matières semi-conductrices que les cellules en silicium cristallin. On distingue trois types différents de cellules en couches minces :

- **CdTe** : le tellure de cadmium, qui est la technologie en couches minces la plus répandue. Elle est très stable dans le temps et a un prix compétitif ;
- **CIGS** : cuivre/indium/gallium/sélénium : ce sont des technologies moins répandues car elles ont un coût élevé ;
- **Silicium amorphe** : c'est une variété de silicium où les atomes sont désordonnés, l'étape de cristallisation n'est pas présente et le refroidissement est très rapide. C'est une technologie beaucoup moins consommatrice d'énergie que le polysilicium, mais avec un rendement faible, ce qui a freiné son développement commercial.

Les rendements des technologies CdTe et CIGS sont aux alentours de 15-16 %². Pour les modules CdTe, le processus de fabrication des cellules est constitué de 4 étapes : la récupération du cadmium et du tellure dans les processus métallurgiques de production (du zinc et du cuivre), la production d'un cadmium de haute pureté, la production de poudre de CdTe de haute pureté et la fabrication de cellules. Lors du recyclage des cellules, les semi-conducteurs qui composent ces cellules sont récupérables aux alentours de 95 %, et le verre aux alentours de 90 %.

Les **cellules issues d'autres types de technologies** (cellules dites « tandem ») sont des technologies encore au stade expérimental. Elles combinent une cellule solaire en silicium avec un autre semi-conducteur ayant une bande interdite plus grande (la pérovskite par exemple), ce qui permet notamment d'améliorer le rendement énergétique. Ainsi, cette technologie pourrait atteindre de hauts rendements, puisqu'elle pourrait dépasser les 35 % de rendement énergétique. La fabrication de ce type de cellule se diviserait en trois étapes : l'extraction des minerais de plomb, la concentration du minerai pour être raffiné, et la fabrication de la cellule. Cette technologie étant encore au stade expérimental, peu de données sont disponibles sur le processus de fabrication.

For the contextual elements relating to the recycling of panels, the scope studied is global, with a focus on France and the European Union for the regulation and organization of actors.

Key lessons learned

Step 1: Mission framing and context

Among photovoltaic cells, three main categories can be identified.

***Crystalline silicon cells**, which are the most common family of technologies. They are divided into two subcategories: monocristalline cells and polycristalline cells. Monocristalline cells are more energy efficient than polycristallines, but are also more expensive to manufacture. Many innovations and research have been conducted on this type of cell, including 15 to 17% for standard multicristalline cells and 18 to 22% for the most sophisticated monocristalline cells between 1998 and 2018¹.*

***Thin film cells** consume less semiconductor material than crystalline silicon cells. There are three different types of thin-film cells:*

- **CdTe**: cadmium tellurium, which is the most common thin-film technology. It is very stable over time and has a competitive price;
- **CIGS**: copper/indium/gallium/selenium: these are less widespread technologies because they have a high cost;
- **Amorphous silicon**: it is a variety of silicon where the atoms are disordered, the crystallization step is not present and the cooling is very fast. It is a much less energy-intensive technology than polysilicon, but with a low yield, which has hindered its commercial development.

The yields of CdTe and CIGS technologies are around 15-16%. For CdTe modules², the cell manufacturing process consists of 4 steps: recovery of cadmium and tellurium in metallurgical production processes (zinc and copper), production of high purity cadmium, production of high purity CdTe powder and cell manufacturing. When recycling cells, the semiconductors that make up these cells are recoverable around 95%, and glass around 90%.

***Cells from other types of technologies** (so-called "tandem" cells) are technologies still in the experimental stage. They combine a silicon solar cell with another semiconductor with a larger band gap (perovskite for example), which makes it possible to improve energy efficiency. Thus, this technology could achieve high efficiencies, since it could exceed 35% energy efficiency. The manufacture of this type of cell would be divided into three stages: the extraction of lead ores, the concentration of the ore to be refined, and the manufacture of the cell. As this technology is still in the experimental stage, little data is available on the manufacturing process.*

¹ Ministère de la Transition Écologique (2020), Le photovoltaïque : choix technologiques, enjeux matières et opportunités industrielles.

² IRENA (2019), Future of solar Photovoltaic.

La fabrication des cellules, et plus largement les matériaux et substances constituant les modules photovoltaïques, présentent de forts enjeux. En effet, la majorité des matériaux utilisés dans la composition des panneaux photovoltaïques sont d'importance économique moyenne à élevée pour les pays européens. Les risques d'approvisionnements sont particulièrement importants pour des métaux à forte valeur ajoutée pour lesquels l'Europe est fortement dépendante des imports, comme l'indium, le gallium, le silicium, le chrome, le bore ou le phosphore. Ces enjeux sont d'autant plus forts qu'une dynamique très positive pour le secteur du photovoltaïque se dessine au niveau mondial, européen et français. En 2020, 138 GW ont été raccordés au niveau mondial, et une forte tendance à la hausse est prévue pour les prochaines années. La France a passé le seuil des 10 GW de capacité solaire en 2020 et est le 5e marché photovoltaïque européen. La technologie CdTe est mieux implantée en France qu'au niveau mondial, mais les technologies du silicium restent largement prédominantes. Au niveau mondial, les modules en silicium cristallin représentent 95 % de la production photovoltaïque³.

Phase 2: Vision globale et analyse qualitative des technologies de démantèlement et de recyclage

La capacité du parc installé augmente chaque année ce qui implique de fait une hausse des quantités de déchets de panneaux photovoltaïques à traiter. Les panneaux ayant une durée de vie moyenne d'environ 30 ans de nombreux déchets devraient être produits d'ici le début des années 2030, avec un seuil estimé par Soren à 50 000 tonnes collectés par an en 2032. Les panneaux à collecter et traiter resteront majoritairement ceux en silicium cristallin du fait de la prédominance de ce type de technologie sur le marché.

Les procédés de recyclage de ces technologies photovoltaïques se décomposent généralement en trois étapes :

- **Une étape de démantèlement ou désassemblage** : cette étape a pour objectif de séparer les composants extérieurs constituant le cadre en aluminium et la boîte de jonction du module PV ;
- **Une étape de séparation des fractions constituant le panneau photovoltaïque**, par délaminage par exemple : cette étape a pour objectif de séparer les différents constituants du sandwich constituant le module photovoltaïque et d'éliminer le matériau d'encapsulation comme l'EVA (éthylène acétate de vinyle). Cette étape peut avoir lieu après une étape de broyage ;
- **Une étape d'extraction et/ou de purification des différents matériaux constituant le module**.

Afin de séparer davantage les gros matériaux (par exemple, le verre, l'encapsulant, la plaquette de Si, le backsheet) et les matériaux spéciaux (ex : argent, plomb, étain, cadmium, tellure) du sandwich, différentes technologies de recyclage peuvent être utilisées pour chaque étape. Les technologies développées peuvent être classées dans les catégories suivantes :

- **Mécaniques** : les technologies mécaniques pouvant être utilisées sont le broyage mécanique, la séparation manuelle, la séparation par filtration ou par différence de densité par exemple. Des technologies de micro-émulsions et de rayonnement ultrasonique (Kim et Lee, 2012⁴) ont également été développées.

The manufacture of cells, and more broadly the materials and substances constituting photovoltaic modules, present high stakes. Indeed, the majority of materials used in the composition of photovoltaic panels are of medium to high economic importance for European countries. Supply risks are particularly high for high value-added metals for which Europe is heavily dependent on imports, such as indium, gallium, silicon, chromium, boron or phosphorus. These challenges are all the stronger as a very positive dynamic for the photovoltaic sector is emerging at the global, European and French levels. In 2020, 138 GW were connected globally, and a strong upward trend is expected in the coming years. France has passed the threshold of 10 GW of solar capacity in 2020 and is the 5th European photovoltaic market. CdTe technology is better established in France than globally, but silicon technologies remain largely predominant. Worldwide, crystalline silicon modules account for 95% of photovoltaic production³.

Step 2: Global vision and qualitative analysis of dismantling and recycling technologies

The capacity of the installed base increases each year, which implies an increase in the quantities of photovoltaic panel waste to be treated. Panels with an average lifespan of about 30 years of a lot of waste are expected to be produced by the early 2030s, with a threshold estimated by Soren at 50,000 tons collected per year in 2032. The panels to be collected and treated will remain mainly those made of crystalline silicon due to the predominance of this type of technology on the market.

The recycling processes of these photovoltaic technologies generally break down into three stages:

- **A dismantling or disassembly step**: the purpose of this step is to separate the external components constituting the aluminium frame and the junction box of the PV module;
- **A step of separation of the fractions constituting the photovoltaic panel**, by delamination for example: this step aims to separate the different components of the sandwich constituting the photovoltaic module and to eliminate the encapsulation material such as EVA (ethylene vinyl acetate). This step can take place after a grinding step;
- **A step of extraction and / or purification of the different materials constituting the module**.

In order to further separate large materials (e.g. glass, encapsulant, Si wafer, backsheet) and special materials (e.g. silver, lead, tin, cadmium, tellurium) from the sandwich, different recycling technologies can be used for each step. The technologies developed can be classified into the following categories:

- **Mechanical**: Mechanical technologies that can be used are mechanical grinding, manual separation, separation by filtration or density difference for example. Micro-emulsion and ultrasonic radiation technologies (Kim and Lee, 2012⁴) have also been developed.
- **Chemical**: Chemical technologies use treatments with organic solvents, acid/base treatments or pickling.

³ IEA PVPS (2021), Trends in photovoltaic applications.

⁴ Kim, Y., Lee, Jaeryeong (2012). Dissolution of ethylene vinyl acetate in crystalline silicon PV modules using ultrasonic irradiation and organic solvent. 10.1016/j.solmat.2011.11.022.

- **Chimiques** : les technologies chimiques utilisent des traitements par des solvants organiques, des traitements acide/base ou des décapages.
- **Thermiques** : les technologies thermiques sont la pyrolyse, l'augmentation de température ou la cryogénie.
- **Optiques** : les technologies de séparation optiques sont des technologies utilisant des lasers principalement (Garvin et al., 2022⁵).

Ainsi, recycler des panneaux photovoltaïques consiste, via des procédés mécaniques ou chimiques, en la séparation du module en fractions de composition homogènes afin d'obtenir des matériaux pouvant être réintroduits dans un cycle de production en remplacement total ou partiel d'une matière première neuve. La plupart des procédés de recyclage sont spécifiques à un type de module (cristallin ou en couches minces). Dans le cas où le procédé est applicable aux deux technologies, il ne peut y avoir de mise en commun des installations pour des raisons réglementaires (directive cadre relative aux déchets). En effet, la plupart des couches minces étant considérées comme déchets dangereux, la réglementation sur les installations impose une distinction claire avec les unités de recyclage de déchets non-dangereux. L'étude comparative des technologies est donc séparée en deux parties spécifiques aux technologies de recyclage cristallines et en couches minces respectivement (RECORD, 2012).

Parmi le panorama des briques technologiques et procédés existants ou en cours de développement pour le démantèlement et recyclage des panneaux solaires en fin de vie effectué (analyse approfondie de près d'une soixantaine de procédés), l'analyse détaillée s'est concentrée sur onze procédés qui semblent les plus prometteurs et intéressants pour le futur de la filière de traitement des panneaux PV en France et en Europe.

Phase 3 : Analyse quantitative des technologies prioritaires de démantèlement et de recyclage

L'échantillon des onze procédés caractérisés dans la phase précédente a été sélectionné sur des critères liés à la performance – attendue ou observée – des procédés en termes de quantité, diversité et qualité des matériaux récupérés via le recyclage des panneaux mais aussi à la localisation et maturité de ces procédés, afin de se focaliser sur les procédés les plus rapidement implémentables ou amplifiables sur notre territoire. De ce fait, sur les onze procédés sélectionnés, la majorité s'applique aux silicium cristallin (technologie majoritaire sur le marché) et ces procédés sont au stade industrialisé ou avec une industrialisation prévue. La liste finale des procédés est la suivante :

- First Solar pour couches minces,
- Antec Solar,
- LuxChemTech pour couches minces,
- Photorama,
- Solarcycle,
- NPC (Envie 2E Aquitaine) et ROSI Solar,
- FRELP,
- ReProSolar,
- Procédé Veolia,
- Procédé Klugmann-Radziemska,
- Procédé Fraunhofer.

- **Thermal**: Thermal technologies are pyrolysis, temperature increase or cryogenics.
- **Optical**: Optical separation technologies are technologies using mainly lasers (Garvin et al., 2022⁵).

Thus, recycling photovoltaic panels consists, via mechanical or chemical processes, in the separation of the module into homogeneous composition fractions in order to obtain materials that can be reintroduced into a production cycle as a total or partial replacement of a new raw material. Most recycling processes are specific to one type of module (crystalline or thin-film). In the case where the process is applicable to both technologies, there can be no pooling of facilities for regulatory reasons (Waste Framework Directive). Indeed, since most thin films are considered hazardous waste, the regulations on installations impose a clear distinction with non-hazardous waste recycling units. The comparative study of technologies is therefore separated into two parts specific to crystalline and thin-film recycling technologies respectively (RECORD, 2012).

Among the panorama of technological bricks and existing or under development processes for the dismantling and recycling of end-of-life solar panels carried out (in-depth analysis of nearly sixty processes), the detailed analysis focused on eleven processes that seem the most promising and interesting for the future of the PV panel treatment sector in France and Europe.

Step 3: Quantitative analysis of priority decommissioning and recycling technologies

The sample of the eleven processes characterized in the previous phase was selected on criteria related to the performance – expected or observed – of the processes in terms of quantity, diversity and quality of materials recovered through panel recycling but also to the location and maturity of these processes, in order to focus on the processes that can be implemented or amplified most quickly in our territory. As a result, of the eleven processes selected, the majority apply to crystalline silicon (the majority technology on the market) and these processes are at the industrialized stage or with planned industrialization. The final list of processes is as follows:

- First Solar pour couches minces,
- Antec Solar,
- LuxChemTech pour couches minces,
- Photorama,
- Solarcycle,
- NPC (Envie 2E Aquitaine) et ROSI Solar,
- FRELP,
- ReProSolar,
- Procédé Veolia,
- Procédé Klugmann-Radziemska,
- Procédé Fraunhofer.

The processes that have been analyzed are mostly specialized for one photovoltaic panel technology (crystalline silicon or thin films).

⁵ Garvin A. Heath, Dwarakanath Ravikumar, Brianna Hansen & Elaine Kupets (2022) A critical review of the circular economy for lithium-ion batteries and photovoltaic modules – status, challenges, and opportunities, Journal of the Air & Waste Management Association, 72:6, 478-539, DOI: 10.1080/10962247.2022.2068878.

Les procédés qui ont été analysés sont pour la plupart **spécialisés pour une technologie de panneaux photovoltaïques** (silicium cristallin ou couches minces). Certains procédés visent toutefois à pouvoir s'adapter à plusieurs types de technologies PV en développant des alternatives spécifiques selon la technologie de panneau photovoltaïque traité. **Les procédés répertoriés se réalisent en plusieurs étapes**, souvent une étape de traitement mécanique suivi d'une étape de traitement chimique. Ils sont souvent constitués d'une succession de plusieurs briques technologiques pour couvrir l'ensemble de la chaîne de recyclage (désassemblage des modules, délamination et séparation des fractions puis extraction et purification). Ils peuvent impliquer potentiellement différents sites et différents acteurs (industriels, chercheurs, etc.).

Ces procédés de recyclage sont spécialisés dans le traitement d'un ou plusieurs matériaux constitutifs du panneau photovoltaïque. De manière générale, les principaux matériaux récupérés sont ceux utilisés en grande proportion dans les panneaux (verre, aluminium), ainsi que quelques matériaux précieux ou stratégiques comme les semi-conducteurs par exemple. Les taux de recyclage des différents procédés ainsi que les débouchés des différents matériaux recyclés et leurs enjeux ont également été analysés. Les matériaux récupérés en sortie de recyclage ont souvent une plus faible qualité et ne peuvent pas tous être réutilisés dans l'industrie des panneaux photovoltaïques. Ils sont souvent réorientés dans des filières où ils ont une plus faible valeur ajoutée (*downcycling*). Par exemple, la qualité du verre issu des panneaux après un traitement avec broyage n'est souvent plus suffisante et le verre broyé peut être réutilisé dans la fabrication de laine de verre pour l'isolation de bâtiments.

Les impacts sanitaires et environnementaux des procédés sélectionnés ont été étudiés et comparés lorsque le niveau d'informations recueilli le permettait. En plus de leurs consommations en eau et énergie pouvant être importantes, les procédés étudiés peuvent inclure la manipulation de substances toxiques et écotoxiques comme le cadmium ou des produits utilisés dans les traitements chimiques.

Les procédés à l'étude ont également été caractérisés selon plusieurs paramètres, notamment leur maturité et leur performance. Le paramètre de maturité est évalué selon plusieurs sous-critères, comme le niveau de TRL, le dynamisme du procédé et son ancienneté. Le paramètre de performance à quant à lui été évalué en regardant les aspects liés à l'efficacité du traitement, le rendement de recyclage post purification des matériaux et à la valeur ajoutée des matériaux récupérés. Sur la base de ces paramètres, différentes matrices ont été réalisées.

Perspectives de développement

Le panorama des procédés de démantèlement et recyclage des panneaux PV en fin de vie a permis d'identifier une dizaine de procédés très prometteurs pour l'avenir de la filière en France et en Europe. Ces procédés ont chacun leurs particularités (technologie PV prise en charge, brique technologiques utilisées pour les différentes étapes du traitement, matériaux récupérés, maturité, etc.) et permettent de couvrir la diversité du gisement futur de déchets-ressources que constitueront les panneaux PV en fin de vie de ces prochaines années et les besoins à court et moyen terme.

L'enjeu principal de la filière est d'être capable d'absorber ce gisement de déchets de panneaux PV pour garder la main sur sa valeur ajoutée. En effet, les panneaux en fin de vie sont de véritables déchets-ressources, ou mines urbaines à très haute

*However, some processes aim to be able to adapt to several types of PV technologies by developing specific alternatives according to the photovoltaic panel technology treated. **The processes listed are carried out in several stages**, often a mechanical treatment step followed by a chemical treatment step. They often consist of a succession of several technological bricks to cover the entire recycling chain (disassembly of modules, delamination and separation of fractions then extraction and purification). They may potentially involve different sites and different actors (industrialists, researchers, etc.).*

***These recycling processes are specialized in the treatment of one or more materials constituting the photovoltaic panel.** In general, the main materials recovered are those used in large proportion in panels (glass, aluminum), as well as some valuable or strategic materials such as semiconductors for example. The recycling rates of the different processes as well as the outlets for the different recycled materials and their challenges were also analyzed. Materials recovered from recycling often have lower quality and not all can be reused in the photovoltaic panel industry. They are often redirected to sectors where they have a lower added value (*downcycling*). For example, the quality of glass from panels after grinding treatment is often no longer sufficient and crushed glass can be reused in the manufacture of glass wool for building insulation.*

The health and environmental impacts of the selected processes were studied and compared when the level of information collected allowed it. In addition to their water and energy consumption, which can be significant, the processes studied may include the handling of toxic and ecotoxic substances such as cadmium or products used in chemical treatments.

The processes under study were also characterized according to several parameters, including maturity and performance. The maturity parameter is evaluated according to several sub-criteria, such as the level of TRL, the dynamism of the process and its age. The performance parameter was evaluated by looking at aspects related to the efficiency of the treatment, the post-purification recycling efficiency of the materials and the added value of the recovered materials. Based on these parameters, different matrices were made.

Development prospects

The overview of end-of-life PV panel dismantling and recycling processes has identified a dozen very promising processes for the future of the sector in France and Europe. These processes each have their particularities (PV technology supported, technological bricks used for the different stages of treatment, recovered materials, maturity, etc.) and make it possible to cover the diversity of the future deposit of waste-resources that will constitute the PV panels at the end of their life in the coming years and the short- and medium-term needs.

The main challenge of the sector is to be able to absorb this deposit of PV panel waste to keep control of its added value. Indeed, end-of-life panels are real waste-resources, or urban mines with very high added value, whose recycling makes it possible to recover many recoverable materials in various French and European industrial sectors. Not being able to effectively manage and exploit this waste resource stream means wasting this value (in the case of landfills for example) or letting it leak out of Europe.

valeur ajoutée, dont le recyclage permet de récupérer de nombreux matériaux valorisables dans différentes filières industrielles françaises et européennes. Ne pas pouvoir gérer et exploiter efficacement ce flux de déchet-ressource signifie gâcher cette valeur (dans le cas d'enfouissement par exemple) ou la laisser fuiter hors de l'Europe.

Relativement « pauvre » en ressources et réserves géologiques de métaux et minéraux incontournables dans les performances des technologies utilisées actuellement, l'Europe cherche à réduire sa dépendance aux imports extra-européens et à relocaliser des chaînes de valeur entières sur son territoire. Le fait que le premier maillon de la chaîne (l'extraction minière) est souvent absent pour la plupart des matériaux jugés critiques, et en cohérence avec les principes d'économie circulaire, le maillon du recyclage est souvent vu comme un des meilleurs leviers pour réduire notre dépendance aux imports de matières premières primaires (même s'il pourra difficilement la faire totalement disparaître). L'essor des centres de traitement et recyclage des panneaux photovoltaïque en fin de vie est donc directement lié à cette volonté de pouvoir alimenter localement la chaîne de valeur de plusieurs matériaux d'intérêt stratégique dans l'optique d'être moins dépendant des importations.

Pour que l'industrialisation d'un procédé de traitement soit rentable, la quantité de déchets apportés en amont doit être suffisante, régulière et facilement accessible. Les panneaux photovoltaïques faisant partie des équipements électriques et électroniques, l'application de la Directive européenne DEEE dans les États membres instaure à la fois un cadre utile mais aussi un accès au gisement dépendant des règles définies par les acteurs agréés pour la gestion des déchets en fin de vie. En France, on peut noter que l'éco-organisme SOREN est un acteur incontournable car il détermine l'attribution des tonnages collectés en France aux opérateurs de traitement qu'il sélectionne dans le cadre d'un appel d'offres. Les pouvoirs publics ont aussi un rôle important à jouer pour stabiliser et sécuriser l'approvisionnement des usines de traitements en déchets via la réglementation (dont le cahier des charges d'agrément des éco-organismes) et leur implication en matière de suivi de la filière.

Des défis sont toutefois à relever pour la filière du photovoltaïque, notamment pour permettre un bouclage des flux par le recyclage. Les possibilités réelles de bouclage des flux sont limitées notamment du fait des enjeux de qualité des matériaux recyclés vis-à-vis des exigences des secteurs de débouchés. Un risque également identifié est la fuite des matériaux recyclés du fait de l'absence d'infrastructures industrielles capables de le réintégrer dans une chaîne de valeur en Europe. Il y a, de fait, une nécessité à mettre en place une stratégie européenne commune sur la sécurisation des chaînes complètes de production industrielle, et en particulier sur le photovoltaïque, pour tirer parti des compétences techniques existantes sur le territoire en matière de recyclage des panneaux photovoltaïques. L'enjeu est notamment d'être capable d'absorber le gisement pour garder la main sur sa valeur ajoutée. Un équilibre est donc à trouver pour garantir un marché rentable et pérenne des matières recyclées.

Relatively "poor" in resources and geological reserves of metals and minerals essential in the performance of the technologies currently used, Europe seeks to reduce its dependence on extra-European imports and to relocate entire value chains on its territory. The fact that the first link in the chain (mining) is often absent for most materials considered critical, and in line with the principles of circular economy, the recycling link is often seen as one of the best levers to reduce our dependence on imports of primary raw materials (even if it will hardly be able to completely eliminate it). The rise of end-of-life photovoltaic panel treatment and recycling centres is therefore directly linked to this desire to be able to supply the value chain locally with several materials of strategic interest with a view to being less dependent on imports.

For the industrialization of a treatment process to be profitable, the quantity of waste brought upstream must be sufficient, regular and easily accessible. As photovoltaic panels are part of electrical and electronic equipment, the application of the European WEEE Directive in the Member States establishes both a useful framework but also access to the deposit depending on the rules defined by the approved actors for the management of end-of-life waste. In France, it can be noted that the SOREN eco-organization is a key player because it determines the allocation of tonnages collected in France to the processing operators it selects as part of a call for tenders. The public authorities also have an important role to play in stabilizing and securing the supply of waste treatment plants through regulations (including the specifications for the approval of eco-organizations) and their involvement in monitoring the sector.

However, challenges are to be met for the photovoltaic sector, in particular to allow a closure of flows through recycling. The real possibilities of closing flows are limited, in particular because of the quality issues of recycled materials vis-à-vis the requirements of the market sectors. Another identified risk is the leakage of recycled materials due to the lack of industrial infrastructure capable of reintegrating it into a value chain in Europe. There is, in fact, a need to set up a common European strategy on securing complete industrial production chains, and in particular on photovoltaics, to take advantage of the technical skills existing on the territory in terms of recycling photovoltaic panels. The challenge is to be able to absorb the deposit to keep control of its added value. A balance must therefore be found to guarantee a profitable and sustainable market for recycled materials.