

SYNTHESE / EXTENDED ABSTRACT
FRANÇAIS / ENGLISH

**RECYCLAGE DES PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES
EN FIN DE VIE
ÉTAT DES LIEUX INTERNATIONAL**

**RECYCLING OF PHOTOVOLTAIC END-OF-LIFE PANELS
INTERNATIONAL OVERVIEW**

octobre 2012

Y. BILLARD, F. BAZIN, O. LACROIX - ENEA Consulting



Créée en 1989 à l'initiative du Ministère en charge de l'Environnement, l'association RECORD – REseau COopératif de Recherche sur les Déchets – est le fruit d'une triple coopération entre industriels, pouvoirs publics et chercheurs. L'objectif principal de RECORD est le financement et la réalisation d'études et de recherches dans le domaine des déchets et des pollutions industrielles. Les membres de ce réseau (groupes industriels et organismes publics) définissent collégalement des programmes d'études et de recherche adaptés à leurs besoins. Ces programmes sont ensuite confiés à des laboratoires publics ou privés.

- ✓ En Bibliographie, le document dont est issue cette synthèse sera cité sous la référence :
RECORD, Recyclage des panneaux photovoltaïques en fin de vie. Etat des lieux international, 2012, 231 p, n°11-0912/1A
- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie)
www.ademe.fr

RESUME

Depuis le début des années 2000, la prise de conscience généralisée de l'importance du recyclage, de la part des utilisateurs autant que des producteurs, a contribué à l'essor de la filière de recyclage des modules photovoltaïques en fin de vie. Elle s'explique par l'attention croissante portée aux problématiques de conservation des ressources naturelles, les tensions d'approvisionnement grandissantes sur certains métaux stratégiques, le renforcement du cadre réglementaire sur la gestion des déchets dans certains pays, et une réponse apportée aux interrogations sur le caractère renouvelable de l'énergie photovoltaïque.

Ces dix dernières années ont été marquées par des efforts de recherche conséquents qui ont permis de lever les principales barrières technologiques au recyclage des modules photovoltaïques.

Economiquement, l'activité de recyclage des modules photovoltaïques n'est en revanche pas rentable seule à ce jour. En complément des bénéfices de la vente des matières premières recyclées, la filière s'appuie sur des sources de rémunération provenant des clients, des producteurs ou d'organismes en charge de la collecte. Les développeurs de technologies restent aujourd'hui frileux à l'investissement, en raison des flux de déchets encore trop faibles et peu maîtrisés, d'un marché photovoltaïque instable et d'une filière de recyclage des déchets photovoltaïques extrêmement concurrentielle. En effet, cette dernière devrait connaître une surcapacité *a priori* très significative à horizon 2020.

A la définition des bases de l'étude, détaillant la composition des modules, le marché photovoltaïque actuel et futur, les volumes prévisionnels de déchets, les enjeux du recyclage des modules photovoltaïques et les possibilités de synergies avec les filières connexes de recyclage, succède l'analyse du cadre réglementaire en vigueur sur le retraitement des déchets, puis une analyse quasi-exhaustive des procédés de recyclage, des structures organisationnelles associées ainsi que des acteurs clés. La synthèse de ces données offre un panorama mondial objectif de l'état de la filière et des éléments clés de stratégie de développement associés à leur contexte spécifique.

Le succès d'une initiative dans cette filière est directement conditionné à la capacité des acteurs à adapter leur modèle économique au contexte local, leur système administratif au cadre réglementaire en vigueur, ainsi que la taille de leur installation au volume transitoire de gisement de déchets.

MOTS CLES

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

SUMMARY

Since the early 2000s, the general awareness surrounding the importance of recycling by both the users and producers of photovoltaic modules has contributed to the emergence of the end-of-life photovoltaic modules recycling activity. This awareness can be attributed to the growing concern on natural resource conservation; the natural shortage in some strategic metals used in photovoltaic; the reinforcement of regulatory framework on waste management in some countries; and the answer given to raising questions regarding the renewability of photovoltaic.

In fact, the last ten years have been marked by significant research efforts, which have finally lifted the main technological barriers associated with the recycling of photovoltaic modules.

Economically, the activity of recycling photovoltaic modules is however not yet self profitable to date, and is instead based on sources of compensation from the clients, producers or organizations in charge of the modules collection, on top of the sale of recycled materials. Technology developers are currently cautious of investment because the waste stream is still too weak and poorly controlled, the photovoltaic market is unstable, and high competitiveness is indicative of a recycling overcapacity, which could be increasingly significant by 2020.

Following the definition of the study bases (modules composition, current and future photovoltaic market, wastes forecasts, photovoltaic modules recycling stakes and synergies with related sectors), the active regulatory framework is described, and an objective overview of the developing recycling sector is provided by analyzing almost all recycling processes, its organizational segmentation and the key characteristics of relevant actors. The synthesis of this data provides a realistic guideline on the maturity of the industry and key strategies for the development of activities within this sector.

Indeed, the success of this activity will rest partly on the ability of recycling actors to adapt their business model and administrative system to local regulatory framework, and adapt the size of their installation to the transitory volume of waste streams.

KEY WORDS

End-of-life photovoltaic modules, recycling, semi-conductor, strategic metal, encapsulating material, delamination, WEEE, eco-organism.

OBJECTIFS DE L'ETUDE

Fournir une vision complète 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.

1. BASES DE L'ETUDE

1.1 Les technologies du photovoltaïque

La présente étude porte sur les modules photovoltaïques en fin de vie¹. Un panneau photovoltaïque consiste en une superposition de couches laminées. La cellule est encapsulée avec des métalliseurs de part et d'autre de sa surface par deux couches de protection. Les panneaux photovoltaïques sont principalement composés de verre (70% à 90% massique selon les technologies) traité par un revêtement antireflet, mais aussi de composés organiques tels que l'EVA² (environ 5% massique) qui présentent une résistance importante à tout type de procédé de séparation, et de métaux stratégiques et composants toxiques (en moindres proportions). Les semi-conducteurs qui composent la cellule sont généralement l'élément à plus haute valeur ajoutée du module, de par leur nature et de par leur niveau de pureté élevé.

Les technologies photovoltaïques sont aujourd'hui encore en plein développement et le marché présente une importante diversité des compositions et structures des cellules photovoltaïques, en particulier pour les cellules en couches minces (2^{ème} génération), ce qui induit le développement de procédés de recyclage *ad hoc*.

1.2 Les composants et leur spécificités

1.2.1 Métaux stratégiques

Les métaux stratégiques sont l'argent pour les modules cristallins ; l'indium, le gallium, le tellure, le cadmium, le germanium, le sélénium pour les technologies en couches minces. Le cuivre, le plomb, l'aluminium, l'étain et le zinc sont aussi intéressants à recycler pour leur prix élevé, mais ne sont pas sujets à des tensions d'approvisionnement.

Priorité de recyclage des métaux stratégiques selon leur disponibilité et taux d'utilisation			
Délais	Caractéristique	Métal	
Court Terme	5 années à venir	Rapide croissance de la demande; Tensions importantes d'approvisionnement; Restrictions de recyclage modérées.	Tellure, Indium, Gallium
Moyen Terme	Jusqu'à 2020	Rapide croissance de la demande; Restrictions de recyclage importantes. OU Tensions d'approvisionnement modérées; Restrictions de recyclage modérées.	Terres rares (Lithium, Tantal) Palladium, Platine, Ruthenium
Long Terme	Jusqu'à 2050	Croissance modérée de la demande; Tensions d'approvisionnement modérées; Restrictions modérées de recyclage.	Germanium, Cobalt

Source : *Critical metals for future sustainable technologies and their recycling potential*, UNEP – 2009

1.2.2 Composants toxiques

La plupart des modules photovoltaïques actuels comportent des composants toxiques tels que le plomb (contenu dans les circuits du boîtier de raccordement), le mercure, le cadmium (semi-conducteur des modules de type CdTe), le chrome hexavalent (utilisé comme revêtement), les PolyBromobiphényles (PBB) et PolyBromoDiphénylEthers (PBDE) (utilisés comme produits ignifuges), et les composés fluorés (dans le plastique de la couche inférieure notamment). Les limites maximales de concentration de certains de ces composés, spécifiques au cadre réglementaire du pays de production et d'installation, s'appliquent au produit mis sur le marché autant qu'au déchet issu du même produit traité par les centres spécialisés.

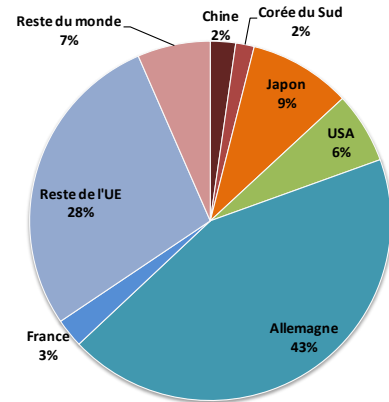
¹ La notion de « module photovoltaïque » inclut le cadre, le boîtier de raccordement et le panneau photovoltaïque laminé ; le montant et le reste des installations électriques composant le système photovoltaïque sont exclus de l'étude.

² EVA : Ethylène Vinyle Acétate
Etude RECORD n° 11-0912/1A

1.3 Contexte économique et marché photovoltaïque

La segmentation géographique mondiale de la capacité installée cumulée (exprimée en MWc) en 2010 montre la prédominance de l'Europe en général, et notamment de l'Allemagne. C'est en revanche en Asie, et principalement en Chine que sont produits les cellules et modules photovoltaïques. La segmentation technologique de la capacité installée est assez différente selon les pays. En Europe, les technologies cristallines représentent 86,1% du marché en 2010, et les couches minces, principalement limitées aux installations professionnelles, en représentent 11,9 % (CdTe, CIGS et silicium amorphe : 5,3%, 1,6% et 5,0% respectivement). C'est en Allemagne, aux USA et au Japon que s'est principalement développé le marché des couches minces.

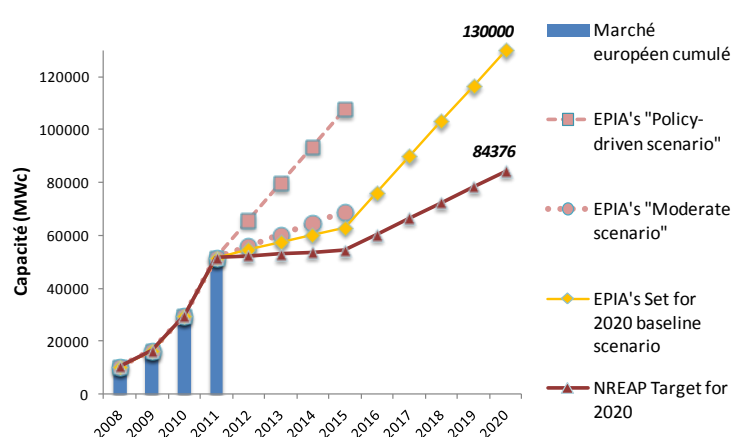
Les gisements ménagers étant plus complexes à collecter, la segmentation par type d'application a aussi été étudiée. Une large majorité des installations sont intégrées aux bâtiments et donc considérées comme produit ménager par la directive DEEE. Cette tendance n'est pas valable pour les cas spécifiques comme le Japon, la Corée du Sud, la Slovaquie et le Portugal où les modes de financement de la filière ont favorisé les projets de centrales au sol quasi-exclusivement.



Source: RECORD / ENEA Consulting, d'après données de l'EPIA : *Global Market Outlook for Photovoltaics until 2015*

La comparaison des prévisions du marché selon les différents scénarii de l'EPIA et de l'Union Européenne (NREAP) souligne le caractère conservateur du scénario NREAP (hypothèse basse). Le scénario de l'EPIA « Set for 2020 – Baseline Scenario » constitue une base de travail envisageable pour les prévisions de quantités de modules en fin de vie à recycler (hypothèse haute). La comparaison de ces deux scénarios donne une estimation des puissances installées en Europe, servant de base à l'évaluation des masses de modules en fin de vie à recycler de 2015 (typiquement ~3 200 tonnes/an en Europe) jusqu'en 2045 (typiquement ~960 000 tonnes/an en Europe).

Marché européen cumulé actuel et prévisionnel (MWc)



Source : RECORD / ENEA Consulting d'après *Global Outlook of PV market until 2015*, EPIA et *Renewable Energy Projections as Published in the National Renewable Energy Action Plans of the European Member States NREAP Targets for 2020*, EEA 2011

1.4 Réglementation du retraitement des modules en fin de vie

Aujourd'hui, seules deux régions sont en passe de mettre en application une loi spécifique au retraitement des modules photovoltaïques :

- **L'Union Européenne**, via l'inclusion des modules PV dans le champ d'application de la DEEE (l'approbation européenne en août 2012 ouvre la voie à la transcription nationale dans les pays membres; mise en application possible en France vers mi-2014) ;
- **La Californie**, dans le cadre de l'*E-Waste Recycling Act*, applicable uniquement aux modules considérés comme « dangereux » d'après le test TCLP³.

Dans ces deux cas, la réglementation consiste en la mise en œuvre de la Responsabilité Élargie du Producteur (REP). Les programmes de recyclage nationaux sont privatisés (USA) ou entièrement nationalisés (Chine) selon les directives cadre et les fonctionnements préférentiels du pays. Le

³ Toxicity Characteristic Leaching Procedure : analyse chimique qui simule le phénomène de lixiviation d'un produit lorsqu'il est enfoui pour détecter son caractère dangereux ou non.

principe de REP est aussi appliqué en Inde et en Chine pour les déchets dangereux uniquement et pourrait, à long terme, couvrir le cas des modules photovoltaïques.

Pour les pays ne présentant pas de cadre réglementaire spécifique aux déchets photovoltaïques, le retraitement est réglementé par les directives spécifiques au retraitement des déchets (définissant des taux et conditions de recyclage) lorsqu'elles existent. A défaut, seules les directives générales sur l'environnement, la santé et la sécurité sont effectives. La teneur (taux de recyclage, taux d'exportation) et les modes de mise en application (privatisés ou nationalisés) de ces réglementations sont variables d'un pays à l'autre.

1.4.1 La directive DEEE

La directive DEEE régle la collecte, le retraitement et l'élimination des déchets d'équipements électriques et électroniques et formule les conditions dans la conception des produits pour intégrer le point de vue du produit en tant que déchet. La directive DEEE applique le principe de REP par le biais d'éco-organismes ou de système individuels de recyclage. Les objectifs minimaux imposés pour les déchets photovoltaïques à compter de la mise en application de la transcription nationale de la nouvelle révision de la DEE seront de 65% de recyclage et 75% de valorisation les trois premières années, puis 70% de préparation en vue du réemploi et recyclage et 80% de valorisation les trois années suivantes, et enfin respectivement 80% et 85% six ans après la mise en application.

Mise en application de la DEEE en France

En France, deux scénarii de mise en application se profilent :

- Les modules photovoltaïques font l'objet d'une filière spécifique de recyclage
- Les modules photovoltaïques font l'objet d'une filière généraliste de recyclage

L'orientation vers l'une de ces deux hypothèses dépend en partie de la volonté et de la capacité des producteurs à s'associer pour mettre en œuvre un éco-organisme spécifique. La spécificité technologique des procédés de recyclage des modules photovoltaïques pourrait plaider en faveur d'une filière spécifique. Il est à noter que l'inclusion des modules photovoltaïques dans la filière générale DEEE pourrait avoir un impact négatif sur la qualité du recyclage des modules photovoltaïques, en mélangeant des flux de déchets de nature variable.

1.4.2 Réglementations sur les composants

Réglementation sur les substances dangereuses

Le retraitement des déchets comprenant des composants toxiques est soumis aux mêmes mesures de sécurité qu'au niveau de la production. La détoxification est une étape indispensable du recyclage pour pouvoir remettre sur le marché les produits issus du recyclage des déchets.

Les modules photovoltaïques en couches minces CdTe présentent des concentrations en cadmium supérieures à la limite de tolérance de la RoHS⁴ mais font partie de la liste d'exemption du champ d'application de la RoHS.

Régulation sur les produits chimiques et leur utilisation

En Europe, l'articulation de la réglementation REACH⁵ avec la directive-cadre sur les déchets est encore en débat. Elle dépend directement de la conversion du statut de déchet au statut de produit des matières issues du recyclage. Actuellement, les modules en fin de vie, considérés comme déchets, ne sont pas soumis à la réglementation REACH. Les composants issus du recyclage, en aval du démantèlement, alors considérés comme des produits, sont sujets à l'obligation d'être déclarés s'ils diffèrent dans leur nature du composant d'origine.

⁴ RoHS : Restriction of Hazardous Substances

⁵ REACH : Registration, Evaluation, Authorisation and restriction of CHemicals

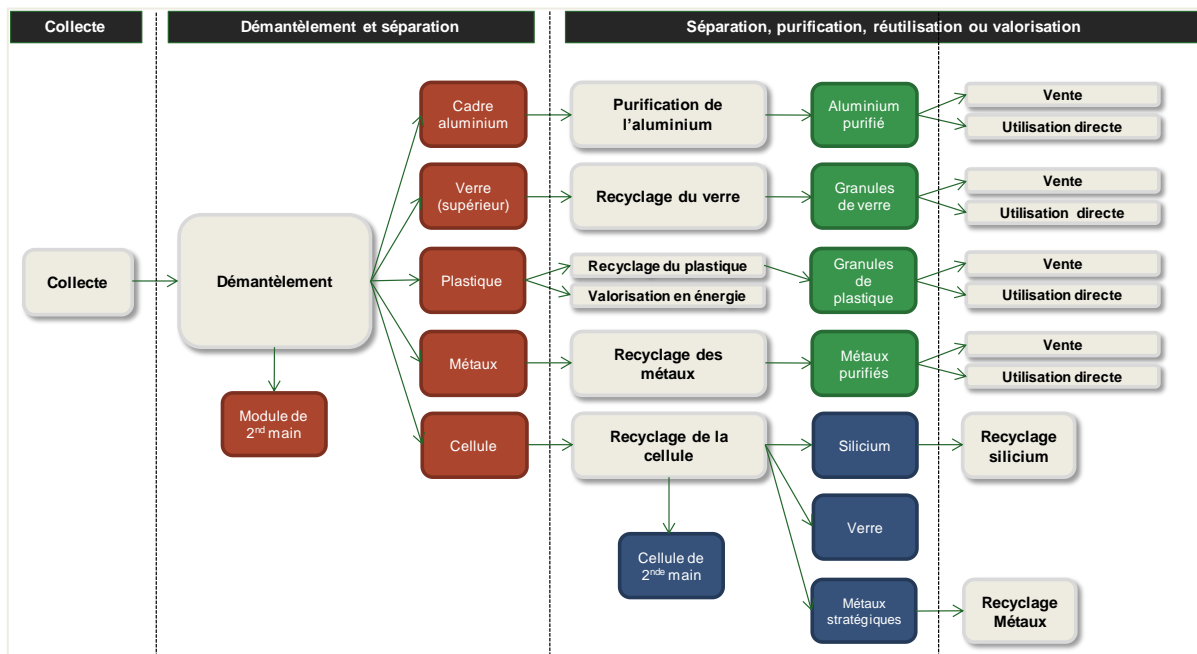
2. LA FILIERE DE RECYCLAGE DU PHOTOVOLTAÏQUE

2.1 Les filières de retraitement des déchets photovoltaïques

- **Réutilisation** : il existe une forte probabilité que le marché de seconde main connaisse une forte croissance dans les années à venir, notamment dans les pays en voie de développement.
- **Réparation et réutilisation** : cette option de retraitement, bien que prometteuse, a été peu explorée jusqu'à aujourd'hui car les technologies actuelles de laminage des modules (EVA) ne le permettent pas.
- **Réutilisation de certains composants** : cette option de recyclage a été sujette à de nombreuses recherches, notamment sur la réutilisation des wafers des modules en fin de vie, mais n'est guère plus pratiquée aujourd'hui. Certains recycleurs préfèrent le traitement de matériaux broyés.
- **Recyclage** : cette solution de retraitement consiste en la séparation du module en fractions de composition homogènes réutilisables dans diverses applications. Cette solution est adoptée dans la majeure partie des cas.
- **Valorisation** : la valorisation est une voie de retraitement à la marge, à défaut de dispositifs de recyclage disponibles. Les voies expérimentées aujourd'hui consistent en l'incinération des polymères ou en l'utilisation du silicium impur comme agrégat pour les fours de fonte métallurgique.
- **Traitement en tant que déchet ménager** : dans ce cas, le déchet est associé au flux de déchets ménagers dans une déchetterie municipale. Cette voie de traitement est maintenant officiellement interdite.

2.2 Segmentation de la filière par cœur de métier

La filière de recyclage des déchets photovoltaïques peut être segmentée comme schématisé ci-dessous:



Source : RECORD / ENEA Consulting

2.3 Voies de recyclage et de valorisation des composants

VOIE DE RECYCLAGE ET VALORISATION DES PRINCIPAUX COMPOSANTS	
Composant	Voie de recyclage et valorisation
Verre	Industrie du verre plat / industrie photovoltaïque Laine de verre Construction
EVA	Réutilisation dans l'industrie chimique Incinération pour valorisation énergétique
Semi-conducteur (Si)	Wafer au rendement d'origine pour la production de cellules PV Wafer à rendement limité pour la production de cellules PV Réutilisation dans l'industrie photovoltaïque en tant que semi-conducteur Utilisation comme agrégat pour les fours de fonte métallurgique
Semi-conducteur (couches minces)	Réutilisation à son niveau de pureté d'origine Fabrication de nouvelles cellules photovoltaïques
Métaux stratégiques	Réutilisation à leur niveau de pureté d'origine
Aluminium	Réutilisation à son niveau de pureté d'origine

Source : RECORD / ENEA Consulting

2.4 Caractérisation de la filière de recyclage des modules photovoltaïques

Les principales caractéristiques d'une filière de recyclage sont explicitées ci-dessous :

- **La synergie avec une filière de recyclage connexe⁶** : permet de faire des économies d'échelle, économiser des frais de transport, bénéficier d'infrastructures communes, économiser sur le développement de nouvelles technologies (au moins en réduire le coût), et utiliser les retours d'expérience des différentes filières développées au préalable.

FILIERES CONNEXES			
Technologie	Filière connexe	Résultats des tests de compatibilité	Commentaires
c-Si	Recyclage du verre plat	Positif	Maltha, Reiling : 2 projets à échelle commerciale , taux de recyclage de 75% à 95%
c-Si	Recyclage des ampoules	Négatif	1 essai infructueux malgré la bonne compatibilité des technologies prouvée
c-Si + CM	Déchets ménagers	Négatif	Interdit par la directive cadre sur les déchets
c-Si	Déchets électronique	?	
CM	Recyclage des écrans LCD	Recherches en cours	Revatech
CM	Recyclage des télévisions	Négatif	Schott: types de verre différents
CM	Recyclage des déchets contaminés par des métaux	Recherches en cours	Revatech

Source : RECORD / ENEA Consulting

- **La synergie avec les déchets issus de la production** : les déchets issus de la production permettent d'initier un procédé de recyclage ainsi qu'un réseau de collecte avec l'objectif, à long terme, d'étendre le périmètre d'activité au recyclage des modules en fin de vie. Cette solution est principalement applicable au recyclage des couches minces.
- **Le niveau de qualité du recyclage (pureté finale des fractions homogènes)** : le niveau de pureté des fractions sortantes du procédé de recyclage est variable selon les procédés et l'optimisation des conditions opératoires. Le niveau de pureté final des semi-conducteurs en particulier est un critère déterminant.

⁶ Filière connexe : filière de recyclage dont les déchets pourraient être recyclés en synergie avec les déchets de la filière photovoltaïque.

3. LES TECHNOLOGIES DE RECYCLAGE

3.1 Avancées technologies : chiffres et grandes lignes

Ces dix dernières années se caractérisent par des efforts de recherche soutenus provenant d'initiatives privées (producteurs de modules photovoltaïques, spécialistes en hydrométallurgie, recycleurs de verre, recycleurs de silicium solaire, de déchets dangereux...) et publiques (Commission Européenne, NEDO au Japon) qui ont finalement levé les principales barrières technologiques au recyclage des modules photovoltaïques.

11 procédés de recyclage opérationnels en 2012, dont 4 pilotes industriels et 7 procédés à échelle industrielle ont été identifiés, complétés par 7 programmes de recherche récents, et 2 associations proposant un programme de collecte et de recyclage spécifique aux déchets photovoltaïques. 11 projets pilotes et d'industrialisation de pilotes seraient en développement et dans l'attente d'un gisement de déchets suffisant pour être mis en œuvre avec un taux de recyclage prévisionnel entre 74% et près de 100%.


Des fiches techniques détaillant 23 procédés de recyclage ainsi que 28 fiches synoptiques d'acteurs de la filière sont disponibles dans le rapport complet.

▶ *Eléments clés du procédé*

PROCEDE DE LOSER CHEMIE COUCHES MINCES [12]	
Nom du procédé	Procédé universel de recyclage de modules en couches minces
Nom de l'entreprise d'exploitation	Loser Chemie
Collecteurs	Clients directs = PV Cycle
Technologies de modules traitées	Couches minces : CdTe, CIS et CIGS
Zone d'implantation	Allemagne, Saxe
Niveau de maturité	En cours d'optimisation (consommation d'énergie)
Performances du procédé	Taux de Recycle Etat de pureté
Taux de recyclage global	Proche de 100%
Coût moyen énergétique de recyclage	Faible et optimisation en cours pour réduction
Coût moyen eau pour recyclage	
Impact environnemental	Important de par l'utilisation de produits chimiques et la contamination des eaux de lavage au cadmium
Caractéristiques	
Sensibilité au type de module	
Capacité	10 tonnes de cellules par an
Volumes traités moyens	
Propriétés	Batch ; Non automatisé
Main-d'œuvre opératoire	1 personne

▶ *Caractérisation des intrants et sortants du procédé*

▶ *Schéma-bloc et description du procédé*



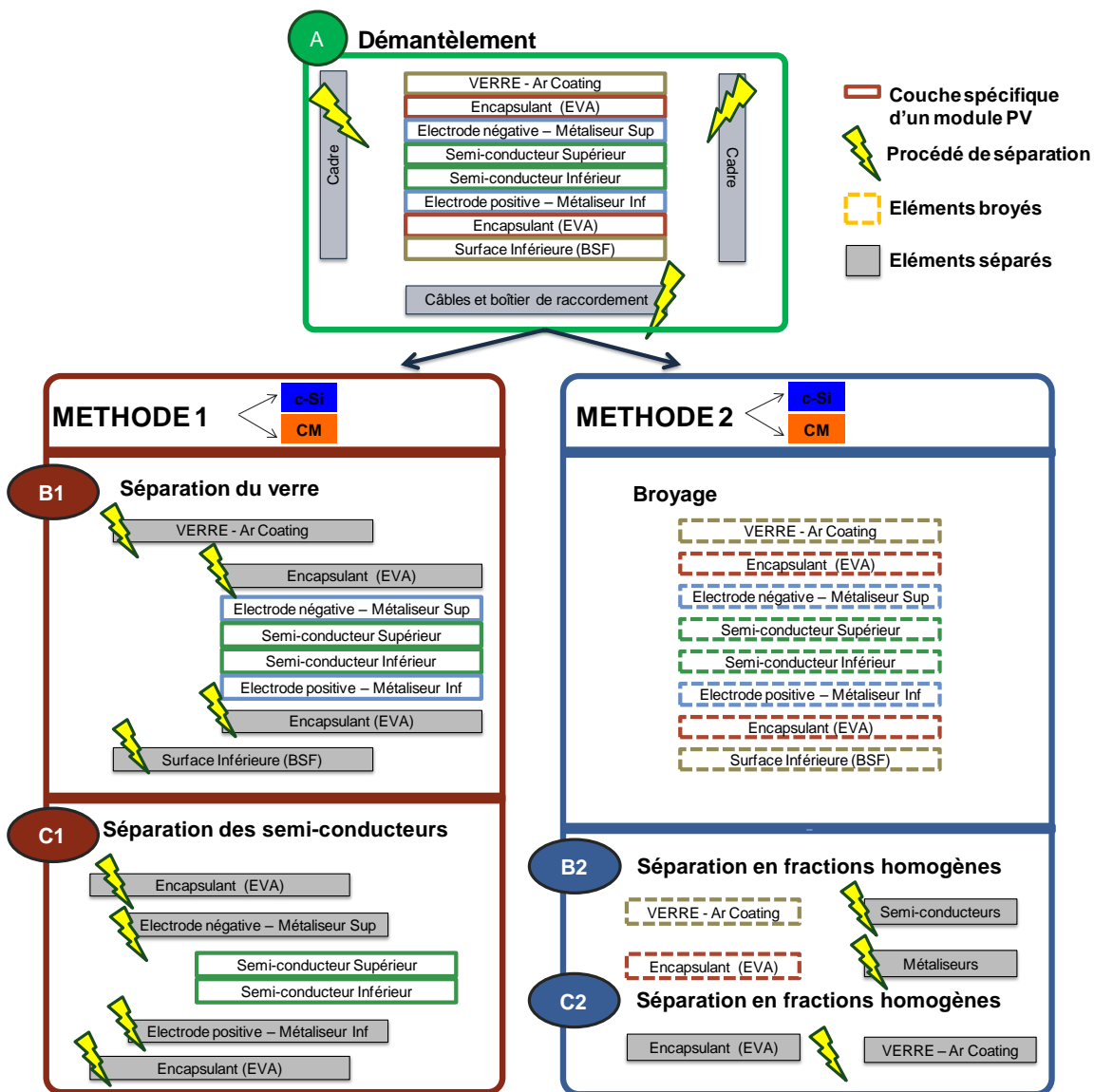
▶ *Avantages et inconvénients du procédé*

Avantages	Inconvénients
Universel - possibilité de traiter les couches minces CdTe et CIGS simultanément	Procédé incompatible avec les modules cristallins au Si
Coûts de recyclage revendiqués très concurrentiel (bas, mais coût confidentiel)	Impact environnemental encore inconnu (étude prévue en partenariat avec l'Université de Biele)
Performances revendiquées très compétitives (proche de 100%)	Procédé non automatisé implique manipulation des modules CdTe démantelés
Batch	

Source : RECORD / ENEA Consulting

3.2 Segmentation des technologies

Parmi l'ensemble des technologies développées jusqu'à aujourd'hui, deux principales méthodes de recyclage coexistent. La première méthode (dite méthode 1 ci-après) consiste en la séparation de la fraction massique la plus importante (le verre) au moyen de l'altération de la qualité de laminage de l'encapsulant. Le verre est alors facilement séparable du reste du module. Dans cette méthode, le retraitement de la cellule (pouvant inclure la séparation des métalliseurs, de l'encapsulant résiduel et la purification des semi-conducteurs) est donc facilité. La seconde méthode (dite méthode 2 ci-après) consiste à broyer l'ensemble du module après la séparation de son cadre puis à séparer sélectivement les différents composants dans des fractions homogènes, et parfois aussi les semi-conducteurs selon les technologies traitées.



Différents procédés ont été développés pour chacune de ces étapes (B1, C1, B2, C2) :

Technologie	Etape	Méthode 1	Méthode 2
c-Si Cristallin	B	Procédé thermique	Procédé mécanique
		Procédé chimique	Procédé chimique
	C	Procédé chimique	Donnée non disponible
		Procédé électro-chimique	
CM Couches Minces	B	Procédé thermique	Procédé chimique
		Procédé chimique	
		Procédé physique - laser	
		Procédé électro-chimique	
	C	Procédé thermique	Procédé mécanique
		Procédé confidentiel de REVATECH	
		Procédé chimique	
		Procédé mécanique	
C	Procédé électro-chimique	Procédé thermique	
	Procédé hydro-métallurgique		

Note : les procédés en gras sont les plus matures pour une fonction donnée

Source : RECORD / ENEA Consulting

La tendance générale observée jusqu'à aujourd'hui est le développement de technologies innovantes par le biais de la méthode 1 puis le développement à l'échelle industrielle de la même technologie en suivant la méthode 2.

- **Pour les technologies cristallines**, le procédé mécanique de recyclage du verre est adapté à un recyclage de masse permettant la récupération du verre et du cadre en aluminium principalement, au dépend toutefois des semi-conducteurs, pas ou peu valorisés. A contrario le procédé thermique de délaminage montre des performances élevées mais implique des coûts opératoires énergétiques encore importants. En raison de la baisse des cours du silicium, les semi-conducteurs ne sont plus valorisés, malgré l'existence de technologies matures de valorisation ou de recyclage au niveau de pureté du silicium solaire (5N).
- **Pour les technologies en couches minces**, les procédés chimiques de lixiviation et de corrosion chimique se sont révélés performants pour recycler le verre à un niveau de pureté élevé et au moins 95% massique des semi-conducteurs. Le recyclage des métaux stratégiques est dans la plupart des cas sous-traité à des centres spécialisés.

3.3 Conclusions sur les avancées technologiques

La principale limite du recyclage des modules cristallins rencontrée aujourd'hui est d'ordre économique, la séparation et valorisation du silicium de manière rentable restant un défi. En effet, le peu d'acteurs ayant réussi à séparer le silicium ne parviennent pas à ce jour à rentabiliser l'activité de purification en vue d'une réutilisation du silicium dans l'industrie photovoltaïque. Les projets présentent généralement un CAPEX relativement faible et des OPEX élevés. Bien que les quantités de modules cristallins à disposition soient plus élevées, le nombre de projets de recherche et de développement de pilotes reste limité comparé à l'activité déployée pour le recyclage des couches minces. La rentabilité d'une installation de recyclage des technologies cristallines pourrait s'améliorer avec le développement des technologies permettant la récupération de l'argent et la valorisation des wafers. De plus, la synergie avec les déchets issus de la production, qui consiste en le recyclage du silicium sous formes variées (lingot, wafers, cellules, ...), est maintenant difficilement applicable et à faible valeur ajoutée depuis que le recyclage des cellules de silicium issues des modules en fin de vie n'est plus pratiqué (wafers plus fins).

A contrario, le recyclage d'un module en couches minces à l'échelle industrielle est faisable s'il est broyé en amont des étapes de séparation. Cependant, le contexte de faible gisement ralentit le passage à l'échelle industrielle. Aux défis technologiques qu'imposent les infimes quantités de métaux stratégiques et/ou toxiques s'ajoutent les contraintes réglementaires concernant les métaux dangereux. Les doses d'impuretés dans le verre et dans les effluents liquides ou solides étant réglementées, le principal objectif du recyclage des couches minces est d'optimiser les coûts encore aujourd'hui très élevés tout en limitant les impacts environnementaux.

Enfin, les technologies de modules photovoltaïques étant en constante évolution (composition, méthode de fabrication, épaisseur des semi-conducteurs, composants variés, ...), l'industrie du recyclage doit pouvoir s'adapter à ces variations technologiques. Dans ce contexte, la sensibilité des procédés aux types de modules est un facteur déterminant de viabilité économique. En outre, des centres de recherche travaillent au développement de modules photovoltaïques recyclables : Le principal point d'attention de cette approche « *du berceau à la tombe* » concerne la modification ou le remplacement de l'encapsulant. L'émergence sur le marché de ce type de technologies est donc à prévoir dans les années à venir.

4. ANALYSE ORGANISATIONNELLE DE LA FILIERE

Les programmes de recherche sur les méthodes et technologies de recyclage ont commencé dès le début des années 1990 et ont abouti à la mise en œuvre d'un premier procédé pilote de recyclage en 2003 par le précurseur Solar World. L'intensification et la diversification des projets de recherche s'accompagnent d'une prise de conscience des institutions, des producteurs et des utilisateurs de l'importance du recyclage, traduite par :

- la mise en place volontaire de systèmes mutualisés de collecte et de recyclage par les producteurs de modules PV (PV CYCLE, CERES) ;
- l'évolution de la réglementation sur la gestion des déchets photovoltaïques ;
- l'exigence des utilisateurs d'inclure la désinstallation et les frais de recyclage dans les contrats d'installation de systèmes solaires ;
- l'inclusion de la phase de recyclage dans les Analyses de Cycle de Vie des modules PV ;
- l'utilisation du programme de recyclage comme argument marketing auprès des utilisateurs ;
- l'engagement de certaines associations pour la défense de l'environnement en faveur du recyclage des modules photovoltaïques (SVTC, BNL, APESI...)
- l'organisation de conférences spécifiques à ce sujet (EPIA & PV CYCLE, IEEE).

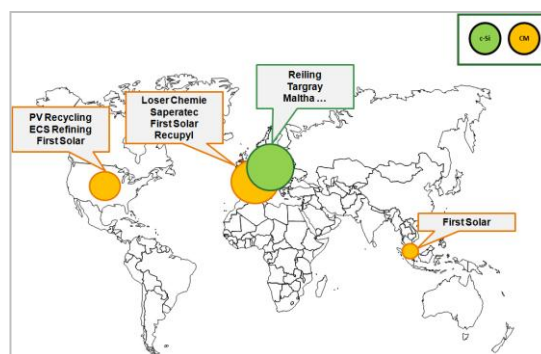
4.1 Types de recycleur

On constate une nette intensification des activités dans la filière depuis 2010, traduite par le développement de nombreux projets pilotes. Ce phénomène s'accompagne de la diversification des types d'acteurs investis dans cette filière de recyclage, et des pays impliqués. Six classes de recycleurs sont identifiées et caractérisées selon leur cœur de métier d'origine, qui leur procure des avantages et des faiblesses propres face au défi de la mise en œuvre d'une filière de recyclage :

- recycleur initialement producteur de modules PV
- recycleur initialement producteur d'un produit autre qui requiert des matières premières contenues dans les modules PV
- recycleur initialement chargé du prétraitement de matières premières de modules PV
- recycleur initialement recycleur de déchets spécifiques similaires aux modules PV (filiales de recyclage connexes)
- recycleur initialement recycleur de DEEE qui étend son catalogue de produits acceptés
- expert scientifique dont le domaine est commun à celui du procédé de recyclage.

Alors que PV CYCLE développe activement un réseau de recycleurs aptes à traiter des modules en fin de vie de manière efficace (5 sont dès aujourd'hui en passe de maîtriser leurs performances de recyclage sur des modules en fin de vie), d'autres entrepreneurs indépendants industrialisent leur procédé pilote, et des centres de recherche investissent massivement pour la mise en œuvre d'unités industrielles à long terme.

De plus, dans le contexte actuel où d'importantes recherches ont abouti à des résultats satisfaisant l'ensemble des réglementations et des conditions de rentabilité, le point de vue des experts de procédés opérationnels (First Solar et Solar Cycle par exemple) serait de commercialiser leur procédé à de nombreux autres acteurs.



Source : RECORD / ENEA Consulting

Aujourd'hui, seules quelques entreprises représentent chacune des classes d'acteurs. Cependant, l'ensemble des entreprises dont le cœur de métier est identique à celui d'une de ces classes constitue de potentiels nouveaux entrants dans un avenir proche.

Tendances générales de l'ensemble des acteurs de filière

Les développeurs de technologies restent aujourd'hui frileux à l'investissement en raison d'un flux de déchets encore trop faible et peu maîtrisé, d'un marché photovoltaïque instable et enfin d'une concurrence marquée.

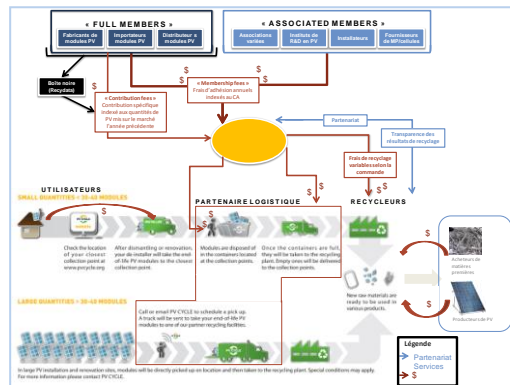
Un phénomène globalisé de surcapacité à horizon 2020 est cependant déjà à prévoir pour les couches minces autant que pour les modules cristallins jusqu'à l'augmentation significative future du gisement de modules en de vie (potentiellement prévue vers 2035).

4.2 Modes de financement du recyclage

Le recyclage des modules photovoltaïques est à ce jour un service payant et dont l'activité n'est pas auto-suffisante dans tous les cas d'application. Différents modes de financement du service de recyclage coexistent :

- **Recycleur payeur** : basé sur l'hypothèse que l'activité de recyclage sera économiquement viable (CERES) ;
- **Producteur payeur via un système de provisions systématiques** : concerne généralement les producteurs indépendants de tout organisme ayant un système individuel de recyclage (First Solar, Calyxo) ;
- **Producteur payeur via un système de cotisation à un organisme externe** (PV CYCLE, les éco-organismes) : application systématique prévue en Europe après la mise en application de l'amendement de la DEEE ;
- **Utilisateur payeur** : producteur n'ayant pas de programme de recyclage (PV Recycling).

En Europe, la plupart des producteurs photovoltaïques adhèrent à un programme volontaire de recyclage, proposé par PV CYCLE ou le CERES, et la majeure partie des modules en fin de vie sont drainés par ces deux associations. On observe depuis 2011 le déploiement rapide de larges réseaux européens de points de collecte et le développement de partenariats de recyclage. La future mise en application de la nouvelle révision de la DEEE annonce un tournant pour les organismes impliqués sur la collecte des modules en fin de vie.



Source : RECORD / ENEA Consulting

5. CONCLUSION

Le développement récent de solutions techniques de pointe pour le recyclage des modules photovoltaïques laisse présager un futur favorable pour le recyclage des déchets de la filière photovoltaïque. Le succès de cette activité est en partie conditionné à la capacité des acteurs du recyclage à adapter leur modèle économique, leur système administratif de traçabilité au cadre réglementaire local, ainsi que la taille de leur installation au volume transitoire de modules en fin de vie.

Eu égard aux difficultés de cette filière naissante, il apparaît que les facteurs clés de succès sont les suivants :

- Choix du gisement : assurer un gisement stable, via un système de collecte spécifique tel qu'un programme de recyclage individuel en boucle fermée, un partenariat avec des organismes de collecte, ou en bénéficiant de la synergie avec une autre filière de recyclage (filiale connexe ou déchets issus de la production).
- Choix de la technologie : privilégier un procédé faiblement sensible au type et à la qualité du module traité.
- Stratégie de limitation des investissements : en utilisant des installations de recyclage déjà existantes auxquelles sont apportées quelques modifications spécifiques pour l'adaptation au recyclage des modules photovoltaïques ou en privilégiant un investissement étagé :
 - en optant pour un recyclage centralisé dans un contexte de faible gisement puis, lorsque le gisement augmente, pour un réseau décentralisé d'unités de recyclage, via la dissémination de la technologie développée, à échelle plus réduite adaptée au gisement localisé ;
 - en négligeant le recyclage des composants faiblement concentrés ou à faible valeur ajoutée dans un contexte de gisement faible, puis en affinant le taux de recyclage de ces composants lorsque les volumes traités augmentent (exemple : traitement hydro-métallurgique des métaux stratégiques).

Le choix de la technologie, de la qualité de recyclage (pureté des composants sortants) et de la capacité d'une installation est un optimum entre trois principales variables mesurables : coûts du recyclage, besoins en ressources, et impact environnemental du procédé de recyclage.

AIM OF THE STUDY

To provide critical insight into the main issues surrounding the recycling of end-of-life photovoltaic modules, including an analysis of the technologies used, the identification of best recycling processes and the development perspectives of these processes according to the evolution of regulatory frameworks and the fluctuation of the photovoltaic market.

1. BASIS OF DESIGN

1.1 Photovoltaic's technologies

This study concerns end-of-life modules exclusively¹. A photovoltaic panel is a stack of laminated layers. Photovoltaic cells are made up of semi-conductors and metallizers, encapsulate (usually) with EVA² on both sides of its flat surface as well as protective layers (tedlar, glass...).

Photovoltaic modules are mainly composed of: glass (from 70 to 90 mass % depending on the technology) covered in an anti-reflection coating; organic compounds like EVA (about 5 mass %) which is the main technical barrier to overcome in recycling processes; strategic metals and toxic components (very small proportions).

Semi-conductors are usually the most valuable part of photovoltaic modules, given their nature and high purity level.

Photovoltaic technology is still dynamic in terms of its research and development, leading to continuous mutation of the technology's structure and composition, particularly in the case of thin film modules (2nd generation). This diversity in technological evolution from one manufacturer to another induces the development of tailor-made recycling processes.

1.2 Components and their specificities

1.2.1 Strategic metals

Main strategic metals include silver for crystalline technology, and indium, gallium, tellurium, cadmium, germanium and selenium for thin film technologies. Copper, lead, aluminium, tin and zinc are interesting to recycle because of their value, even though they are not subject to natural shortage.

Recycling priority of strategic metals according to their natural availability and utilization rate			
Time-line		Characteristics	Concerned Metal
Short term	5 next years	Rapid growth from the demand-side; Major supply-side stress; Moderate recycling restrictions.	Tellurium, Indium, Gallium
Mid term	Up to 2020	Rapid growth from the demand-side; Major recycling restrictions. OR Moderate supply-side stress; Moderate recycling restrictions.	Rare Earth (Lithium, Tantalum) Palladium, Platinum, Ruthenium
Long term	Up to 2050	Moderate growth from the demand-side; Moderate supply-stress; Moderate recycling restrictions.	Germanium, Cobalt

Source : Critical metals for future sustainable technologies and their recycling potential, UNEP – 2009

1.2.2 Toxic components

Most of current photovoltaic modules contain some toxic components like lead (in the junction box), mercury, cadmium (semi-conductors in CdTe modules), Hexavalent Chromium (AR-coating), PolyBrominated Biphenyl (PBB), PolyBrominated Diphenyl Ethers (PBDE) (fire-retardant) and fluorinated components (particularly in the plastic Back Surface Field). The maximum concentration values of these components, specific to the national regulatory framework, concern the product from the moment it is put on the market until it reaches its end-of-life state, including the substances generated from recycling process activity.

¹ « Photovoltaic module » defined here as the frame, the junction box, and the laminated photovoltaic panel; however it does not include the mounting structure, and photovoltaic system's additional electrical equipments.

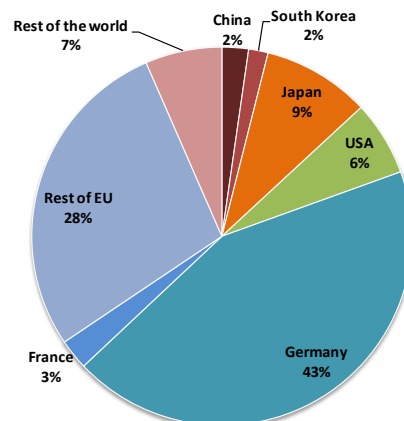
² EVA: Ethylene Vinyl Acetate
Etude RECORD n° 11-0912/1A

1.3 Economic context and photovoltaic market

The global geographic segmentation of the cumulated installed capacity in 2010 (in MWp) shows a general prevalence in Europe, and more specifically in Germany. However, it is Asia - mainly China - which produces the cells and photovoltaic modules.

The technological segmentation of the installed capacity differs according to each country. In Europe, the crystalline technology represents 86.1% of the market in 2010 and the thin films, mostly limited to professional installations, represents 11.9% (CdTe, CIGS and amorphous silicon: 5.3%, 1.6% and 5.0% respectively). Germany, the USA and Japan have the most developed markets for thin films.

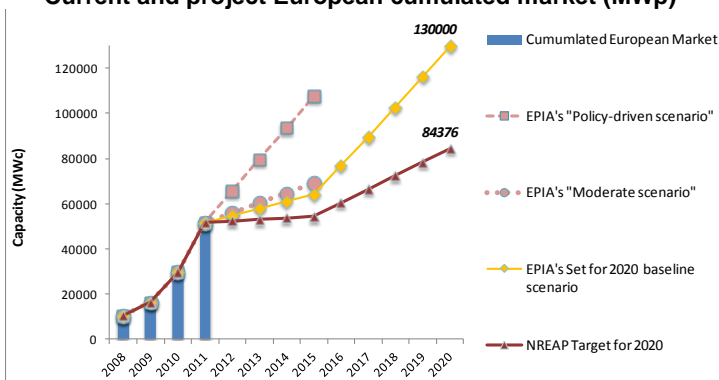
The WEEE defines end-of-life modules from ground-based solar plants as professional waste, and built in photovoltaic modules as household waste. Given that household waste streams are more complex to collect, the application segmentation of the market has been studied as well. Most of the countries have a general prevalence for built in photovoltaic modules and therefore tend to require an enhanced collection system. However, this tendency is not true for some countries, like Japan, South Korea, Slovakia and Portugal who almost exclusively use subsidy systems favouring ground-based solar plants.



Source: RECORD / ENEA Consulting, according to EPIA data : *Global Market Outlook for Photovoltaics until 2015*

The comparison of photovoltaic market forecast scenarios made by the EPIA and the European Union (NREAP) underlines the conservative trend of NREAP (low hypothesis) and the moderate trend « Set for 2020 – Baseline Scenario » of EPIA (high hypothesis). The comparison of these two scenarios gives an estimation of installed power in Europe, used as the basis for establishing forecasts of weight of end-of-life photovoltaic modules to be recycled from 2015 (typically ~3 200/year in Europe) to 2045 (typically ~960 000 tons/year in Europe).

Current and project European cumulated market (MWp)



Source : RECORD / ENEA Consulting according to *Global Outlook of PV market until 2015*, EPIA and *Renewable Energy Projections as Published in the National Renewable Energy Action Plans of the European Member States NREAP Targets for 2020*, EEA 2011

1.4 Regulatory framework on the management of end-of-life modules

Nowadays, only two regions in the world are in the process of establishing a specific law for the management of end-of-life modules:

- **The European Union:** the inclusion of photovoltaic modules into the scope of the WEEE (European approbation in August 2012 opens the path to national applications; expected to be applied in France by mid-2014).
- **California:** the *E-waste recycling Act* includes in its scope any photovoltaic modules which are considered as « hazardous », in accordance with the TCLP test³.

In both cases, the regulation includes the establishment of the Extended Producer Responsibility (EPR) principle. National recycling programs have been privatized (USA) or completely nationalized (China) according to the framework directives and the country's preferred behaviour. The principle of

³ Toxicity Characteristic Leaching Procedure: chemical analysis simulating landfill leaching process in order to check if hazardous or not.

EPR is also applied in India and China, solely for dangerous waste but could include photovoltaic modules in their field of application, in the long term.

For the countries which do not present specific regulatory frameworks for photovoltaic waste streams, treatment is regulated by global directives for waste treatment (recycling rates and operating conditions) where they exist. If not, the general directives on health, security and environment are the only effective regulations. The content (recycling rates, exportation rates) and the mode of application (privatized or nationalized) of these regulations vary from one country to another.

1.4.1 WEEE European Directive

The WEEE regulates the collection, treatment and disposal of electrical and electronic equipment waste. It also formulates the conditions on product design, right from the design stage, in order to integrate the full life cycle of the product, including recycling. The WEEE applies EPR principle through some eco-organisms and/or individual systems. Minimum recycling and valorisation target rates are also defined, starting from the national application of the new WEEE directive onwards: 65% and 75% respectively during the first three years of application, then 70% and 80% respectively the three following years, and 80% and 85% respectively, from six years after the date of application.

Establishment of WEEE in France:

Two scenarios could be possible in France:

- Photovoltaic modules get the status of specific recycling sector
- Photovoltaic modules get the status of a generalist recycling sector

The orientation towards one these two scenarios relies mainly on the willingness and capacity of producers to gather together and establish a specific eco-organism. The technological specificity of recycling photovoltaic modules could contribute to the creation of a specific recycling sector. It should be noted that the inclusion of photovoltaic modules on the list of global WEEE products could have a negative impact on recycling performance. This is because, on the whole, mixing waste streams of various natures makes the recycling process more difficult and less efficient.

1.4.2 Component regulations

Regulation of Hazardous Substances (RoHS)

Hazardous products production and end-of-life management are subjected to the same health and safety measures. Detoxification is a compulsory preliminary step of any hazardous waste treatment in order to be able to market the resources obtained from recycling activities, according to RoHS.

CdTe thin films photovoltaic modules contain a higher cadmium rate than the maximum limit established by RoHS European directive. However, as it is included in the exempt product list, CdTe modules are not subjected to RoHS regulation.

Regulation on chemical utilization

In Europe, the articulation of the REACH⁴ directive within the *European Waste Framework Directive* is still under debate. This directly depends on the definition of the conversion from waste status to product status. End-of-life modules are currently considered as waste; they are not subjected to REACH directive. However substances obtained from waste recycling are considered as products, and need to be declared if the nature of the substance differs from its original form.

⁴ REACH: Registration, Evaluation, Authorisation and restriction of CHemicals
Etude RECORD n° 11-0912/1A

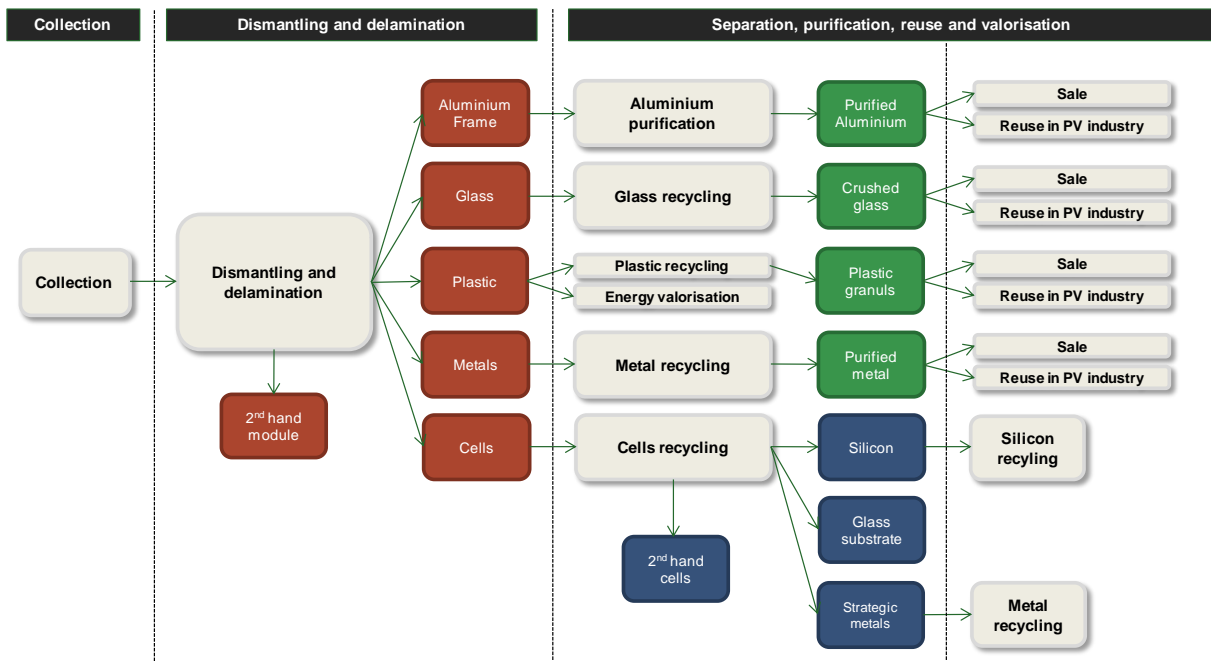
2. THE PHOTOVOLTAIC RECYCLING SECTOR

2.1 Various treatment options of photovoltaic wastes

- **Reuse:** the second-hand market, which already exists in China, South America and Africa, might emerge in Europe in the next few years, and almost certainly will in developing countries.
- **Repair and reuse:** this promising option has not been properly explored given that the most common encapsulating materials (EVA) prevent the modules from being repaired.
- **Reuse some of the components:** this treatment option has been explored by many various research programs, particularly the reusability of silicon wafers from end-of-life modules. However until now this option has shown itself to have a low economical viability in comparison with large scale crushing processes.
- **Recycling:** this option involves the separation of the modules into homogeneous and reusable parts into their various fractions. Recycling is currently the main option chosen by the various stakeholders.
- **Recovery:** on the whole this remains unexplored as a treatment method, used only when there are no other recycling facilities available. The main options tested up to now include the incineration of the polymers or the use of modules as aggregates for metallurgical melting furnaces.
- **Household waste treatment:** in this case, the end-of-life photovoltaic module waste is mixed to global household waste streams. This option is now forbidden.

2.2 The division of the sector by its core activities

The photovoltaic modules recycling sector can be broken down into sections, as represented in the following chart:



Source : RECORD / ENEA Consulting

2.3 Options for recycling and valorisation of components

VALORISATION OF SUBSTANCES OBTAINED FROM RECYCLING	
Component	Recycling and valorisation
Galss	Flas glass industry / photovoltaic industry Galss wool industry Construction
EVA	Reuse in chemical industry Energy recovery from incineration
Semi-conductor (Si)	Wafer with initial efficiency for the production of quality PV cells Reduced efficiency wafer for the production of low quality PV cells Reuse in photovoltaic industry as semi-conductor Use as aggregates for metallurgical melting furnace
Semi-conductor (thin films)	Reuse as pure as its original level Manufacturing of new photovoltaic cells
Strategic metals	Reuse as pure as its original level
Aluminum	Reuse as pure as its original level

Source : RECORD / ENEA Consulting

2.4 Characterization of the photovoltaic modules recycling sector

The key characteristics specific to the recycling sector are explained below:

- **Synergy with related recycling sectors⁵**: allows for economies of scale, economises on transportation cost, benefits from common infrastructure, economises on the development of new technologies (mainly cost reduction), and uses the lessons learnt from previous developments in other sectors.

SECTORS WITH SYNERGY			
Technology	Sector with synergy	Synergy tests results	Comments
c-Si*	Flat glass recycling	Positive	Maltha, Reiling : 2 industrial-scale projects, recycling rate between 75% and 95%
c-Si	Lamp recycling	Negative	1st trials = failure; But the compatibility of technologies were proven
c-Si + TF**	Household recycling	Negative	Forbidden by the EU Waste Framework Directive
c-Si	E-Waste	?	
TF	LCD screen recycling	R&D ongoing	Revatech
TF	Television recycling	Negative	Schott: different types of glass
TF	Recycling of metals-contaminated wastes	R&D ongoing	Revatech

* c-Si = Crystalline technology ** TF = Thin Film Technology

Source : RECORD / ENEA Consulting

- **Synergy with wastes from production**: it enables a recycling process to reach maturity and pre-establish a collection network with the long term objective of rolling it out across the recycling of end-of-life modules. This solution is mostly applied to the recycling process of thin films.
- **The quality of recycling (final purification of homogenous fraction)**: The purity level of the outgoing fractions in the recycling process varies depending on the process and the optimisation of the operating conditions. The final purity level of semi-conductors in particular is a determining criterion of the process performance.

⁵ Related sectors: recycling sectors whose wastes can be recycled together with the waste from the photovoltaic sector.

3. RECYCLING TECHNOLOGIES

3.1 Technological progress: figures and main trends

The activities in the sector over the last ten years show a sustained research effort initiated by the public sector (European commission, NEDO in Japan), and the private sector (photovoltaic modules manufacturers, hydro-metallurgists, glass recyclers, silicon recyclers, hazardous waste recyclers...).

The main recycling technical issues have thus finally been resolved.

The following has been identified in this study:

- 11 operational recycling process in 2012 in the world, including 4 pilots and 7 industrial scale processes;
- 7 recent research programs
- 2 manufacturer associations proposing a co-financed collection and recycling program specific to photovoltaic wastes;
- 11 pilot and industrial prospective projects, waiting for an appropriate waste stream volume.

The current recycling rate varies from 74% to nearly 100%. The complete report includes 23 process description forms and 28 synoptic forms from actors in the sector.

► Key information of the process

PROCEDE DE LOSER CHEMIE COUCHES MINCES [12]		
Nom du procédé	Procédé universel de recyclage de modules en couches minces	
Nom de l'entreprise d'exploitation	Loser Chemie	
Collecteurs	Clients directs + PV Cycle	
Technologies de modules traitées	Couches minces : CdTe, CIS et CIGS	
Zone d'implantation	Allemagne, Saax	
Niveau de maturité	En cours d'optimisation (consommation d'énergie)	
Performances du procédé	Taux de Recycle	Etat de pureté
Taux de recyclage global	Proche de 100%	
Coût moyen énergétique de recyclage	Faible et optimisation en cours pour réduction	
Coût moyen eau pour recyclage		
Impact environnemental	Important de par l'utilisation de produits chimiques et la contamination des eaux de rinçage au cadmium	
Caractéristiques		
Sensibilité au type de module		
Capacité	10 tonnes de cellules par an	
Volumes traités moyens		
Propriétés	Batch ; Non automatisé	
Main-d'œuvre opératoire	1 personne	

► Process inputs and outputs characterization

► Process diagram and description



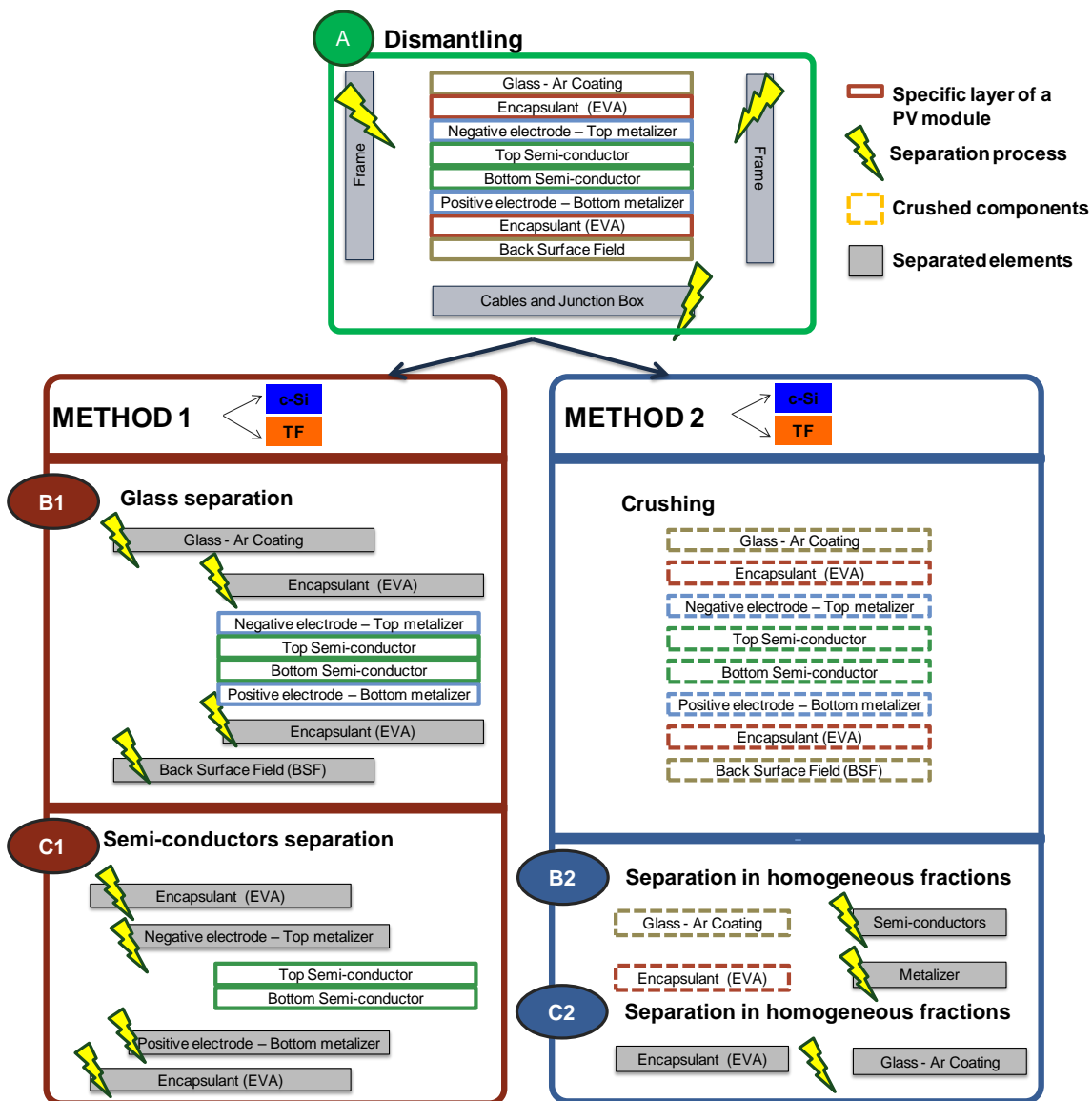
► Strength and weakness of the process

Avantages	Inconvénients
Universel : possibilité de traiter les couches minces CdTe et CIGS simultanément	Procédé incompatible avec les modules cristallins ou a-Si
Coût de recyclage revendiqué très concurrentiel (bas, mais coût confidentiel)	Impact environnemental encore inconnu (étude prévue en partenariat avec l'Université de Bâle)
Performances revendiquées très concurrentielles (proche de 100%)	Procédé non-automatisé (implique manipulation des modules CdTe démontés).
Breveté	

Source : RECORD / ENEA Consulting

3.2 Technologies segmentation

Within the variety of existing technologies and processes, two main recycling methods can be identified. The first one consists of the separation of the main mass fraction (glass) from the rest of the module by degrading the laminating properties of the encapsulating material. In this method, cells treatment (including the metallizer and encapsulating material residue separation and semi-conductor purification) is facilitated. The second method consists of dismantling the frame and junction box, crushing the module and separating various substances into homogeneous streams, even semi-conductors for high-performance process cases.



Source : RECORD / ENEA Consulting

Various processes have been developed for each steps of each method (B1, C1, B2, C2):

Technology	Step	Method 1	Method 2
c-Si Cristalline	B	Thermal process	Mechanical process
		Chemical process	Chemical process
	C	Chemical process	Data not available
		Electro-chemical process	
TF Thin Film	B	Procédé chimique	Chemical process
		Chemical process	
		Electro-chemical process	
		Thermal process	
	C	Chemical process	Mechanical process
		Mechanical process	
		Electro-chemical process	
		Hydro-metallurgical process	Thermal process

Note: Processes in bold script are the most mature within its step

Source : RECORD / ENEA Consulting

The broad trend observed up to now consists in the development of new innovative technologies through *Method 1* (batch processes mostly). Usually, in most cases, *Method 2* is employed for scaling up the pilot (of the same technology) into a continuous industrial process.

- **For crystalline technologies:** the glass recycling mechanical process has adapted to mass recycling, allowing the recovery of glass and aluminium frames. However it is at the expense of semi-conductors, which are not always recovered. On the other hand, the thermal process for delamination shows a higher performance, but it incurs high operating costs (energy consumption). Due to the recent drop in price for silicon, the semi-conductors are not worth recovering, despite the maturity of the recycling technologies (up to 5N purity).
- **For thin film technologies:** the leaching and chemical corrosion processes enable a high performance of glass recovery (high purity) and at least 95 mass % of the semi-conductors. Today, strategic metal recycling is mostly subcontracted to hydro-metallurgist specialists.

3.3 Conclusion on technological progress

The recycling of crystalline modules is still limited by economic barriers; the economically realistic separation and recovery of silicon remains a challenge. In fact, the few actors to be successful in the separation of silicon have to date not managed to make a profit from purification activities in order to reuse the silicon in the photovoltaic industry. The cost of investment (CAPEX) is generally considered to be relatively low, but the operation and maintenance costs (OPEX) are very high. Even though there are higher quantities of crystalline modules, the number of research and pilot projects remains limited in comparison to that of thin films. The profitability of the recycling facilities for crystalline technologies could be improved with the development of technologies allowing silver recovery and wafers valorisation. Moreover, the synergy with wastes from production, namely silicon scraps in various forms (ingot, wafers, cells, etc...), is hardly considered feasible as the recycling of silicon cells from end-of-life modules is not efficient, since the wafer's thickness has reduced.

In contrast to crystalline technology, the recycling of thin film modules by crushing the wastes before separating it into streams is economically feasible at the industrial stage. However, low waste streams slow down the development of pilot projects at an industrial stage. The high dilution rate of strategic metals creates a complex technological challenge, reinforced by a strict regulatory framework concerning hazardous metals. Taking into account that the amount of impurities in glass, liquids or solids effluents are strictly regulated, the main objective of thin film recycling is to optimise still elevated costs while limiting the environmental impacts.

Lastly, the photovoltaic modules technologies being continuously evolving (composition, production technique, semi-conductor thickness, components nature ...), the recycling industry needs to adapt to these technological changes. In that respect, the sensitivity of recycling processes to the module type is a key factor to determine their economic viability. Besides, research centres are developing recyclable photovoltaic modules: The main focus of this "well to wheel" approach concerns the modification or replacement of the encapsulating material. The introduction of these technologies on the market is likely to occur in the coming years.

4. ORGANISATIONAL ANALYSIS OF THE RECYCLING SECTOR

Research programs on recycling methods and technologies started at the very beginning of the nineties, and finally lead, in 2003, to the first pilot process by the pioneer Solar World. The current intensification and diversification of research projects has been accompanied by a growing sense of awareness by institutions, modules producers and end-users in the importance of recycling, shown through:

- the implementation of voluntary shared collection and recycling programs initiated by photovoltaic modules producers (PV CYCLE, CERES);
- the evolution of regulatory frameworks concerning the treatment of end-of-life modules;
- the request from the end-user to include the desinstallation and recycling costs of his solar panel in the installation contract;
- the inclusion of the recycling step (management of the end-of-life) in the global Life Cycle Analysis of photovoltaic modules;
- the use of the recycling programme as a marketing tool towards the end-user;
- the engagement by certain associations for the protection of the environment in the case of photovoltaic modules recycling (SVTC, BNL, APESI...);
- the organisation of specific conferences on the subject (EPIA & PV CYCLE, IEEE).

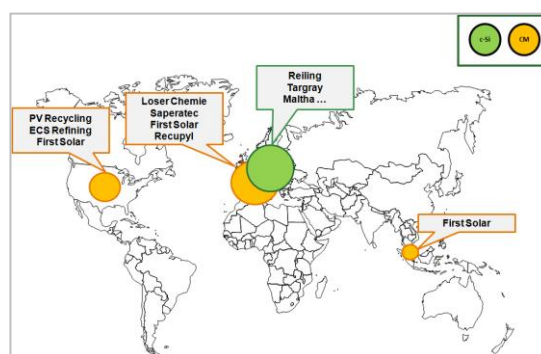
4.1 Different types of recyclers

One can observe the intensification of activities within the sector since 2010 through the development of numerous pilot projects. This phenomenon has been accompanied by the diversification of the type of actors implied in the recycling sector and the countries involved. Six groups of recyclers have been identified and characterised according to their original core activities, providing specific benefits and weaknesses with regard to the challenge of establishing a recycling sector:

- Recycler who initially produced PV modules
- Recycler who initially produced another product requiring raw materials included in photovoltaic modules
- Recycler who initially specialized in pre-treatment of photovoltaic raw materials
- Recycler who initially recycled specific (hazardous) waste in a related sector
- Recycler who initially recycled E-waste, and extends its products recycling list to include PV modules
- Scientific experts in the domain required for establishing PV modules recycling process.

While PV CYCLE actively develops a network of recyclers able to handle end-of-life modules in an effective manner (today 5 are considered to have mastered their recycling performance on the end-of-life modules), other independent entrepreneurs are scaling up their pilot process, and research centres invest massively in the establishment of long term industrial units.

Moreover, in the current context where important researches have been successful, with satisfactory results regarding regulatory and profitability requirements, the point of view of operational processes experts (First Solar and Solar Cycle, for example) would be to commercialise their process to a number of other actors.



Source : RECORD / ENEA Consulting

Today only some companies represent each of the classes of actors. However, all companies whose core business is identical to that of one of these classes represent potential new incomers in the near future.

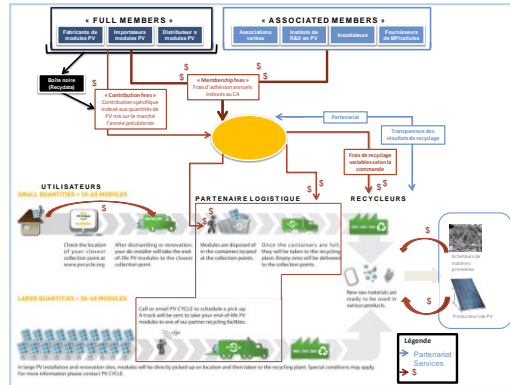
General trends of all industrial actors

Today the technology developers remain hesitant to invest since the waste streams are still too weak and yet to mature, the photovoltaic market is unstable, and lastly the competition is tight. However, a globalised phenomenon of overcapacity by 2020 is already forecast for the thin films and crystalline modules up to a significant increase in end-of-life modules quantities (potential forecast is around 2035).

4.2 Financing options for recycling

The recycling of photovoltaic modules is nowadays a paying service whose activities are not self-sufficient in all cases of application. Different modes of financing for recycling services coexist:

- **Recycler pays:** based on the hypothesis that the activities of recycling will be economically viable (CERES);
- **Producer pays via a system of regular provision:** generally refers to producers independent of any organisations who have a recycling system on their own (First Solar, Calyxo);
- **Producer pays via a system of contribution to an external agency (PV CYCLE, the eco-organisms):** systematic application expected in Europe after the implementation of the WEEE amendment;
- **User pays:** producer with no recycling programme (PV Recycling).



Source : RECORD / ENEA Consulting

In Europe most of the photovoltaic manufacturers subscribe to a voluntary recycling programme, proposed by PV CYCLE or the CERES, and most end-of-life modules are attracted by these two organisations. Since 2011 the rapid deployment across broad networks of European collection points and the development of recycling partners have been observed. The future implementation of the new revision of the WEEE heralds a turning point for the organisations involved in the collection of end-of-life modules.

5. CONCLUSION

The recent developments of advanced technical solutions for the recycling of photovoltaic modules point towards a favourable future for waste recycling within the photovoltaic sector. The success of these activities is in part conditioned by the capacity of the recycling actors to adapt their economic models, their administrative systems of traceability to local regulatory framework, and the size of their installations to the transitional volume of end-of-life modules.

Given the difficulties in this emerging sector, it would appear that the key success factors are the following:

- Choice of waste stream: insure the waste stream is stable through a specific collection system such as an individual closed-loop recycling programme, a partnership with collection agencies, or the benefits from a synergy with other recycling sectors (related sectors or waste from production).
- Choice of technology: favour a process with a low dependence on the type and quality of the module.
- Limitation strategy for investment: use of recycling facilities already existing, which are tuned in order to adapt for the recycling of photovoltaic modules, or favour a staged investment:
 - Opt for centralised recycling in the context of low waste streams, and then, when the waste streams increase, opt for a decentralised network of recycling facilities, via the dissemination of the developed technology at a smaller scale adapted to the local wastes;
 - Neglect the recycling of low concentration or low value components in the context of low waste streams, then refine the recycling rate of these components when the volumes increase (example : hydro-metallurgic treatment of strategic metals).

The choice of the technology, of the quality of the recycling (purity of output components) and of the capacity of installations is an optimum between three main measurable variables: cost of recycling, resources requirements, and environmental impact from the recycling process.