



Gestion et recyclage des modules photovoltaïques en fin de vie

Présentation de l'étude RECORD

Chloé DEVAUZE, In EXTENSO Innovation Croissance

Mariane IGHILHRIZ, consultante indépendante

Journée de restitution
| 23 novembre 2023 | Saint Denis



In Extenso

Innovation Croissance

**Gestion et recyclage des modules
photovoltaïques en fin de vie**

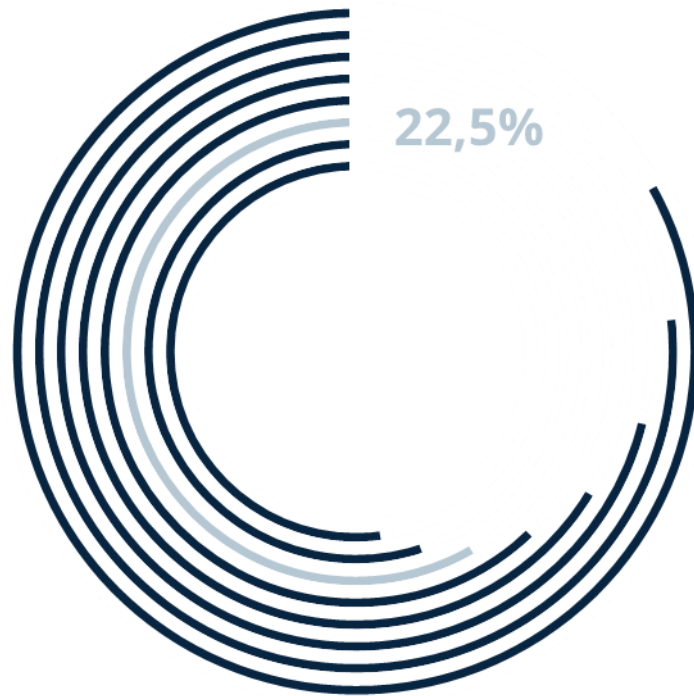
État de l'art et Prospective

Journée de Restitution RECORD - 23/11/2023

Trajectoires durables.

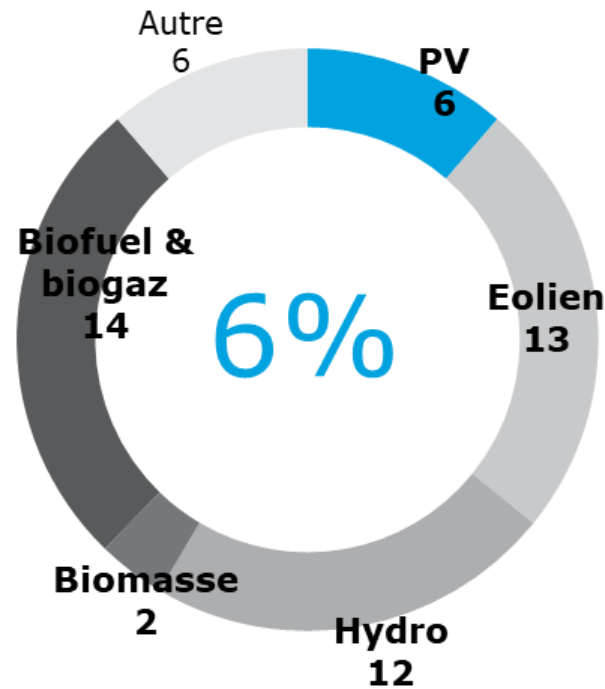
Contexte de l'étude

Les énergies renouvelables et le photovoltaïque



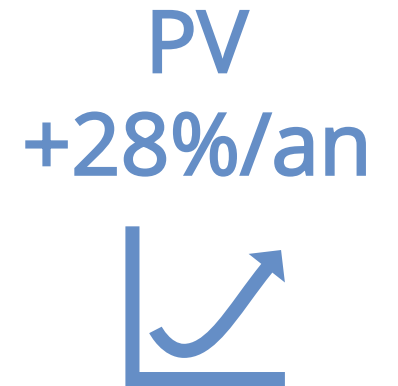
Part des énergies renouvelables dans la production d'électricité européenne en 2022

Source : EEA (2023)



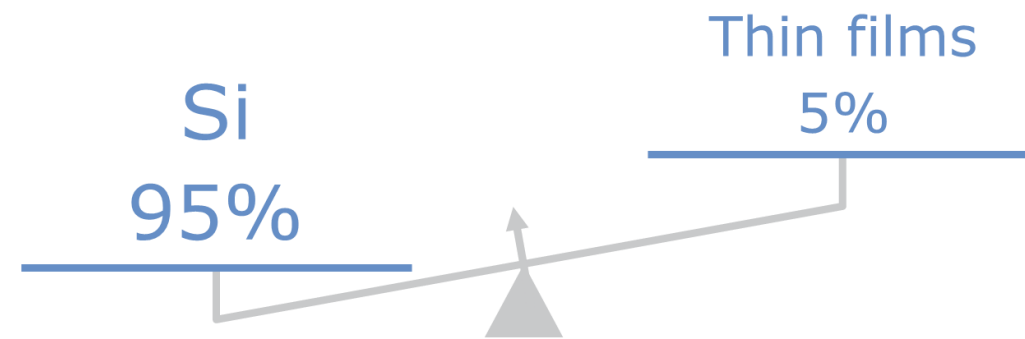
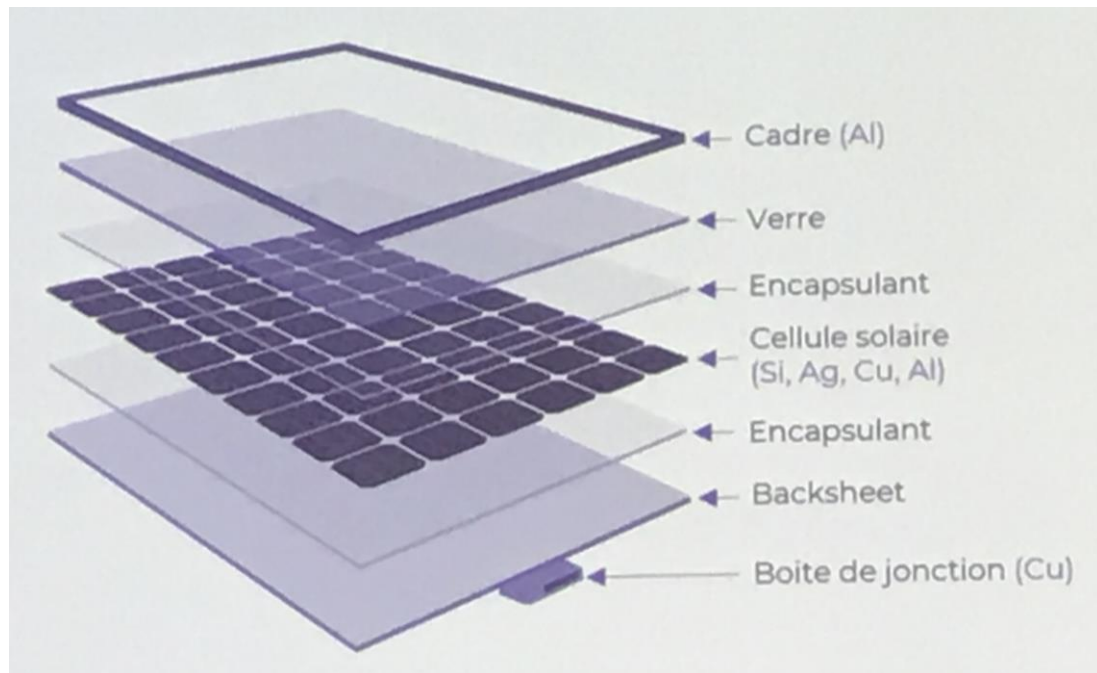
Répartition de la consommation d'électricité d'origine renouvelable en Europe en 2022

Source : EEA (2023)



Source : SolarPowerEurope (2023)

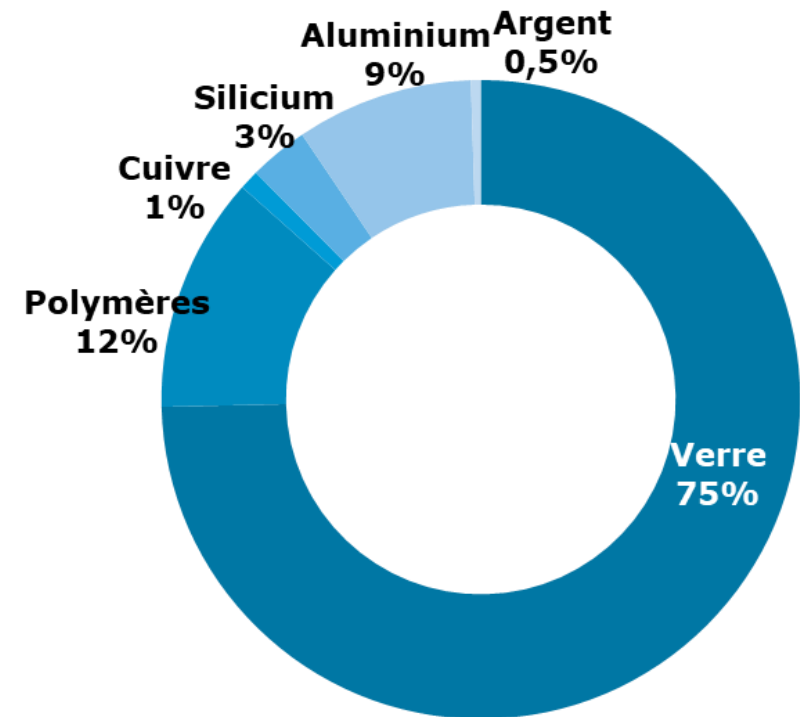
Les panneaux photovoltaïques et les différentes technologies de cellules



Pérovskite
CDTE^{CIS}
Monocristallin
Amorphe PERC^{CIGS} Bifaciale
Silicium
Quasimono
Polycristallin
Multijonction
Hétérojonction

Les principaux matériaux constitutifs des panneaux PV

- Aluminium du cadre
- Verre
- Métaux
 - **Cu** dans les câbles et connectiques
 - **Ag, Sn** dans les métalliseurs et composants électroniques
 - **Si, Cd, Te, In, Ga** dans le semi-conducteur
- Polymères dans les backsheets et encapsulants



Composition massique d'une cellule type silicium

Source : ACS (2022)

Enjeux stratégiques liés aux matériaux utilisés par le PV

Verre

Principal composant d'un module photovoltaïque (> 75 % massique)
Environ 32 Mt produit en UE par an, ce qui équivaut à sa consommation
Différents types de verre utilisés dans un panneau photovoltaïque

Aluminium

La forte concentration de production à l'étranger et la forte importance de cette ressource la placent dans la **liste des Matières Premières Critiques de l'UE**
Actuellement, plus d'un tiers de la consommation européenne en aluminium est satisfaite par le recyclage de déchets. Il est prévu qu'en 2050 soit atteint le seuil de 50 %

Silicium

La Chine représente 66 % production mondiale (2018)
La forte concentration de production à l'étranger et la forte importance de cette ressource la placent dans la **liste des Matières Premières Critiques de l'UE**
Taux de recyclage en fin de vie peu élevé car les traitements du silicium atténuent sa pureté

Cuivre

La forte importance de cette ressource et sa faible substituabilité la placent dans la **liste des Matières Premières stratégique de l'UE**
Taux de recyclage en fin de vie est à environ 55%

Argent

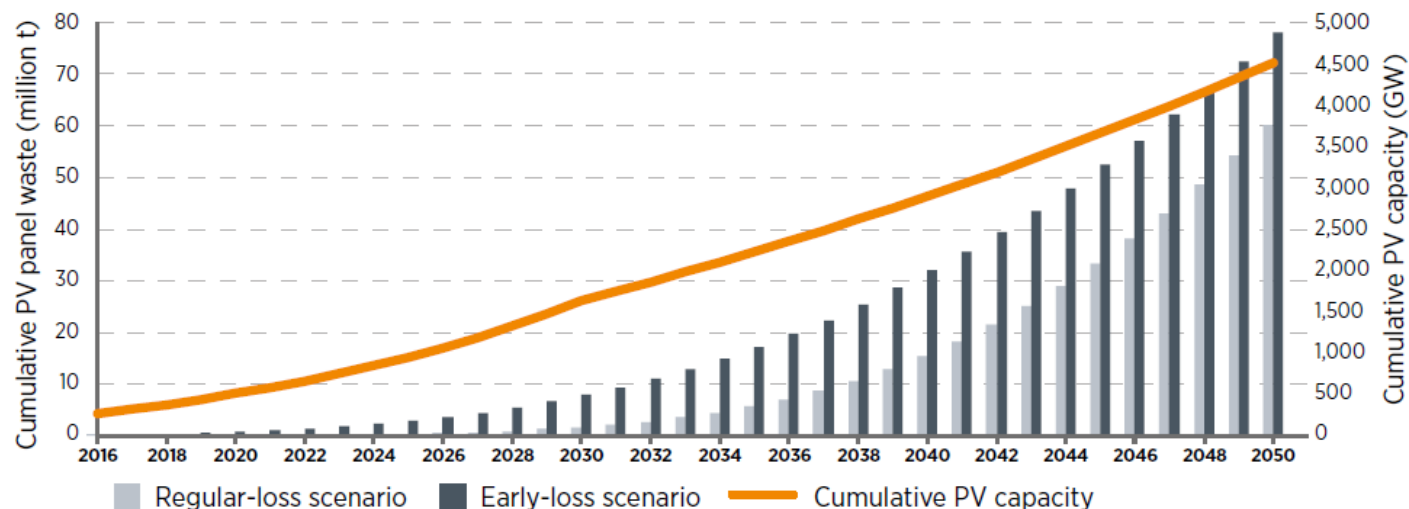
L'argent n'est pas qualifié de critique mais porte à lui-seul **près de la moitié de la valeur d'une cellule PV** alors qu'il représente moins de 1% de sa masse

Le recyclage : une opportunité à saisir sur nos territoires

- Forte augmentation du parc installé dans les prochaines années, ce qui implique une hausse des quantités de déchets de panneaux PV à traiter.
 - Avec une durée de vie moyenne de 30 ans des panneaux, de nombreux déchets devraient être produits d'ici le début des années 2030, en croissance exponentielle jusqu'à 2050
 - Pour la France, SOREN estime que le seuil des 50 000 tonnes collectées sera atteint en 2032.
- Dans les années à venir, les panneaux à collecter et à traiter resteront majoritairement les cristallins.

80 millions de tonnes
de déchets PV
en 2050

Figure 7 Estimated cumulative global waste volumes (million t) of end-of-life PV panels



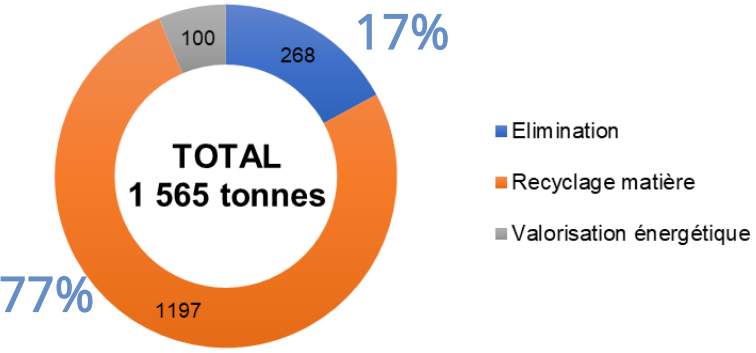
Estimation des volumes de déchets
de panneaux PV en fin de vie

Source : IRENA et IEA-PVPS

Recyclage actuel du PV en France

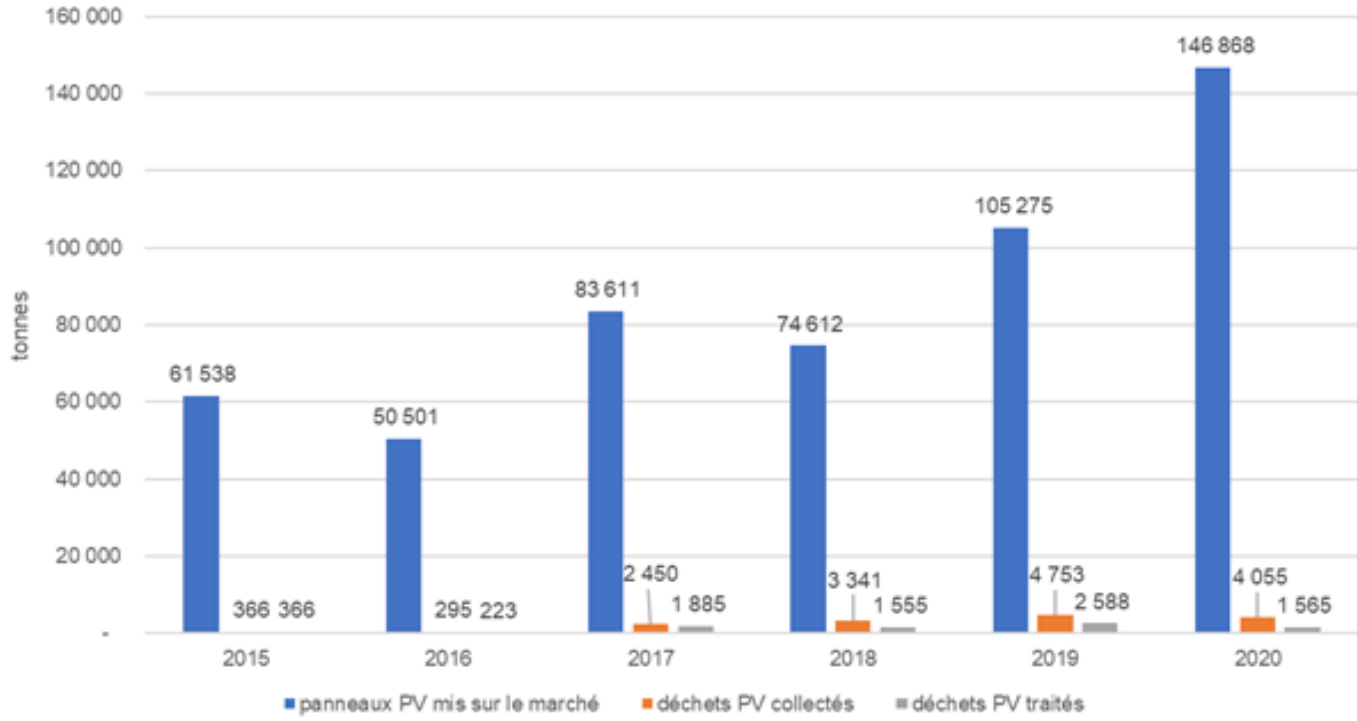
➤ **Les déchets issus de la filière photovoltaïque**

- ~4 kt de déchets de panneaux PV ont été collectés et 1,5 kt traités.
- Principalement destinés à un recyclage matière



Traitement des déchets PV par type en France en 2019

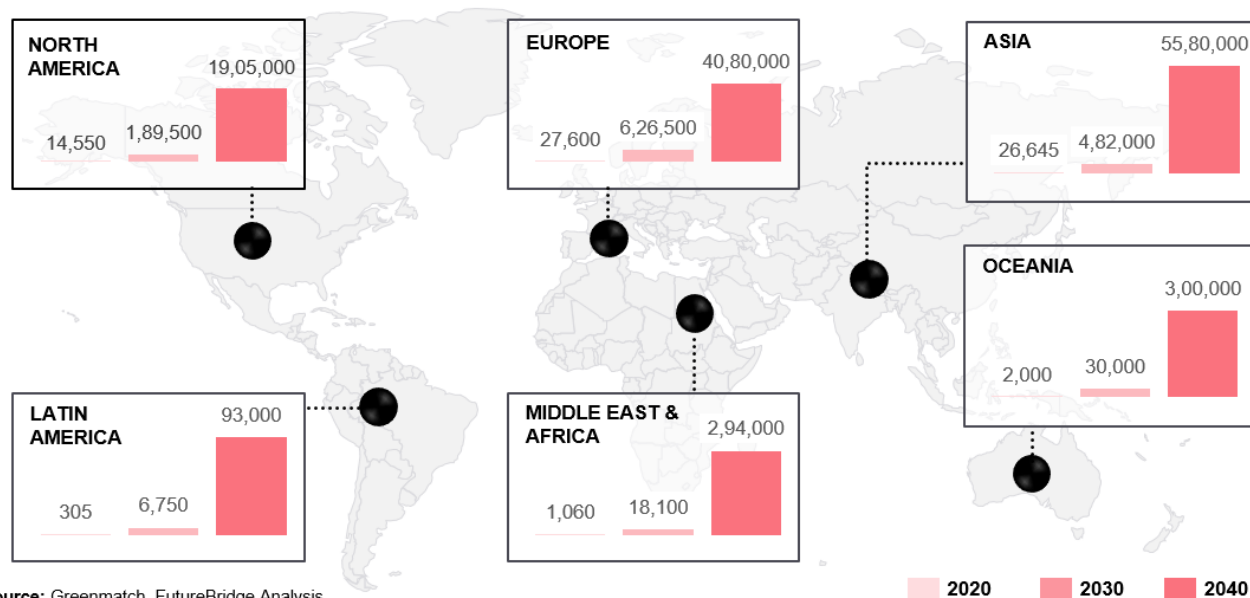
Source : ADEME, 2022



Quantité en tonnes de panneaux PV mis sur le marché et de déchets PV collectés et traités en France entre 2015 et 2020

Source : ADEME, 2021

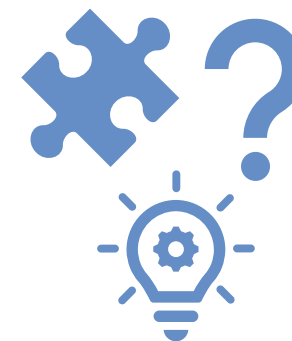
Un gisement encore timide qui explosera dans les prochaines années



Source: Greenmatch, FutureBridge Analysis

Quantités de déchets de panneaux PV en fin de vie à horizon 2020, 2030 et 2040

Source : futurebridge.com



Comment anticiper ce tsunami et être prêts à valoriser les matériaux présents dans les déchets PV afin de :

- Réduire l'extraction de ressources primaires
- Diversifier l'approvisionnement en Europe

Objectifs de l'étude

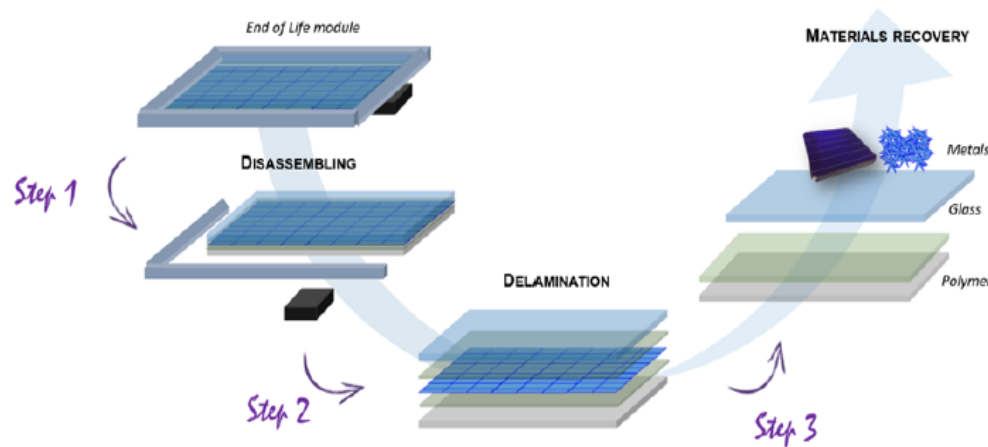
Panorama des technologies de démantèlement et recyclage des panneaux PV en fin de vie

➤ Objectifs de l'étude :

- Dresser un panorama des technologies existantes de démantèlement et recyclage des panneaux PV
 - Identifier les procédés de recyclage les plus prometteurs
-
- Environ 60 procédés de recyclage répertoriés
 - Principalement pour le Si (2/3)
 - Principalement au stade recherche (20% au stade industriel)
 - Une dizaine de procédés prometteurs analysés en détail

Panorama des technologies de démantèlement et recyclage des panneaux PV en fin de vie

Exemple d'étapes au sein d'un procédé de recyclage faisant intervenir différentes technologies



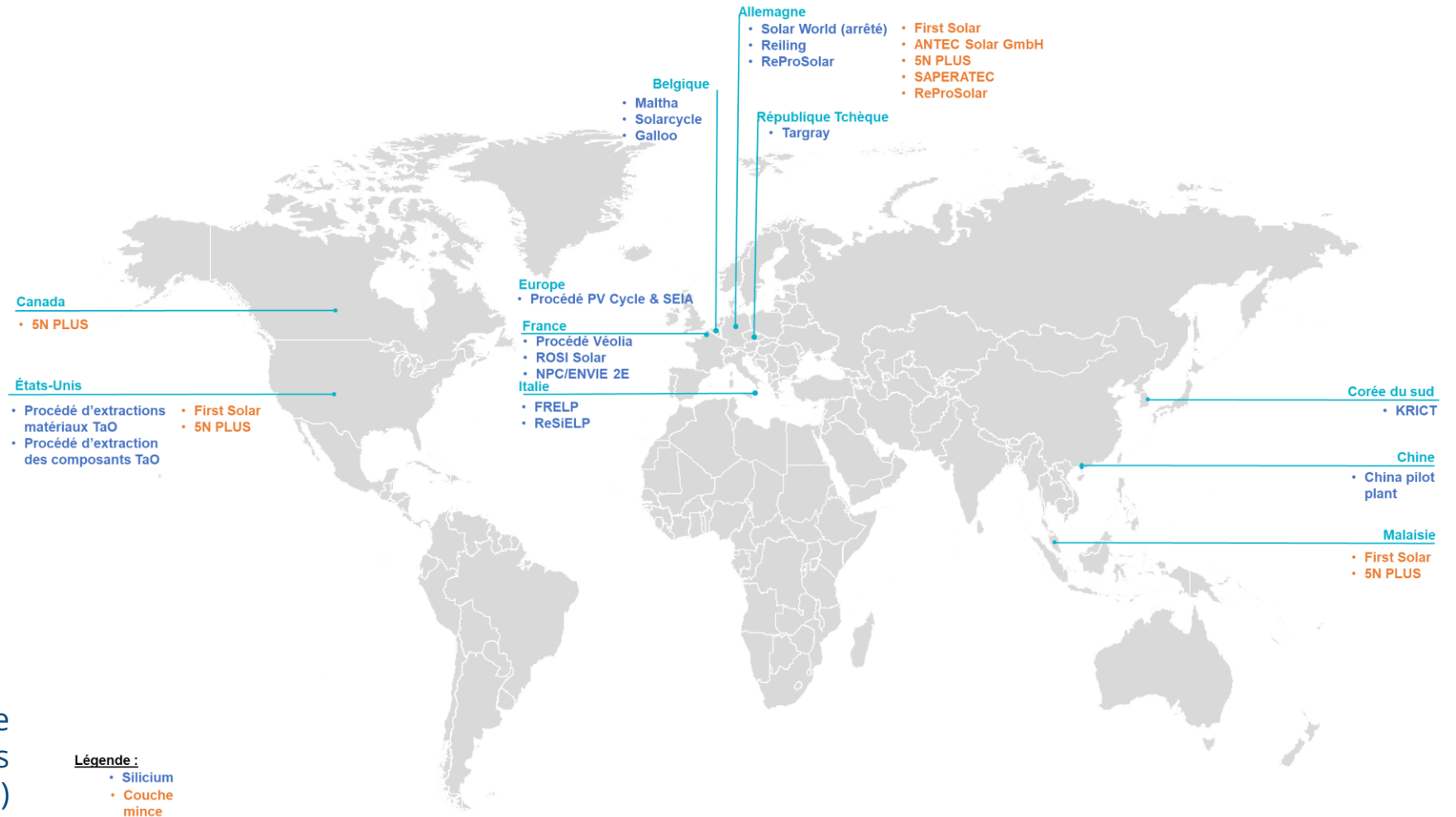
3 étapes :

- 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 PV, par délaminage par exemple : cette étape a pour objectif de séparer les différents constituants du sandwich constituant le module PV 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.

➤ Exemples de technologies de séparation :

- **Mécaniques** : broyage mécanique, séparation manuelle, séparation par filtration ou gravimétrie (densité), filtre à bande sous vide, tamis vibratoire, etc.
- **Chimiques** : traitement avec solvants organiques, acides ou bases, décapage
- **Thermiques** : chauffage, pyrolyse, cryogénie
- **Optiques** : séparation optique (laser)

Panorama des technologies de démantèlement et recyclage des panneaux PV en fin de vie



Unités de recyclage installées en 2022 (pilotes et industrielles)

Panorama des technologies de démantèlement et recyclage des panneaux PV en fin de vie

Procédés identifiés pour le traitement des modules à couches minces

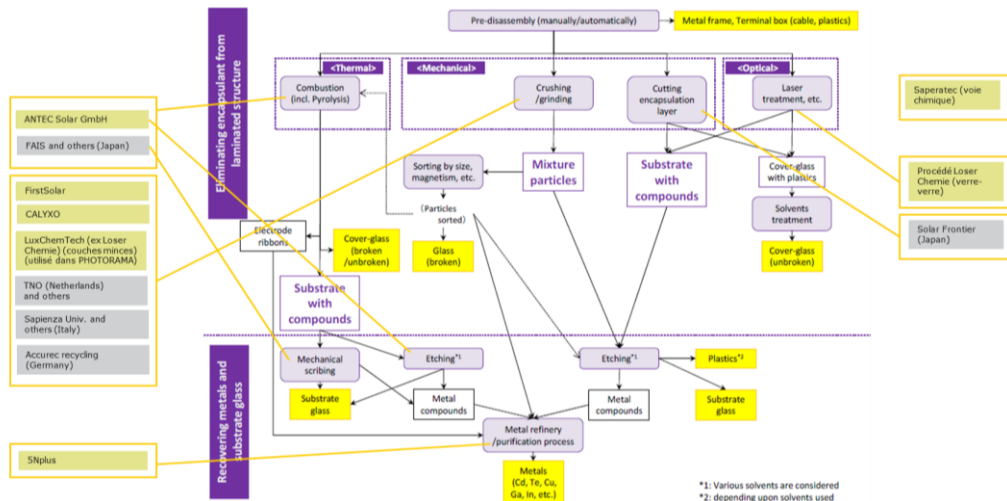


Fig. 3-9 Possible processes for compound PV module recycling

- Légende :
- Procédés présents dans la liste des principaux procédés de traitement élaborée lors de l'étude
 - Projets non analysés dans l'étude

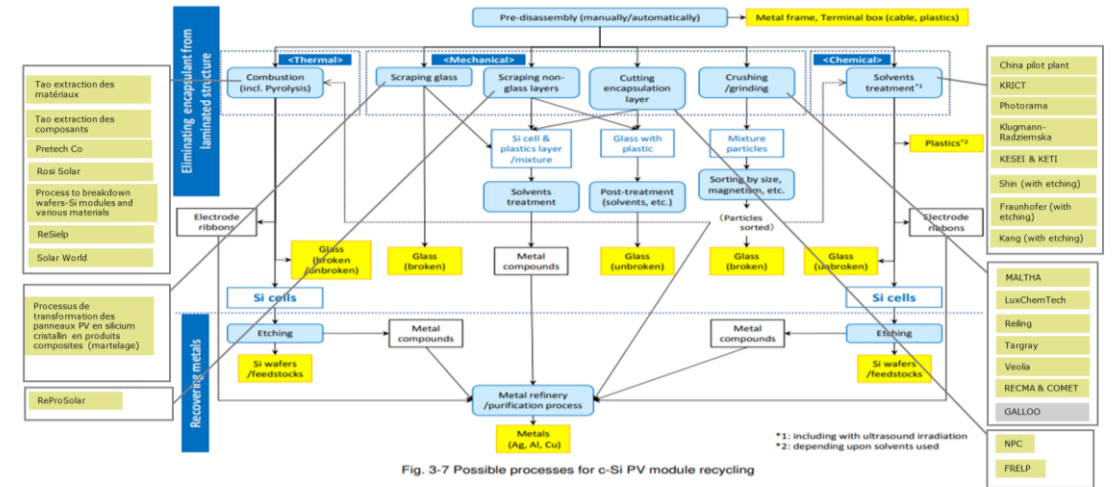


Fig. 3-7 Possible processes for c-Si PV module recycling

- Légende :
- Procédés présents dans la liste des principaux procédés de traitement élaborée lors de l'étude
 - Projets non analysés dans l'étude

Procédés identifiés pour le traitement des modules c-Si

Procédés de recyclage existants et prometteurs

➤ Critères de sélection :

- Technologie PV couverte
- Niveau de TRL et état d'avancement
- Valeur ajoutée des matériaux récupérés
- Valeur ajoutée du débouché
- Rendement de recyclage d'un matériau
- Récupération multi-matériaux
- Impact environnemental
- Facilité de mise en œuvre
- Pertinence géographique

➤ Procédés retenus :

- First Solar pour couches minces
- LuxChemTech
- ANTEC Solar
- Photorama
- NPC/ Envie 2E Aquitaine et ROSI Solar
- ReProSolar
- SolarCycle (Comet & Recma)
- FRELP
- Veolia
- Procédé Fraunhofer
- Procédé Klugmann-Radziemska

Procédés de recyclage existants et prometteurs

Procédé	Étapes couvertes et type de process			Technologies concernées
	1 - Désassemblage des modules	2 - Délaminage / séparation des fractions	3 - Extraction de matériaux et/ou purification	
ANTEC	Mécanique	Chimique	Thermique & Chimique	Couches minces CdTe / CDS des cellules en couches minces
ENVIE 2E	Mécanique	Mécanique		Silicium cristallin
ROSI			Thermique	Silicium cristallin
First Solar		Mécanique	Chimique	Couches minces : CdTe
Fraunhofer		Chimique		Silicium cristallin
FRELP	Mécanique	Mécanique	Chimique	Silicium cristallin
Klugmann-Radziemska	Chimique	Chimique		Silicium cristallin
Lux Chem Tech	Mécanique	Chimique	Électrolyse	Couches minces CdTe, CIGS and GaAs
PHOTORAMA	Mécanique	Chimique	Chimique	Silicium cristallin c-Si polycristallin et couches minces thin-film CIGS modules
ReProSolar		Mécanique & Chimique	Chimique	
Solarcycle	Mécanique	Mécanique	Chimique	
Véolia	Mécanique	Mécanique		

- Plusieurs briques technologiques par procédé
- Procédés spécialisés sur un type de PV
- Procédés récupérant plusieurs matériaux
- Downcycling, réutilisation ou revalorisation des matériaux récupérés
 - Construction, métallurgie, verrier, batteries, applications médicales,
 - Peu dans le secteur PV

Silicium

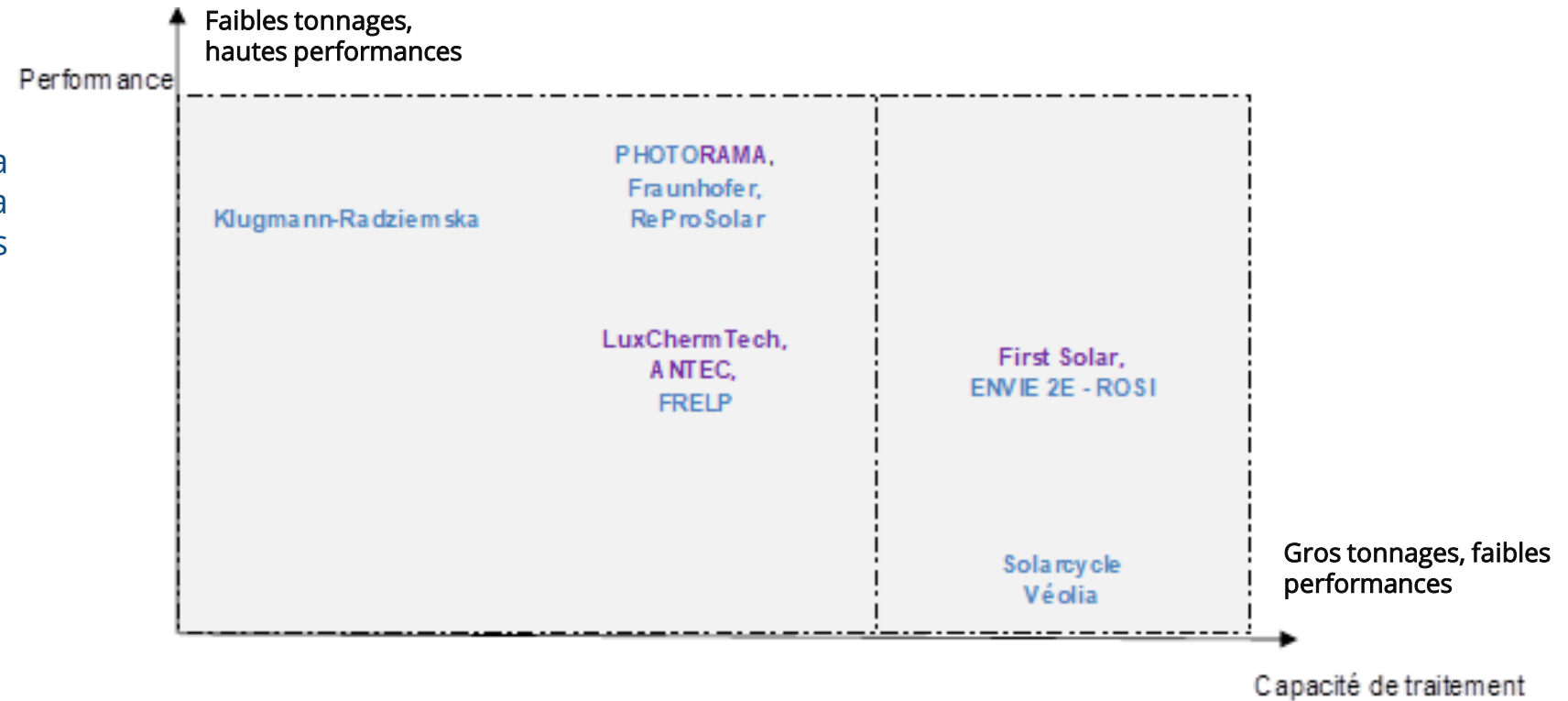
	Argent	Aluminium	Cuivre	Silicium	Verre	Plomb	EVA
ENVE 2E/ROSI							
Fraunhofer							
FRELP							
Klugmann-Radziemska							
PHOTORAMA							
REPROSOLAR							
Solarcycle							
Veolia							

Couche mince

	Argent	Aluminium	Cuivre	Verre	Semi-conducteurs	EVA
ANTEC						
First Solar						
LuxChem Tech						
PHOTORAMA						

Procédés de recyclage existants et prometteurs

Matrice comparant la capacité de traitement et la performance des procédés



- Besoin d'une quantité de déchets suffisante, régulière et facilement accessible
- Besoin d'automatisation de procédés répétitifs et contraignants
- Besoin d'un maillage géographique plus fin pour réduire les distances de transport

Des ambitions fortes et des capacités techniques

- Des procédés à maturité industrielle de plus en plus élevée, qui s'implantent et se développent en ayant comme ligne de mire l'augmentation future du gisement de déchets et la nécessité d'être prêts et efficaces pour l'exploiter au mieux
- Une volonté partagée de récupérer le maximum de matériaux constitutifs du panneau, avec une emphase sur le recyclage des matériaux mineurs mais à forte valeur ajoutée, afin de conserver cette valeur au sein de l'économie européenne

Mais des challenges à relever pour permettre un réel bouclage des flux par le recyclage

- Des possibilités réelles de bouclage des flux limitées du fait des enjeux de qualité des matériaux recyclés vis-à-vis des exigences des secteurs-débouchés
- Un besoin de compromis économique entre effort de recyclage fonctionnel de certains matériaux et réalité du marché
- Un risque de fuite des matériaux recyclés du fait de l'absence d'infrastructures industrielles capables de le réintégrer dans une chaîne de valeur en Europe
- La nécessité d'une stratégie européenne commune sur la sécurisation des chaînes complètes de production industrielle, et en particulier le PV, pour tirer parti des compétences techniques existantes sur le territoire en matière de recyclage des panneaux PV

In Extenso

Innovation Croissance

SOPHIA ANTIPOLIS – PARIS – LYON – MARSEILLE – MONTPELLIER
BORDEAUX – TOULOUSE – RENNES – NANTES

 **BOULOGNE-BILLANCOURT**

63 ter, avenue Edouard Vaillant
CS 80137
92517 Boulogne-Billancourt cedex

Tél: 04 93 65 49 80
contact@inextenso-innovation.fr

www.inextenso-innovation.fr

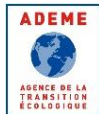
Les programmes
RECORD font l'objet
d'un soutien de l'ADEME



Journée de restitution RECORD

Présentation des derniers résultats issus de ses
programmes d'études et de recherche

Les membres de RECORD



23 novembre 2023,
SNCF, Saint Denis

