

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Blida-1

Faculté de Technologie

Département des Énergies Renouvelables



Mémoire présenté pour l'obtention de diplôme de Master

Option : Conversion photovoltaïque

Thème

Recyclage des panneaux photovoltaïques en fin de vie : Un enjeu économique et environnemental.

Présente par CHARIF Housseem Eddine Ahmed

RAHMANI Fella

Soutenu le 19 /06 / 2023 devant le jury composé par :

Monsieur	Lafer Abdelakder	MCB	Président
Monsieur	DOUMAZ Toufik	MAA	Examineur
Madame	ANAS BOUSSA Sabiha	MRA CRTSE	Promotrice
Monsieur	BOUZAKI Mohammed Mostapha	MCB	Co-promoteur

Année universitaire 2022/2023

Remerciement

Avant tout nous remercions DIEU le tout puissant de nous avoir donné la force et le courage d'entamer et de terminer ce mémoire.

Nous remercions notre Chef d'option Monsieur DOUMAZ Toufik.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu voir le jour sans l'aide et l'encadrement de notre promotrice Madame ANAS BOUSSAA Sabiha, on la remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, son aide pratique, son soutien moral et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.

Nous remercions notre co-promoteur Monsieur BOUZAKI Mohammed Moustafa.

Nous remercions le président de jury et les membres de jury d'avoir accepté de juger ce travail.

Nous remercions les enseignants du département des énergies renouvelables, qui ont participé à l'aboutissement de nos études.

Enfin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous ceux et celles qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration et la finalisation de ce mémoire.

Dédicaces

Du fond du cœur, Je dédie ce modeste travail à tous ceux qui me sont chers,

A ma très chère mère

Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il le doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.

A mon très cher père

Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager. Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.

A ma très chère Sœur Meriem

A mes cousines yasmine et Aya

A ma meilleure amie sirine

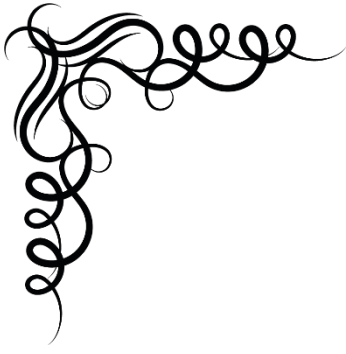
A toute ma Famille.

A tous mes amis

A l'ensemble des étudiants de la promotion

Master LMD/ ENR de l'année 2022/2023

Fella



Dédicace

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

A mes chères sœurs Asma, Takwa, Tasnim, Ghofren

A mon cher frère Abod

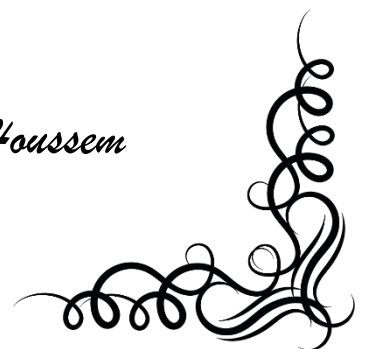
A toute ma famille

A toute mes amis et mes frères a la cite 6 chaqu'un et son nom

A tous ceux qui me connaissent de loin ou de près

Merci d'être toujours là pour moi.

Housseem



Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I	3
INTRODUCTION	3
I.1 Le phénomène photovoltaïque	3
I.2 Les principales technologies solaires photovoltaïques	4
1er. Les cellules en silicium cristallin	4
2e. Les cellules solaires à couche mince	5
3e. Les cellules solaires photovoltaïques organiques	5
I.3 Les filières au silicium	6
I.4 Processus de fabrication des systèmes photovoltaïques à base de silicium	7
I.4.1 Raffinage du silicium	7
I.4.1.1 De la silice au silicium métallurgique	8
I.4.1.2 Du silicium métallurgique au silicium solaire	9
1er. Voie chimique : procédé Siemens	10
2e. Voie métallurgique Procédé Elkem	10
3e. Le projet PHOTOSIL.....	11
I.4.2 Fabrication des plaques, cellules et modules photovoltaïques	12
I.4.2.1 Cristallisation du silicium et mise en forme des plaques	13
I.4.2.1.A Silicium monocristallin	13
I.4.2.1.B Silicium multi cristallin (mc-Si)	13
I.4.2.2 Fabrication des cellules	16
I.4.2.3 Assemblage des modules	17
I.4.2.3.A Composants d'un module PV	17
I.4.2.3.B Raccordement des cellules	18
I.4.2.3.C Encapsulation	18
I.4.2.3.D Encadrement et connexion des boîtes de jonction	18
I.4.2.3.E Flesh test	19
I.5 Marché photovoltaïque mondial	20
I.5.1 Evaluation des installations annuelles	20
I.5.2 Capacité installée cumulée dans le monde	21
I.6 Marché photovoltaïque Algérien	21
CONCLUSION	24
CHAPITRE II	26
INTRODUCTION	26
II.1 Caractérisation des déchets issus de la filière photovoltaïque	26
II.2 Causes de fin de vie des panneaux photovoltaïques	27
II.3 Evaluation des quantités PV en fin de vie	28
II.4 Filière de recyclage	29
II.5 Le recyclage des modules photovoltaïques par type de technologies	29
II.5.1 Les modules à base de silicium cristallin	29
II.5.2 Les technologies couches minces	30

II.6 Les méthodes de recyclage	30
II.6.1 Techniques de séparation	31
II.6.1.1 Le traitement mécanique.....	31
II.6.1.2 Le traitement thermique.....	31
II.6.1.3 Le traitement chimique.....	33
II.6.1.4 Le traitement physique	34
II.6.2 Méthodes de recyclage des panneaux photovoltaïques dans le monde	35
II.7 Contexte réglementaire du recyclage de panneaux photovoltaïques en fin de vie ...	36
II.8 Industries de recyclage des panneaux photovoltaïques	37
II.9 Etude économique du recyclage des panneaux photovoltaïques	39
II.10 Etude environnementale du recyclage des panneaux photovoltaïques	42
CONCLUSION	46
CHAPITRE III	48
PARTIE EXPERIMENTALE.....	48
METHODOLOGIE.....	48
III.1 Le traitement mécanique.....	49
III.1.1 Démantèlement et séparation	49
III.2 Le traitement thermique	51
III.2.1 Séparation des composants du panneau	54
2e. La spectroscopie de photoélectrons XPS (X-ray photoelectron spectroscopy)	
.....	57
3e. Microscopie électronique à balayage (MEB)	58
III.3 Le traitement chimique.....	60
CONCLUSION	63
CONCLUSION GENERALE	64

Liste des figures

Figure I-1 : le fonctionnement d'un panneau photovoltaïque	4
Figure I-2 : les principales technologies solaires photovoltaïques.....	6
Figure I-3 : Répartition des différents matériaux sur le marché photovoltaïque	6
Figure I-4 : les étapes de fabrication d'un système photovoltaïque.....	7
Figure I-5 : le quartz (CRTSE).....	8
Figure I-6 : Le Sable (CRTSE).....	8
Figure I-7 : Four de production de silicium métallurgique	9
Figure I-8 : Le silicium solaire métallurgique (SG-Si)	9
Figure I-9 : Procédés Siemens	10
Figure I-10 : Silicium Polycristallin	10
Figure I-11 : Elkem solar silicon production processus	11
Figure I-12 : Filière du silicium pour le photovoltaïque ; a gauche la voie chimique en phase gaseuse et a droite la voie métallurgique explorée par le projet PHOTOSIL	12
Figure I-13 : Enchaînement des étapes de fabrication d'un module photovoltaïque a base de silicium cristallin	12
Figure I-14 : Principe du procédé Czochralski	13
Figure I-15 : Lingot cylindrique de silicium monocristallin	13
Figure I-17 : Cristallisation d'un lingot multi cristallin par solidification	14
Figure I-16 : Lingot de silicium multicristallin 40 cm x 40 cm x18 cm (CRTSE).....	14
Figure I-18 : la découpe de lingot de silicium multi cristallin (AES-CRTSE)	15
Figure I-19 : La toile métallurgique d'une scie utilisée au CRTSE	15
Figure I-20 : Plaquette de silicium à gauche monocristallin et à droite multi cristallin (CRTSE).....	16
Figure I-21 : Cellule solaire au silicium cristallin.....	16
Figure I-22 : Câblage des cellules solaires (CRTSE)	18
Figure I-23 : Structure du module photovoltaïque	18
Figure I-24 : Boîte de jonction (CRTSE)	19
Figure I-25 : Caractéristiques électriques de la cellule et du module photovoltaïque en conditions standards ...	19
Figure I-26 : Module PV (CRTSE)	19
Figure I-27 : Evolution des installations photovoltaïques annuelle	20
Figure I-28 : Marché photovoltaïque mondial	20
Figure I-29 : Evolution Mondiale des installations photovoltaïques cumulés	21
Figure I-30 : Programme de développement des énergies renouvelables	22
Figure I-31 : Projet de 343 MWc en centrales photovoltaïques	22
Figure II-1 : Les déchets issus de la filière photovoltaïque.....	26
Figure II-2 : Dégradation de la couche EVA et création de point chaud à la surface du module PV.....	28
Figure II-3 : Dégradation de la surface du module monocristallin, suite à une agression par pierre	28
Figure II-4 : Évolution possible des quantités cumulées de déchets issus des panneaux photovoltaïques dans le monde	29
Figure II-5 : Le traitement thermique d'un module photovoltaïque dans un four	31
Figure II-6 : Vue en coupe d'un panneau photovoltaïque	32
Figure II-7 : Vue d'une installation de récupération du verre. Après broyage, le verre est transporté à l'aide d'une vis sans fin, vers le lieu de stockage	32
Figure II-8 : Séparation par effet thermique	33
Figure II-9 : Le traitement chimique des cellules	33
Figure II-10 : Procédés SUNICON.....	34
Figure II-11 : L'ensemble des activités du recyclage des panneaux photovoltaïques	34
Figure III-1 : Panneau ARCO de 35 Cellules rondes (CRTSE).....	48
Figure III-2 : Les outils utilisés lors du recyclage du panneau photovoltaïque.	49
Figure III-3 : Démantèlement de la boîte de jonction	49
Figure III-4 : Séparation de la partie métallique de la boîte de jonction.....	50
Figure III-5 : Démantèlement du cadre aluminium	50

<i>Figure III-6: Résultats du démantèlement du cadre aluminium</i>	51
<i>Figure III-7: Le four pour le traitement thermique (CRTSE)</i>	51
<i>Figure III-8 : Séparation de la couche tedlar dans le four monté à 110°C</i>	52
<i>Figure III-9 : Les 3 couches tedlar retirés</i>	52
<i>Figure III-10 : couche EVA retirés (CRTSE)</i>	53
<i>Figure III-11 : Opération de découpe du panneau</i>	53
<i>Figure III-12 : Echantillon (10×9,7 cm) / face avant et face arrière (CRTSE).</i>	54
<i>Figure III-13 : Echantillon (10×9,7 cm) traité sur a un agitateur thermique à 200°C (CRTSE).</i>	54
<i>Figure III-14 : les collecteurs en cuivre (CRTSE).</i>	55
<i>Figure III-15: le silicium récupéré</i>	55
<i>Figure III-16 : Verre non-trempé (CRTSE)</i>	56
<i>Figure III-17 : La spectroscopie de photoélectrons XPS « Escalab 250 Xi » CRTSE</i>	57
<i>Figure III-18 : Spectre XPS de la face arrière du silicium récupéré</i>	58
<i>Figure III-19 : Spectre XPS de la face avant du silicium récupéré</i>	58
<i>Figure III-20 : Microscope Electronique à Balayage de haute résolution (MEB) JSM- 7610FPlus</i>	59
<i>Figure III-21: Micrographie de la face avant du silicium récupéré par microscopie électronique à balayage</i>	59
<i>Figure III-22 : Micrographie de la face arrière du silicium récupéré par microscopie électronique à balayage</i> ...	60
<i>Figure III-23: Séparation de la couche EVA (quelques traces)</i>	60
<i>Figure III-24 : Couche anti reflet éliminé Et argent séparé de la cellule de la face avant de la cellule</i>	61
<i>Figure III-25: Argent séparé de la face arrière de la cellule après 8 min</i>	61
<i>Figure III -26 : L'argent récupéré du traitement chimique de la face avant de la cellule</i>	62
<i>Figure III -27 : L'argent récupéré de la face arrière du traitement chimique (CRTSE)</i>	62
<i>Figure III-28: Cellule solaire après purification du silicium face avant (côté gauche) et face arrière (côté droit)</i>	62

Liste des tableaux

<i>Tableau I-1 : La distribution des centrales PV dans chaque willaya</i>	<i>23</i>
<i>Tableau II-1: Voies de recyclage et valorisations des composants</i>	<i>35</i>
<i>Tableau II-2 : Industries de recyclage de panneaux photovoltaïques en fin de vie.</i>	<i>37</i>
<i>Tableau II-3 : Etude économique comparative entre des articles du recyclage des panneaux solaires.....</i>	<i>40</i>
<i>Tableau II-4 : Etude environnementale comparative entre des articles du recyclage des panneaux solaires.</i>	<i>42</i>
<i>Tableau III-1: Caractéristique du panneau ARCO (35 cellules).....</i>	<i>48</i>
<i>Tableau III-2 : Les matériaux récupérés d'un panneau ARCO.....</i>	<i>56</i>

Nomenclature

ACV	Analyse du cycle de vie
AES	Atelier d'Élaboration du Silicium
AIE	International Energy Agency
ASU	Arizona state university
a-Si:H	Silicium Amorphe hydrogène
C	Carbone
C-Si	Silicium cristallin
Cd	Cadmium
CdTe	Tellure de Cadmium
Cl^-	Ions chlorures
CIS	Cuivre indium
CIGS	Gallium Selenium
CO ₂	Dioxyde de carbone
CF ₄	Mélange gazeux tétrafluoro-méthane
CH ₃ COOH	Acide acétique
CRTSE	Centre de recherche en technologies des semi-conducteurs pour l'énergétique
DEEE	Déchets d'équipements électriques et électroniques
DWS	Diamond wire sawing
EoL	End of life
Eq	Equivalent
EVA	Ethylène Acétate de Vinyle
FRELP	Full Recovery End of Life Photovoltaic
GW	Gigawatt
GWP	Potentiel de Réchauffement Global
GaAs	Arséniure de Gallium
HEM	Heat exchange method
HF	Acide fluorhydrique
HNO ₃	Acide nitrique
I_{sc}	Courant de court circuit
In	Indium
IPA	Isopropylique
KOH	Alcalin de potasse
Kg	Kilogrammes
LCA	Life cycle assessment
Mc-Si	Silicium monocristallin
MG-Si	Siliciure de magnésium
MWSS	Multi-Wire Slurry Saw
MWc	Mégawatt crête
MW	Mégawatt
MEB	Microscopie électronique à balayage
NaOH	Alcalin de soude

NH ₃	Ammoniac
O ₂	Oxygène
PV	Photovoltaïque
Poly-Si	Silicium Multi cristallin
PEG	Polyéthylène glycol
POCl ₃	Trichlorure de phosphore
PECVD	Plasma enhanced chemical vapor deposition
PA	Polyamide
PE	Polyéthylène
PET	Polyéthylène téréphtalate
PVPS	Photovoltaic Power Systems program
P_{max}	Puissance maximale
R&D	Recherche et développement
SoG-Si	Silicium de grade solaire
SiO ₂	Dioxyde de silicium
SiC	Carbure de silicium
SG-Si	Silicium solaire métallurgique
SiHCl ₃	Gaz trichlorosilane
Si ₃ N ₄	Nitrure de silicium
SiH ₄	tétrahydure de silicium
TW	Térawatt
TiO ₂	Dioxyde de titane
Te	Tellure
UE	Union européenne
μv-Si	Silicium Microcristallin
UMG-Si	Upgraded Metallurgical Grade Silicon
USD	Dollar Américain
UV	Ultra-violet
V_{co}	Tension de circuit ouvert
XPS	Spectroscopie de photoélectrons

ملخص

مع زيادة الطلب على الطاقة الشمسية في جميع أنحاء العالم، وجزئيًا في الجزائر، سيؤدي ذلك إلى زيادة تراكم النفايات من الألواح الشمسية التي انتهى عمرها الافتراضي.

على الرغم من اعتبار الطاقة الشمسية نظيفة ومستدامة، إلا أنه من الضروري إدارة وإعادة تدوير الألواح الشمسية التي انتهى عمرها الافتراضي بشكل صحيح. تحتوي على مواد قابلة لإعادة التدوير مثل الزجاج والألمنيوم والسيليكون والبلاستيك والفضة وغيرها من المعادن منخفضة القيمة.

الهدف من هذه الرسالة هو تسليط الضوء على فوائد إعادة تدوير الألواح الشمسية التي انتهى عمرها الافتراضي، مع التركيز على الأثر الاقتصادي والبيئي لإعادة التدوير.

أخيرًا، سيتم التعامل مع دراسة حالة حول إعادة تدوير لوحة كهروضوئية منتهية الصلاحية من نوع ARCO كجزء من فترة تدريبنا في مركز البحث في تكنولوجيا نصف النواقل للطاقة (CRTSE - EL HARRACH).

الكلمات المفتاحية: إعادة التدوير، الأثر الاقتصادي، الأثر البيئي للألواح الكهروضوئية، نهاية العمر الافتراضي، إعادة تدوير صناعات الألواح.

Abstract

As the demand for solar energy increases worldwide, and in part in Algeria, this will lead to an increase in the accumulation of waste from end-of-life solar panels.

Although solar energy is considered clean and sustainable, it is essential to properly manage and recycle end-of-life solar panels. These contain recyclable materials such as glass, aluminum, silicon, plastics, silver and other low-value metals.

The objective of this dissertation is to highlight the benefits of recycling end-of-life solar panels, focusing on the economic and environmental impact of recycling.

Finally, a case study on the recycling of an end-of-life photovoltaic panel of the ARCO type will be dealt with as part of our internship at the Centre de Recherche en Technologie des Semiconducteurs pour l'Energie (CRTSE - EL HARRACH).

Key words: Recycling, Economic impact, Environmental impact, Photovoltaic panels, End of life, Recycling panels industries.

Résumé

La demande d'énergie solaire est en augmentation à travers le monde et en partie en Algérie, cela entraînera une augmentation de l'accumulation des déchets provenant des panneaux solaires en fin de vie.

Bien que l'énergie solaire soit considérée comme propre et durable, il est essentiel de gérer et de recycler correctement les panneaux solaires en fin de vie. Ces derniers contiennent des matériaux recyclables tels que le verre, l'aluminium, le silicium, les plastiques, l'argent et autres métaux à faible valeur ajoutée.

L'objectif de ce travail de mémoire est de mettre en évidence l'intérêt du recyclage des panneaux solaires en fin de vie ainsi l'accent sera porté sur l'impact économique et environnemental de leur recyclage.

Enfin, un cas pratique sur le recyclage d'un panneau photovoltaïque en fin de vie du type ARCO sera traité dans le cadre de notre stage au sein du centre de recherche en technologie des semi-conducteurs pour l'énergétique (CRTSE – EL HARRACH).

Mots clé : Recyclage, Impact économique, Impact et environnemental, Panneaux photovoltaïques, Fin de vie, Recyclage des panneaux industriels.

Introduction générale

Ce travail rentre dans le cadre du projet SIREVIVAL « **Si-based devices for renewable energy: From end-of-life recycling to revival of photovoltaic modules** » / Leap –re dont la Belgique, la France, la Tunisie et l'Algérie présentée par le docteur Anas Boussaa Sabiha sont partenaires, et dans le cadre du projet « **Super-condensateurs à base de nanostructures de silicium : Matériaux recyclés et technologies digitales** » dont le CRTSE présentée par le docteur Anas Boussaa Sabiha et université catholique de Louvain UCLouvain /Belgique sont partenaires.

Il a été effectué aux laboratoires du centre de recherche en technologie des semi-conducteurs pour l'énergétique (CRTSE) en collaboration avec l'université de SAAD DAHLEB BLIDA 1.

Le rôle des sources d'énergie renouvelables n'a cessé de croître en vue d'un approvisionnement énergétique durable et parmi ses nombreuses sources renouvelables, respectueuses de l'environnement, l'énergie solaire, écologiquement propre, abondante et efficace et qui connaît la croissance la plus rapide, en raison de la réduction drastique des coûts d'investissement et des avancées technologiques [1].

La technologie photovoltaïque dominante est basée sur des cellules solaires en c-Si, avec une part de marché de plus de 90 % [2-7].

Une technologie clé avec un taux d'adoption et d'installation de modules photovoltaïques augmentant de manière presque exponentielle, d'environ 1,4 Gigawatt de capacité totale installée dans le monde en 2000 à plus de 500 Gigawatts en 2018 [8] avec des projections d'une nouvelle augmentation à plus de 4 500 GW en 2050 [2].

Bien que les modules PV ne produisent pas de gaz à effet de serre pendant l'utilisation, résultant ainsi un impact environnemental minimal mais l'augmentation significative de la production de modules photovoltaïques au cours des dernières décennies va générer un nombre important de panneaux photovoltaïques en fin de vie qui se présente sous forme de déchets qui envahira le monde.

La durée de vie moyenne des panneaux solaires photovoltaïques en 25 ans, ainsi la quantité des déchets augmentera significativement et qui atteindra 78 millions de tonnes en 2050 [3-6].

Les éléments constituant un panneau photovoltaïque sont des matériaux précieux (tels que le silicium, l'argent, l'aluminium, le cuivre etc.) qui doivent être recyclés et préservés.

La nature et la composition de ces panneaux, détermineront le type de la technologie de traitement des déchets et la réutilisation industrielle après recyclage des matières pour répondre aux besoins de la fabrication de nouveaux modules photovoltaïques. En trouvant un moyen approprié de recycler les matériaux des panneaux photovoltaïques, nous pouvons

assurer une production tout en minimisant l'impact sur l'environnement et augmentant le bénéfice économique [3-6].

Dans notre travail, nous allons mettre l'accent sur l'aspect économique et environnementale du recyclage des panneaux photovoltaïques en fin de vie, tout en réalisant le recyclage d'un panneau solaire en fin de vie au sein du centre de recherche en technologie des semi-conducteurs pour l'énergétique.

Pour ce but on a divisé notre étude en 3 chapitres :

- Le premier chapitre a été consacré aux généralités sur le photovoltaïque. Dans ce chapitre, nous présentons tout d'abord, globalement le phénomène photovoltaïque, les étapes de fabrication des cellules à base de silicium ainsi que les panneaux solaires. Ensuite, nous détaillons le marché photovoltaïque mondial et algérien.
- Le deuxième chapitre, nous nous sommes intéressés à l'étude des causes de fin de vie des panneaux photovoltaïques, les différentes méthodes de recyclage utilisées en citant quelques industries de recyclage existantes, au final nous avons effectué une analyse économique et environnementale basée sur l'étude de quelques articles scientifiques en rapport avec le recyclage de panneaux solaires en fin de vie.
- Le troisième chapitre nous l'avons consacré à l'étude du recyclage d'un panneau photovoltaïque en fin de vie, un panneau fabriqué en 1995 de type ARCO, qui fera l'objet des différents traitements (mécanique, thermique et chimique) dans lequel nous avons eu recours à l'utilisation de deux techniques de caractérisation à savoir : La spectroscopie de photoélectrons XPS et La microscopie électronique à balayage MEB.

Ce travail sera bien évidemment finalisé par une conclusion générale.

Chapitre I

Généralités sur le Photovoltaïque

Chapitre I

Introduction

La technologie solaire photovoltaïque (PV) est devenue une source d'énergie de plus en plus importante au cours des dernières décennies en raison de plusieurs facteurs [9,10]. La croissance continue et soutenue de l'industrie photovoltaïque impose une production plus importante de silicium de qualité photovoltaïque. Actuellement la demande en silicium pour l'industrie photovoltaïque est quasiment équivalente à la demande de l'industrie électronique. Le photovoltaïque est une importante source d'énergie renouvelable qui a connu une croissance rapide, passant de 8 GW en 2007 à 400 GW en 2017 [11]. La production de l'énergie grâce à la technologie solaire photovoltaïque (PV) réduisant les émissions de dioxyde de carbone dans l'environnement, peut être l'une des meilleures sources d'énergie propre sur le marché. [12]

Dans ce chapitre nous décrivons le phénomène photovoltaïque, les étapes de fabrication des cellules à base de silicium ainsi que les panneaux solaires. Ensuite, nous détaillons le marché photovoltaïque mondial et algérien.

I.1 Le phénomène photovoltaïque

Le phénomène photovoltaïque est le processus par lequel les cellules solaires convertissent l'énergie lumineuse en électricité. Les cellules solaires sont constituées de matériaux semi-conducteurs tels que le silicium qui absorbent les photons et libèrent des électrons de la lumière du soleil. Ces électrons sont collectés par des conducteurs dans la cellule solaire pour générer un courant électrique.

Le phénomène photovoltaïque a des applications importantes dans l'industrie des énergies renouvelables. Les panneaux solaires photovoltaïques sont utilisés pour produire de l'électricité à partir de la lumière du soleil, réduisant ainsi la dépendance aux énergies fossiles et réduisant les émissions de gaz à effet de serre. Ils sont utilisés dans une variété de domaines, y compris les maisons, les bâtiments commerciaux, les véhicules électriques et les satellites dans l'espace [13].

Les cellules solaires photovoltaïques sont constituées de deux couches de matériau semi-conducteur, généralement du silicium dopé avec différents éléments chimiques pour obtenir une région N (négative) et une région P (positive). Lorsqu'un photon de la lumière solaire pénètre dans la cellule solaire, il est absorbé par les électrons de la couche N, provoquant la libération des électrons des atomes. Ce dernier est alors attiré par la couche P, et la différence de potentiel qui en résulte entre les deux couches génère un courant électrique [14]. Les deux couches génèrent un courant électrique [14].

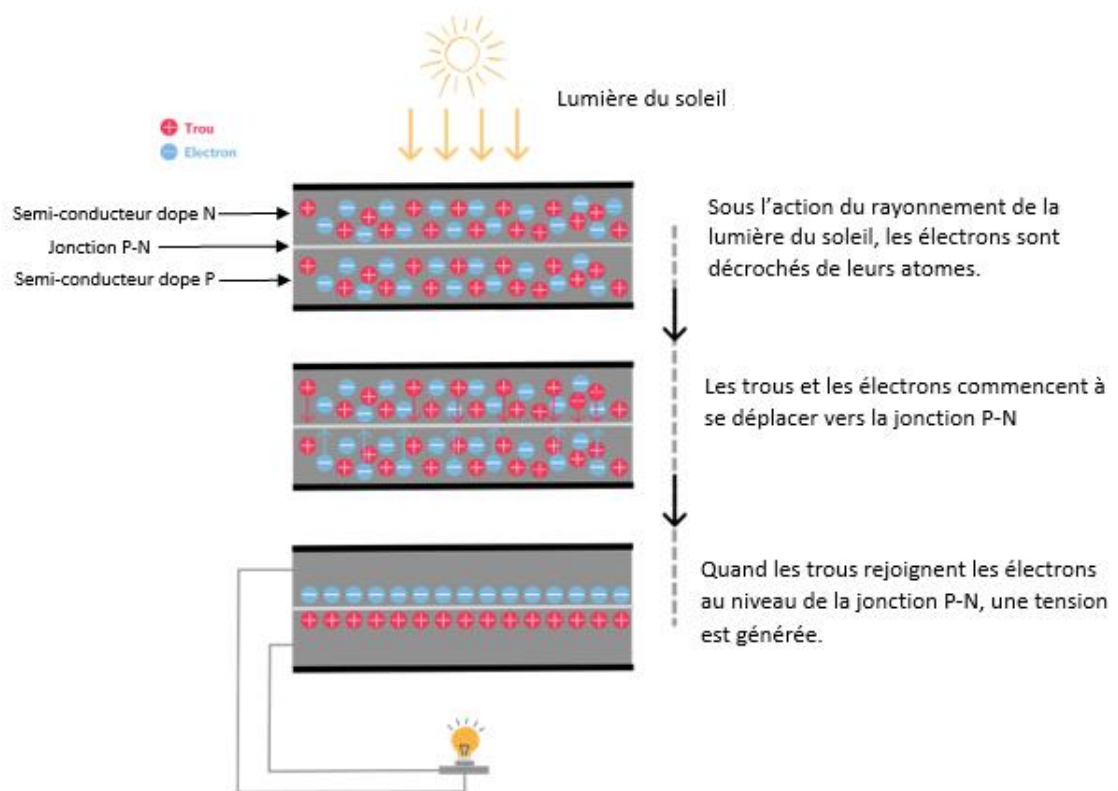


Figure I-1: Le fonctionnement d'un panneau photovoltaïque

I.2 Les principales technologies solaires photovoltaïques

1er. Les cellules en silicium cristallin

Sont en effet les plus anciennes et les plus répandues dans l'industrie photovoltaïque. Cela est dû en partie à leur robustesse et à leur longue durée de vie, qui est en moyenne de 30 ans. En outre, les investissements considérables dans la recherche et le développement de cette technologie ont mis de réduire les coûts de production et d'améliorer l'efficacité des modules.

Le silicium c'est le deuxième élément sur terre après l'oxygène, Le silicium cristallin est un matériau semi-conducteur qui peut être dopé avec des atomes de phosphore ou de bore pour créer une différence de potentiel électrique. Lorsque la lumière frappe la surface d'une cellule en silicium, les électrons de la bande de valence sont excités et passent dans la bande de conduction, générant un courant électrique [43].

Bien que les cellules au silicium cristallin soient encore largement utilisées, de nouvelles technologies sont apparues avec des rendements plus élevés, telles que les cellules solaires à pérovskite ou les cellules solaires organiques. Toutefois, ces technologies sont encore en cours de développement et n'ont pas encore atteint le stade de la production de masse, ce qui explique pourquoi le silicium cristallin continue de dominer le marché des cellules solaires [15].

2e. Les cellules solaires à couche mince

Constituent une alternative intéressante aux cellules en silicium cristallin. Elles sont fabriquées en déposant une fine couche de matériau semi-conducteur sur un substrat, tel que le verre, le métal ou le plastique. Cette technique permet de réduire considérablement la quantité de matériau utilisé par rapport aux cellules au silicium cristallin, ce qui diminue les coûts de production.

Cependant, le rendement de conversion de ces cellules est généralement inférieur à celui des cellules en silicium cristallin, typiquement entre 7 et 13 %. En outre, leur durée de vie est souvent plus courte que celle des cellules en silicium cristallin.

Malgré cela, les cellules solaires à couche mince sont utilisées dans certaines centrales photovoltaïques car le coût par watt installé est l'un des plus bas. En outre, les rendements de conversion de ces cellules ne cessent d'augmenter grâce aux progrès technologiques et à la recherche continue dans ce domaine. Toutes ces technologies ont une part de marché de l'ordre de 10% et sont restées relativement stables : ces industries ont perdu l'avantage de coûts de production plus faibles du fait des investissements lourds dans le silicium au début des années 2000.

3e. Les cellules solaires photovoltaïques organiques

Sont une technologie en plein essor dans le domaine de la recherche photovoltaïque. Ces cellules sont fabriquées à partir de matériaux organiques, tels que des polymères, pour absorber la lumière et produire de l'électricité.

Leur principe de fonctionnement est basé sur les cellules à colorant de Michaël Grätzel, également connues sous le nom de cellules solaires à colorant. Toutefois, les cellules photovoltaïques organiques utilisent des matériaux organiques pour remplacer les colorants inorganiques utilisés dans les cellules à colorant. On obtient ainsi des cellules peu coûteuses, flexibles et légères, qui peuvent être utilisées dans une grande variété d'applications.

Cependant, les cellules solaires photovoltaïques organiques ont encore des rendements de conversion relativement faibles, généralement compris entre 3 et 5 %. En outre, leur durée de vie est limitée, ce qui constitue actuellement leur principale faiblesse. Cependant, la recherche dans ce domaine se poursuit et des progrès significatifs ont été réalisés ces dernières années pour améliorer l'efficacité et la durée de vie de ces cellules.

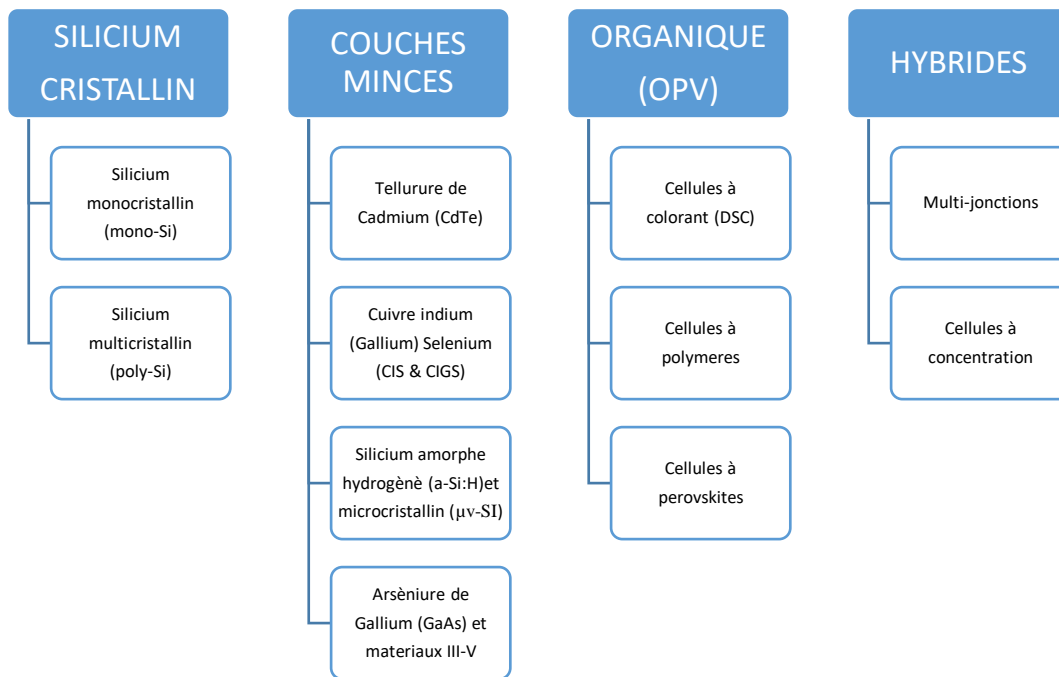


Figure I-2: Les principales technologies solaires photovoltaïques

I.3 Les filières au silicium

Le silicium est l'élément le plus abondant sur terre après l'oxygène sous forme dioxyde de silicium (SiO₂), plus connu sous le nom de silice. Le silicium est extrait à l'échelle industrielle par un mécanisme de carbo réduction, la silice à faible teneur en impuretés est mise en contact avec des composés carbonés dans des fours à arc électrique (peut atteindre 3000°C). Il en résulte un silicium pur à 98 %, de qualité métallurgique. Le silicium de qualité métallurgique devient de qualité "électronique" après des opérations supplémentaires de purification.

La conversion photovoltaïque (PV) est à 93 % couverte par la filière du silicium cristallin. Les cellules peuvent être faites à partir de plaquettes de silicium cristallisé dans deux catégories distinctes, le silicium monocristallin (mc-Si) et le silicium poly cristallin " première génération" [16] ajouté à cela le silicium amorphe.

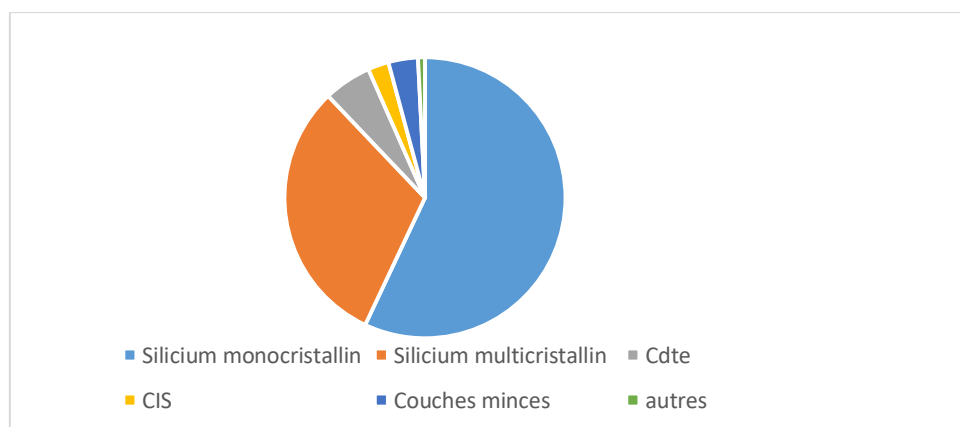


Figure I-3: Répartition des différents matériaux sur le marché photovoltaïque [56]

Les filières de silicium sont des procédés de fabrication de semi-conducteurs à base de silicium, utilisés pour la production de composants électroniques tels que les circuits intégrés, les diodes, les transistors et les cellules solaires. Voici quelques-unes des principales filières de silicium :

- 1. Silicium monocristallin** : Ce procédé implique la croissance d'un seul cristal de silicium, ce qui permet d'obtenir des semi-conducteurs de haute qualité et d'une grande pureté.
- 2. Silicium poly cristallin** : Ce procédé implique la croissance de plusieurs petits cristaux de silicium, ce qui permet d'obtenir des semi-conducteurs moins coûteux mais de moindre qualité.
- 3. Silicium amorphe** : Ce processus implique la croissance de silicium amorphe, qui est utilisé pour produire des cellules solaires et d'autres composants électroniques.

I.4 Processus de fabrication des systèmes photovoltaïques à base de silicium

Le silicium est un matériau semi-conducteur qui n'existe pas à l'état natif dans la nature et est toujours combiné à de l'oxygène pour former des oxydes ou des silicates [17].

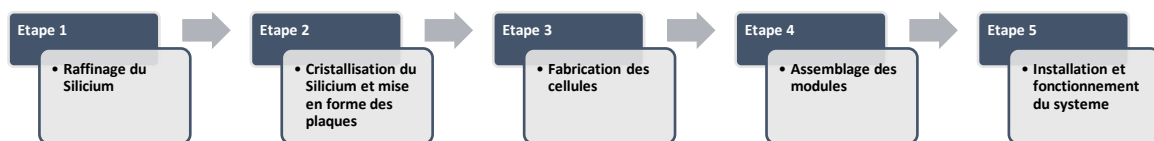


Figure I-4: Les étapes de fabrication d'un système photovoltaïque

I.4.1 Raffinage du silicium

Le raffinage du silicium est une étape essentielle pour la fabrication des panneaux solaires à base de silicium cristallin. L'obtention de ce matériau arrive en fin d'un processus de raffinage que l'on peut séparer en deux grandes étapes :

- **La transformation du quartz en silicium de grade métallurgique ou MG-Si**

La pureté du MG-Si est de l'ordre de 98 à 99% [18], est obtenu par réduction carbo thermique de la silice dans un four à arc électrique [15]. En chauffant le quartz avec le charbon à des températures élevées de 1 500 à 2 000 C° dans un four à arc, Pour obtenir du silicium métal.

- **La purification du silicium métal en silicium de grade solaire ou SoG-Si**

Pour atteindre le niveau de pureté requis pour le silicium solaire d'une pureté de 99,9999%.

1.4.1.1 De la silice au silicium métallurgique

Le silicium, deuxième élément de la croûte terrestre s'obtient par carboréduction de la silice que l'on trouve notamment dans le sable (Figure I.6) et le quartz (Figure I.5), les quartzites et les grès siliceux. La silice, dont le nom chimique est « dioxyde de silicium », est un assemblage d'un atome de silicium et de deux atomes d'oxygène (SiO_2). Le raffinage du silicium consiste à séparer ces atomes dans un four, étape fortement consommatrice d'énergie. Elle permet d'obtenir du silicium liquide qualifié de « métallurgique ». Le silicium de qualité métallurgique est le matériau de base pour la production de silicium pur destiné à l'industrie photovoltaïque et électronique [20,44,45].

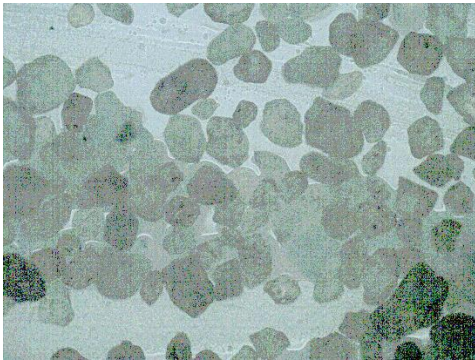


Figure I-6: Le Sable (CRTSE)



Figure I-5: Le quartz (CRTSE)

Elaboration de silicium métallurgique

Le silicium métallurgique (MG-Si) se produit en réduisant le dioxyde de silicium (SiO_2) avec du carbone (C) à des températures élevées. Le processus de production du silicium métallurgique commence par la préparation d'un mélange de silice et de charbon dans un four électrique ou à arc. Le mélange est chauffé à une température d'environ 2000°C pour former du carbure de silicium (SiC).

Le carbure de silicium est ensuite chauffé à des températures supérieures à 2400°C , le réduisant en silicium liquide et en carbure de silicium (SiC). Le silicium liquide est collecté et versé dans des moules pour former des lingots de silicium. Le carbure de silicium est un sous-produit du processus de production et est utilisé dans la production de céramiques hautes performances.

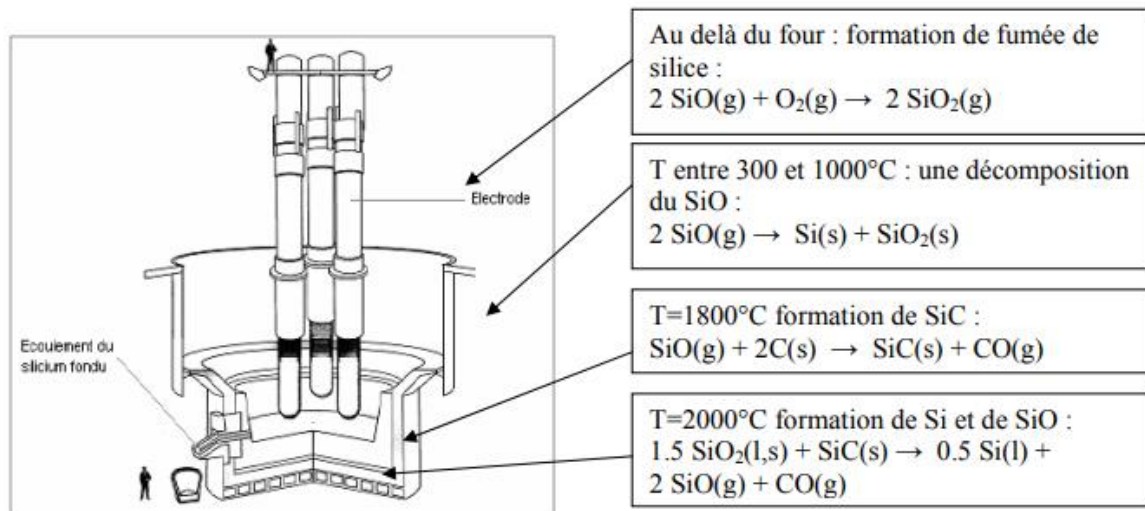


Figure I-7: Four de production de silicium métallurgique [15]

La production d'une tonne de silicium métallurgique consomme [15] :

- 2500 kg de quartz
- 800 kg de charbon de bois
- 200 kg de coke de pétrole
- 1200 kg de bois
- 90 kg d'électrodes en graphite
- 11 000 kWh



Figure I-8: Le silicium métallurgique (MG-Si) [47]

1.4.1.2 Du silicium métallurgique au silicium solaire

Le silicium destiné à l'industrie des silicones ne nécessite pas une pureté plus élevée que celle atteinte après Raffinage du silicium.

Actuellement, le processus d'obtention du silicium de qualité solaire se divise en deux catégories. La première, appelée voie chimique, est liée à la purification du silicium par le procédé Siemens. La deuxième, appelée voie métallurgique, consiste à obtenir du silicium de qualité solaire directement à partir de silicium métallurgique [22].

1er. Voie chimique : procédé Siemens

La production mondiale de poly silicium était de 370 000 t en 2016, le procédé Siemens (procédé au trichlorosilane) représente plus de 90 % de la production. Le procédé Siemens reste le principal procédé de production de poly silicium dans le monde aujourd'hui [24]. Ce procédé basé sur la forte attraction de l'atome de silicium Si pour les ions chlorures Cl^- .

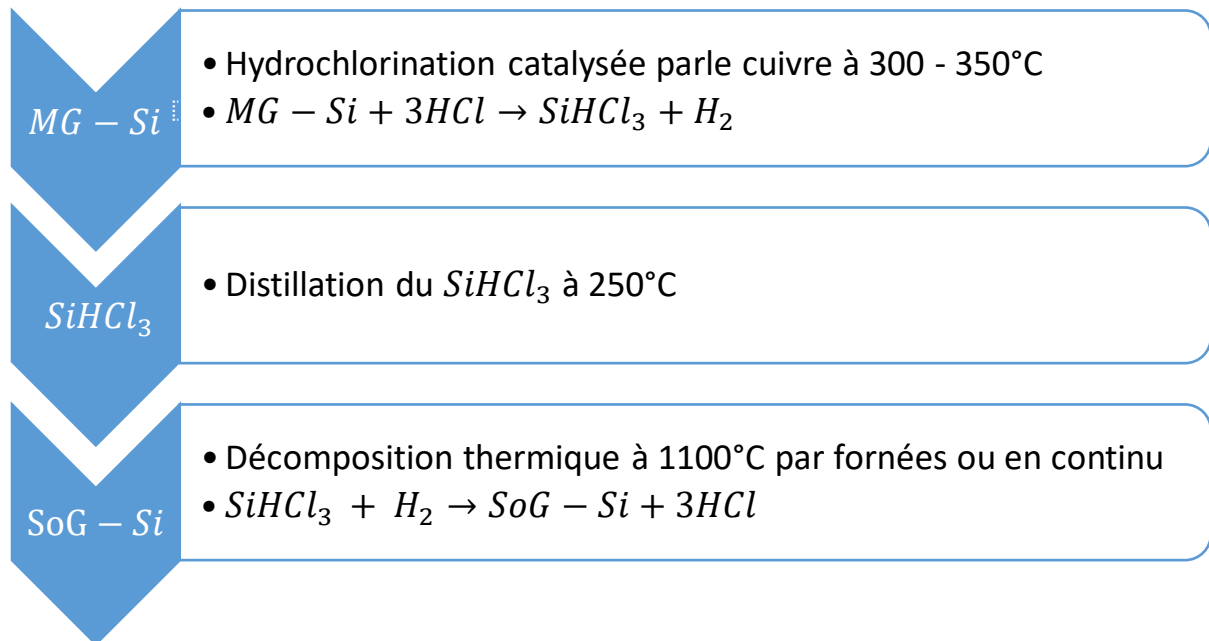


Figure I-9: Procédés Siemens

Le silicium de qualité métallurgique (MG-Si) est d'abord converti en gaz trichlorosilane $SiHCl_3$ (ou silane SiH_4) par réaction avec du chlorure d'hydrogène à 300°C. Ce gaz est ensuite affiné par distillation fractionnée, avant d'être insufflé en présence d'hydrogène sur un filament de précurseur de silicium ultra pur chauffé à plus de 1100°C. Le trichlorosilane $SiHCl_3$ se décompose alors à nouveau en chlorure d'hydrogène et en atomes de Si, qui se déposent sur le filament à une vitesse inférieure à 1 mm/heure et le rendement est faible. On obtient du silicium poly cristallin.



Figure I-10: Silicium Polycristallin [48]

2e. Voie métallurgique Procédé Elkem

L'objectif de la voie métallurgique est de réduire les coûts de production tout en maintenant une qualité suffisante pour les applications solaires. Et d'obtenir du silicium

de qualité solaire directement à partir de silicium métallurgique. Cette méthode de production peut être cinq fois plus efficace sur le plan énergétique que le procédé Siemens [25].

L'entreprise la plus avancée est Elkem Solar (Norvège) qui a développé un procédé actuellement en cours d'industrialisation [26,27] de production de silicium poly cristallin de qualité solaire et construit une usine de 5 000 tonnes [28].

Processus de production du silicium d'Elkem Solar

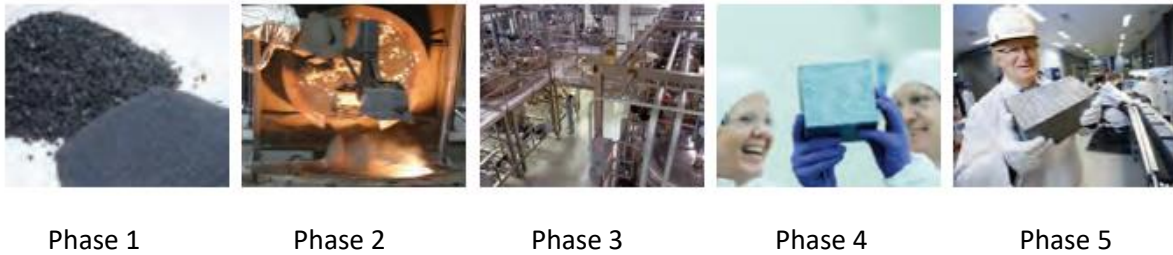


Figure 1-11: Procédé de production de silicium grade solar selon Elkem [49]

Phase 1 : silicium métallurgique : Le quartz est réduit en silicium à l'aide de carbone.

Phase 2 : un traitement du silicium métallurgique par un laitier de silicate : La première de trois étapes de purification séquentielle pour réduire les niveaux d'impureté et éliminer le bore. Le silicium liquide est transféré depuis le four à arc, puis solidifié après traitement, Le métal traité au laitier est ensuite broyé avant d'être envoyé à lessivage

Phase 3 : le lessivage : Le processus de nettoyage hydro métallurgique consiste à nettoyer le silicium broyé avec des acides pour réduire le niveau de phosphore et d'autres impuretés métalliques.

Phase 4 et 5 : Solidification directe et post-traitement : Pour l'étape 4, l'objectif principal est de réduire davantage les niveaux de phosphore et d'autres impuretés métalliques, Le processus est similaire à la production de lingots solaires. Le post-traitement consiste à couper le lingot solidifié en briques de 10 kg et de les nettoyer avec des acides. Les parties du lingot présentant une concentration d'impuretés sont coupées. Les premières études montrent que la qualité du silicium solaire obtenu est similaire à celle du silicium poly cristallin commercialisé provenant de la voie traditionnelle Siemens [29], Le rendement sur cellules est lui aussi dans les spécifications, autour de 15-16% [30].

Pour une production à grande échelle, la consommation d'énergie sera d'environ 25-30 kWh/kg de matériau initial, soit 20% de la dépense par le procédé Siemens [31].

3e. Le projet PHOTOSIL

Ce procédé utilise la combinaison des effets bénéfiques d'une torche plasma pour réduire les teneurs en bore et des étapes de solidification dirigée afin d'extraire les autres impuretés par ségrégation [32], le but de ce procédé est d'obtenir silicium avec pureté suffisante pour les cellules photovoltaïques, à des coûts de production plus faible. Le silicium obtenu est alors appelé sous le terme générique UMG-Si : " Upgraded Metallurgical Grade Silicon' [33].

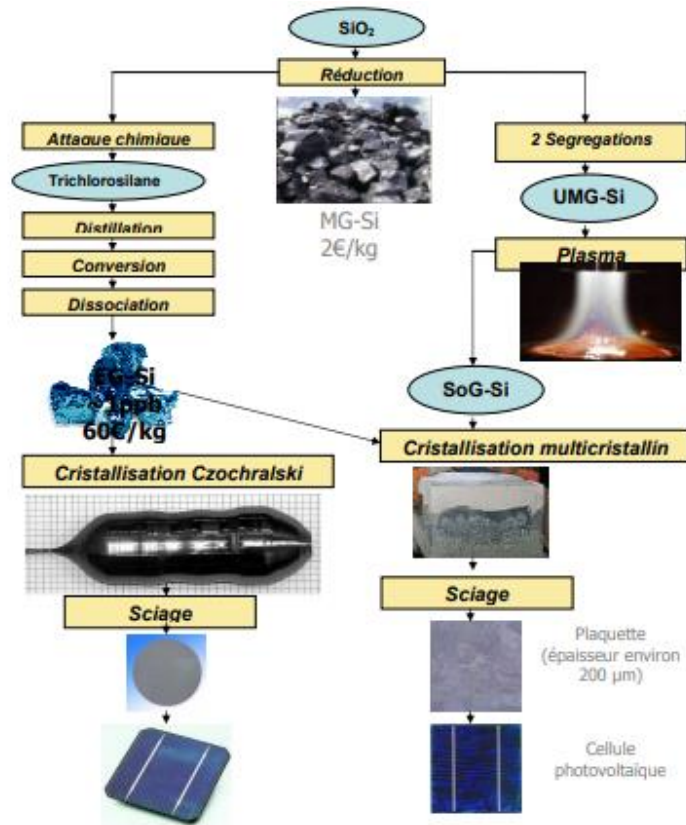


Figure I-12: Filère du silicium pour le photovoltaïque ; à gauche la voie chimique en phase gazeuse et à droite la voie métallurgique explorée par le projet PHOTOSIL [15]

I.4.2 Fabrication des plaques, cellules et modules photovoltaïques

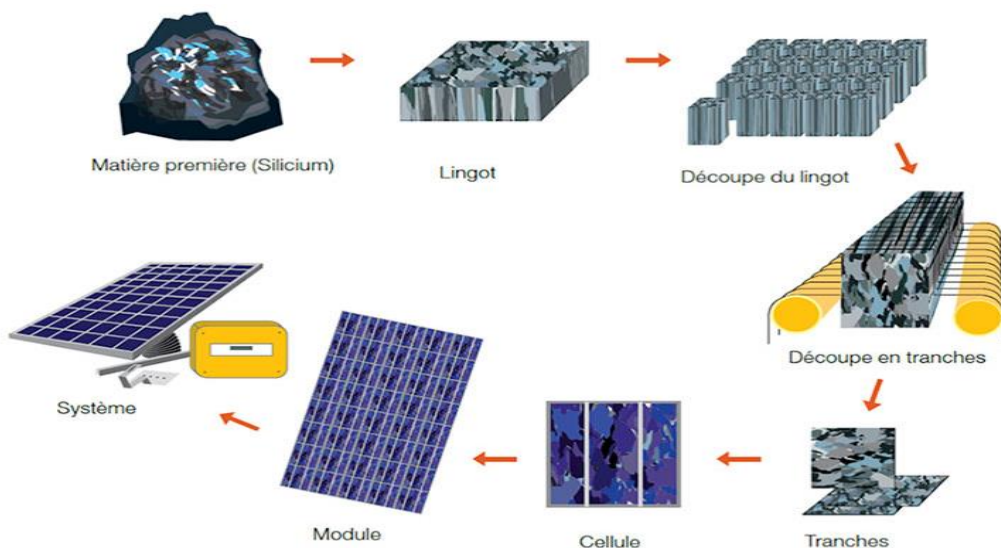


Figure I-13: Enchaînement des étapes de fabrication d'un module photovoltaïque à base de silicium cristallin [52]

I.4.2.1 Cristallisation du silicium et mise en forme des plaques

I.4.2.1.A Silicium monocristallin

La cellule solaire monocristalline, comme son nom l'indique, est fabriquée à partir de monocristaux de silicium par un procédé appelé procédé Czochralski [34,35]. Au cours du processus de fabrication, les cristaux de Si sont coupés en tranches à partir de lingots de grande taille, Le rendement des cellules solaires au silicium monocristallin se situe entre 24% (lab) et 16 % (commercial) [36].

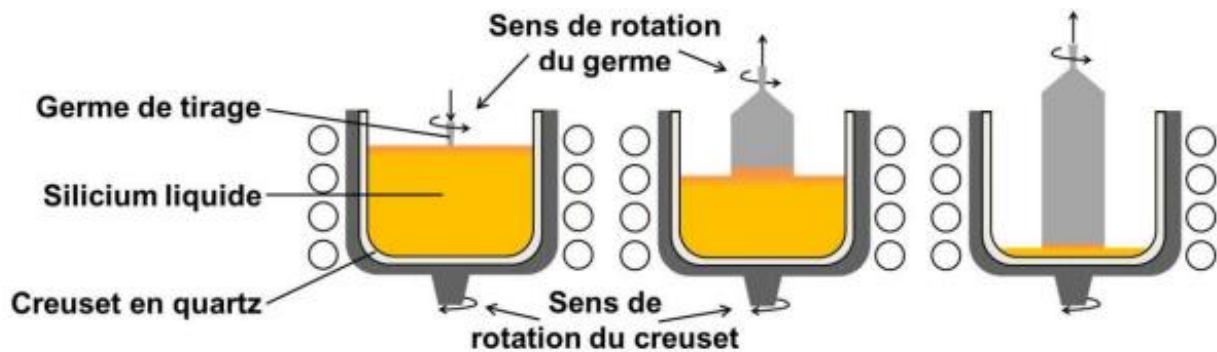


Figure I-14: Principe du procédé Czochralski [51]

Plusieurs étapes sont alors nécessaires pour dessiner le lingot [50]. La première étape consiste à former le lingot au diamètre souhaité. La formation contrôlée de cette pièce permet d'obtenir des matériaux avec peu ou pas de défauts cristallins. Le dessin secondaire du corps de lingot peut atteindre, Deux mètres de longueur (environ 150-200 kg). Le tirage se termine lorsqu'il n'y a presque plus de silicium dans le creuset [51].



Figure I-15: Lingot cylindrique de silicium monocristallin [53]

I.4.2.1.B Silicium multi cristallin (mc-Si)

Ce matériau est constitué de monocristaux séparés entre eux par des régions désordonnées et riches en défauts cristallins qui sont les joints de grains. Le silicium polycristallin est obtenu par coulage en lingotière dans laquelle s'opère un refroidissement lent. Les cellules silicium multi cristallin sont moins coûteuses à produire que les cellules en silicium monocristallin. Le rendement des cellules solaires au silicium multi cristallin se situe entre 13% et 14 % [37].

Elaboration de lingot de silicium multi cristallin

Ce lingot de silicium multi cristallin est élaboré par la technique de solidification dirigée, dans un four HEM (HEAT Exchange Method) est une technique de solidification dirigée et permet de conserver le creuset fixe en déplaçant le four. Un échangeur de chaleur est utilisé pour extraire la chaleur latente de solidification dans le bas du creuset. [38]

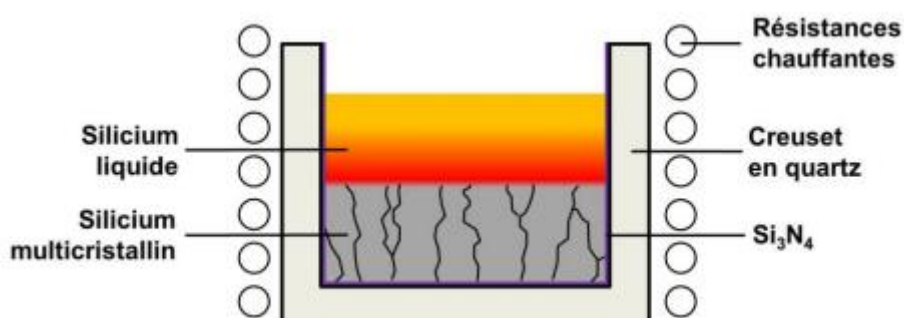


Figure I-17: Cristallisation d'un lingot multi cristallin par solidification [51]



Figure I-16: Lingot de silicium multicristallin 40 cm × 40 cm × 18 cm (CRTSE)

Découpe du lingot en briquettes

La découpe de lingot de silicium multi cristallin à l'aide d'une scie à fil diamanté DWS (Diamond wire sawing) en briquettes par bricketer de dimension 10cmx10cm & 156cmx7,6cm au niveau de l'Atelier d'Élaboration du Silicium (AES-CRTSE).



Figure I-18: la découpe de lingot de silicium multi cristallin (AES-CRTSE)

Sciage des plaques

Les lingots monocristallins et les briques multi cristallines sont ensuite découpés par une scie à fil métallique MWSS (Multi-Wire Slurry Saw) en plaquettes à une épaisseur d'environ 330 μm (Figure I.19) par l'action abrasive des particules de carbure de silicium (SiC) suspendues dans une boue à base de polyéthylène glycol (PEG). Ce mélange de lubrifiant et d'éléments abrasifs est acheminé par des buses sur une toile métallique en acier inoxydable et transporté par le fil en mouvement.



Figure I-19: La toile métallurgique d'une scie utilisée au CRTSE

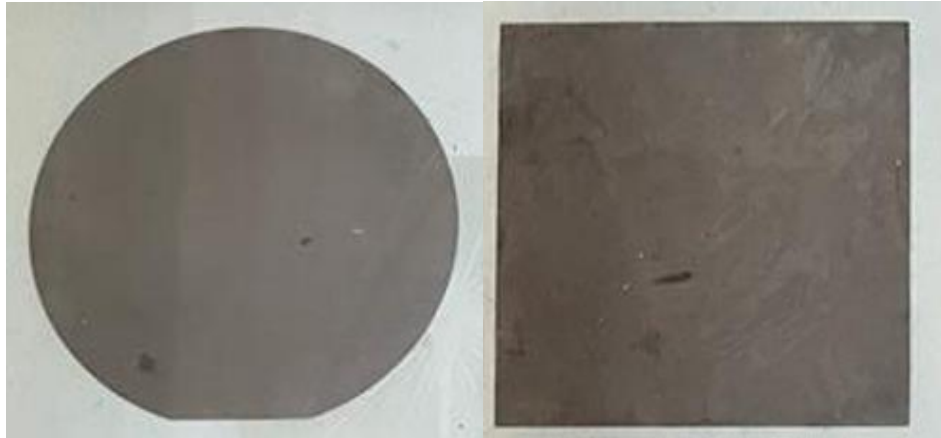


Figure 1-20: Plaquette de silicium à gauche monocristallin et à droite multi cristallin (CRTSE)

1.4.2.2 Fabrication des cellules

Principe de fonctionnement d'une cellule au silicium cristallin

Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire au silicium cristallin repose sur l'absorption de la lumière solaire pour libérer des électrons et des trous, puis sur la séparation de ces charges à la jonction p-n et leur collecte pour produire de l'électricité.

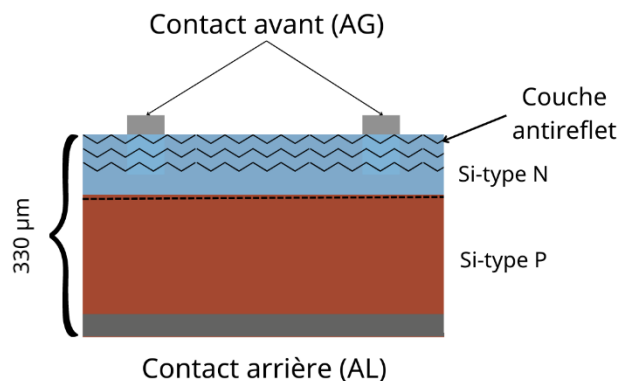


Figure 1-21: Cellule solaire au silicium cristallin

Traitement de plaquettes et obtention des cellules solaires

Les plaquettes subiront différents types de traitement avant de pouvoir être utilisées comme cellules solaires.

- **Décapage** : Les plaques dopées p à partir de bore lors de la cristallisation sont décapées dans un bain chimique afin d'éliminer les défauts superficiels créés par le sciage. Bain acide à base d'acide fluorhydrique HF, d'acide acétique CH₃COOH et d'acide nitrique HNO₃ [39].
- **Texturation** : La texturation de la surface en petites pyramides ou entonnoirs permet d'améliorer la collecte des photons dans toutes les directions en réduisant la réflexion. Cette texturation s'effectue par gravure sélective et par un bain alcalin de soude (NaOH) ou de potasse (KOH) avec des additifs organiques du type alcool isopropylique (IPA)

- **Dopage** : Le dopage est une méthode permettant de réaliser la jonction P-N. Cela consiste à introduire des impuretés dans un cristal intrinsèque pour modifier ces propriétés électriques. Le semi-conducteur dopé est alors appelé "semi-conducteur extrinsèque". Il existe deux types de dopage : le type N (Négatif) et le type P (Positif). Le dopage de type N implique l'ajout d'impuretés d'atomes de phosphore, qui fournissent des électrons supplémentaires dans la bande de conduction du matériau, tandis que le dopage de type P implique l'ajout d'impuretés d'atomes de bore, qui créent des "trous" dans la bande de valence du matériau [40]. La diffusion thermique de phosphore P est à partir de trichlorure de phosphore POCl_3 dans un four à passage, $800^\circ\text{C} < T < 900^\circ\text{C}$, suivi d'un recuit [41].
- **Bords de plaque** : La couche n+ est retirée des bords de plaque (sur la tranche) pour séparer, l'émetteur de la face arrière. La gravure par plasma s'effectue par un mélange gazeux tétrafluoro-méthane CF_4 et oxygène O_2 soumis à un champ de radiofréquences.
- **Couche Antireflet** : Une couche antireflet à base d'oxydes ou de nitrure de silicium ou d'oxydes métalliques est déposée en face avant. Elle sert aussi à passiver la surface en limitant les recombinaisons entre charges afin de conserver la conductivité du matériau. Le dépôt chimique est en phase gazeuse via un plasma (PECVD) d'une couche de Si_3N_4 à partir de silane SiH_4 et d'ammoniac NH_3 [33].
- **Champ face arrière** : La face arrière est dopée p+ par diffusion d'aluminium (quelques fois l'argent). Cette couche joue aussi un rôle de conducteur ohmique avec l'électrode arrière. La diffusion thermique de l'aluminium Al est à 850°C à partir d'une pâte d'aluminium déposée sur toute la face arrière.
- **Métallisation** : Les contacts électriques sont des métaux déposés en face avant (électrode -) et en face arrière (électrode +). Ces contacts sont déposés par la sérigraphie d'argent en face avant et d'aluminium en face arrière par frittage de pâtes métalliques [41]. Les cellules photovoltaïques ainsi finies sont assemblées entre elles (en série et/ou en parallèle) et encapsulées pour devenir un module solaire photovoltaïque pouvant fonctionner pendant plus de 20 ans [42].

1.4.2.3 Assemblage des modules

1.4.2.3.A Composants d'un module PV

Cadre : la majorité des modules PV sont équipés d'un cadre en aluminium [57].

EVA : un copolymère d'éthylène et d'acétate de vinyle est le matériau prédominant pour la fabrication du film encapsulé depuis le début des années 80, et près de 80 % des modules photovoltaïques sont encapsulés avec un film EVA [58,46,21]

Tedlar : ont généralement une structure multicouche (le plus souvent trois couches), la couche en contact avec l'encapsulant doit assurer une adhésion durable et une compatibilité chimique avec l'EVA, Des matériaux tels que les fluoropolymères, le polyamide (PA), le polyéthylène (PE) sont généralement utilisés. [19]

Boite de Junction : Il est souvent constitué de polyéthylène téréphtalate (PET) et sert de boîtier pour protéger les chaînes électriques PV, situé au dos du module. [54]

Couverture avant : le verre (le plus courant).

I.4.2.3.B Raccordement des cellules

Les cellules sont connectées entre elle par de fins rubans métalliques du contact en face avant (-) au contact en face arrière (+)



Figure I-22: Câblage des cellules solaires (CRTSE)

I.4.2.3.C Encapsulation

Les cellules sont encapsulées sous vide entre deux film thermoplastique transparents (EVA : Ethylène Acétate de Vinyle) ; Un verre trempé en face avant protège les cellules sur le plan mécanique tout en laissant le passage de la lumière, La face arrière est constituée d'une feuille TEDLAR ou d'un verre.

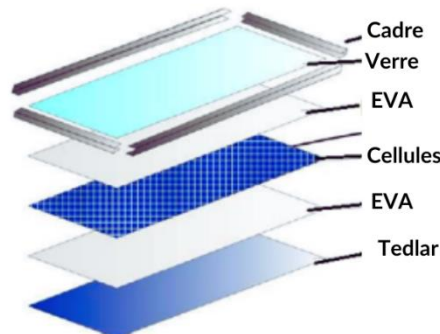


Figure I-23: Structure du module photovoltaïque [54]

I.4.2.3.D Encadrement et connexion des boîtes de jonction

Selon le cas, le module peut être encadrer par un cadre en aluminium avec un joint périphérique ou non.

La boîte de connexion contenant des diodes by-pass de protection et permettant de regrouper les bornes de raccordement.



Figure I-24: Boîte de jonction (CRTSE)

I.4.2.3.E Flesh test

La mise en série des cellules permet d'augmenter la tension tout en conserve le courant d'une cellule.

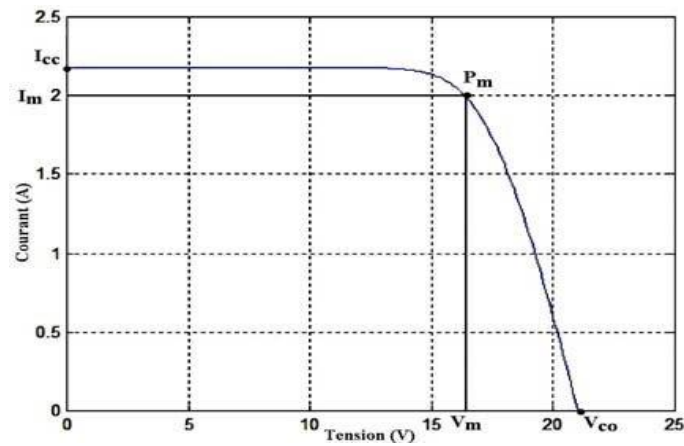


Figure I-25: Caractéristiques électriques de la cellule et du module photovoltaïque en conditions standards [55]



Figure I-26: Module PV (CRTSE)

I.5 Marché photovoltaïque mondial

I.5.1 Evaluation des installations annuelles

En 2022, 240 GWp de nouvelles capacités de production solaire ont été déployées par des promoteurs dans le monde entier au moins 23 pays ont installé plus de 1 GW, par rapport 175 GWp en 2021.

Seize pays (hors UE) ont atteint une capacité totale cumulée de plus de 10 GW et cinq ont dépassé les 40 GW. La Chine représente à elle seule 414,5 GW, suivie par l'Union européenne, qui était en tête du classement jusqu'en 2015, mais qui occupe aujourd'hui la deuxième place (209,3 GW), les États-Unis la troisième (142 GW) et le Japon la quatrième (85 GW). [59]

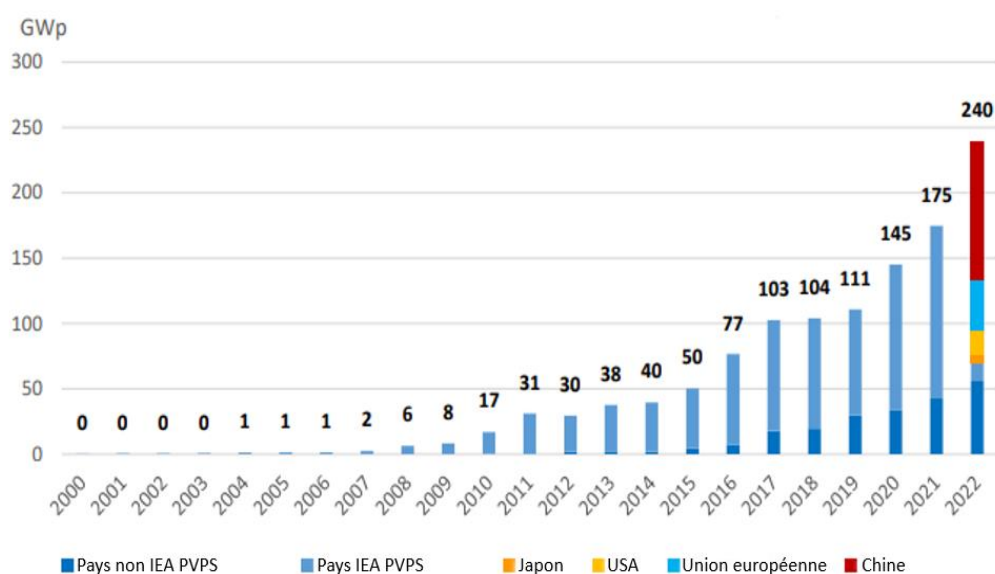


Figure I-27: Evolution des installations photovoltaïques annuelle [59]

Les pays participant au PVPS de l'AIE sont l'Australie, l'Autriche, le Canada, le Chili, la Chine, le Danemark, la Finlande, la France, l'Allemagne, l'Italie, le Japon, la Corée, la Malaisie, le Maroc, les Pays-Bas, la Norvège, le Portugal, l'Afrique du Sud, l'Espagne, la Suède, la Suisse, la Thaïlande, la Turquie et les États-Unis d'Amérique.

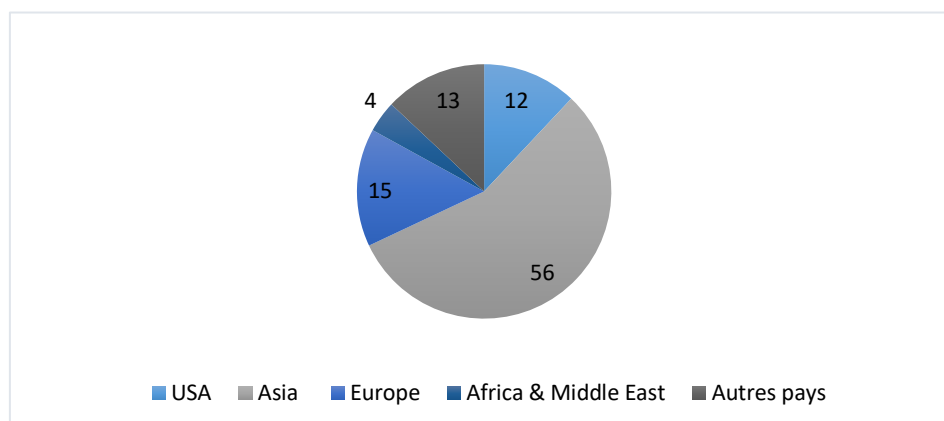


Figure I-28: Marché photovoltaïque mondial [59]

I.5.2 Capacité installée cumulée dans le monde

En 2022, la capacité installée cumulée mondiale a dépassé la barre symbolique de 1 TW, atteignant un niveau estimé à 1 185 GW, comme la montre la Figure I.29. Les pays les plus avancés - de la Chine à l'Inde, puis à l'Allemagne (67,2 GW) - ont au moins 30 GW de plus que les pays suivants. Il est peu probable que leur position soit remise en cause en 2023 ou 2024, car même un doublement ou un triplement du marché dynamique du Brésil en 2022 (9,9 GW) ne suffirait pas. Le Brésil a rejoint le groupe suivant de pays ayant des capacités cumulées plus petites et similaires comprises entre 20 GW et 30 GW : l'Australie, l'Espagne, l'Italie, la Corée et maintenant le Brésil.

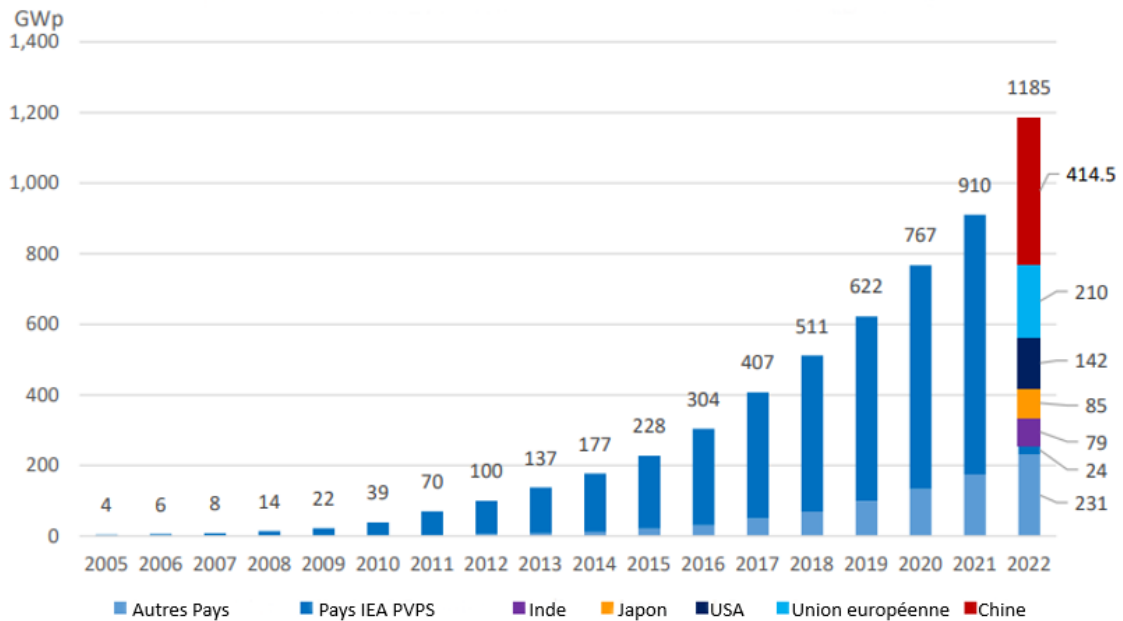


Figure I-29: Evolution Mondiale des installations photovoltaïques cumulés [59]

I.6 Marché photovoltaïque Algérien

L'énergie solaire devrait être le plus grand marché au cours de la période de prévision, avec une croissance continue des installations solaires photovoltaïques dans le pays au cours des années précédentes. Fin février 2015, le gouvernement algérien a adopté son plan Développement des énergies renouvelables 2015-2030. La première phase Lancé en 2011, le programme a permis de réaliser des projets pilotes et Étude du potentiel national. Le nouveau plan clarifie les objectifs Installer d'ici 2030 : 13 575 Mwc de solaire photovoltaïque. [23]

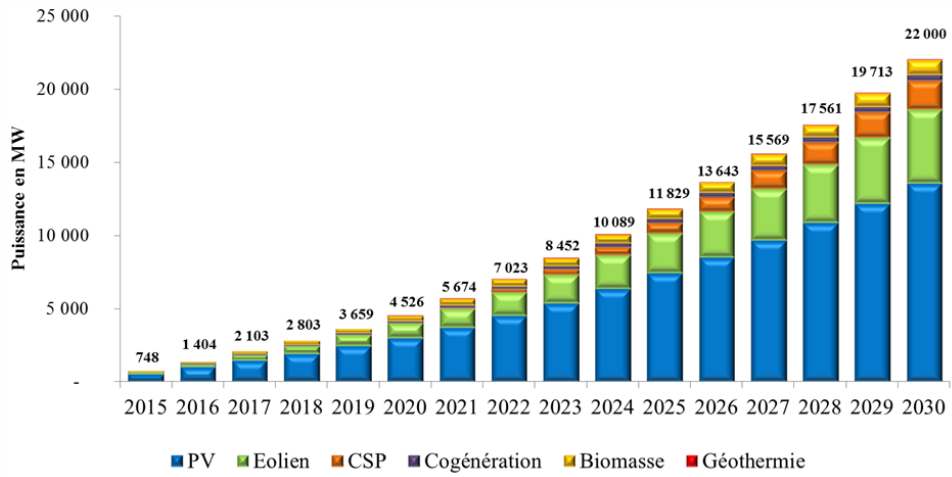


Figure I-30: Programme de développement des énergies renouvelables [23]

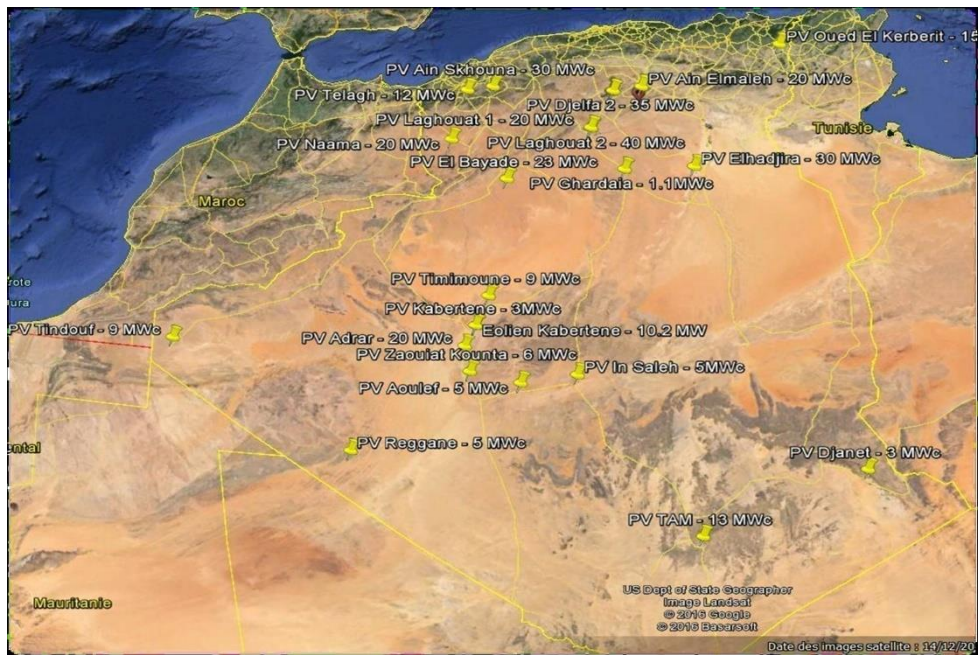


Figure I-31: Projet de 343 MWe en centrales photovoltaïques [23]

Tableau I-1: La distribution des centrales PV dans chaque wilaya [23]

Wilaya	Localité	Capacité Installée (MW)	Mise en Service
DJANET	Djanet	03	19/02/2015
ADRAR	Adrar	20	28/10/2015
ADRAR	Kabertene	03	13/10/2015
TAMANRASSET	Tamanrasset	13	03/11/2015
TINDOUF	Tindouf	09	14/12/2015
ADRAR	Zaouiet.Kounta	06	11/01/2016
ADRAR	Reggane	05	28/01/2016
TIMIMOUN	Timimoun	09	07/02/2016
IN-SALAH	In-Salah	05	11/02/2016
ADRAR	Aoulef	05	07/03/2016
LAGHOUAT	El Khnag (I)	20	08/04/2016
LAGHOUAT	El-Khnag (II)	40	26/04/2017
DJELFA	Ain-El-Ibel (I)	20	08/04/2016
DJELFA	Ain-El-Ibel (II)	33	06/04/2017
SOUK AHRAS	Oued El Keberit	15	24/04/2016
NAAMA	Sedrate Leghzal	20	03/05/2016
SAIDA	Ain-Skhouna	30	05/05/2016
SIDI-BEL-ABBES	Telagh	12	29/09/2016
EL BAYADH	Biodh Sidi Chikh	23	26/10/2016
M'SILA	Ain-El-Melh	20	26/01/2017
OUARGLA	El-Hdjira	30	16/02/2017
BATNA	Oued El-Ma	02	16/01/2018

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le processus de fabrication des systèmes photovoltaïques à base de silicium. Nous avons rappelé quelques notions sur le phénomène photovoltaïque. Aussi, Il nous a permis d'aborder les principales technologies solaires photovoltaïque, ainsi que les filières au silicium, pour finir ce chapitre, nous parlons de le marché mondiale et algérien du PV.

Chapitre II

Recyclage des panneaux photovoltaïques en fin de vie

Chapitre II

Introduction

De nombreux modules photovoltaïques installés au cours des décennies précédentes approchent de leur fin de vie en raison de leur durée de vie de 25 à 30 ans. Selon [2,60,61], les déchets photovoltaïques atteindront 78 millions de tonnes d'ici 2050, ses déchets sont constitués de matières utiles considérables (à savoir le silicium, l'argent, le verre, le plastique, l'aluminium, le cuivre ...) ; les recycler est devenu primordial, et ce pour différentes raisons stratégiques, principalement économiques et aussi environnementales. Ainsi pour pallier à la perte de silicium et autres matières utiles que nous venons de citer, le recyclage des panneaux solaires se révèle être un enjeu crucial de la filière photovoltaïque et aussi pour en faire une énergie verte sur l'ensemble de son cycle.

Dans ce chapitre nous allons étudier les causes de fin de vie des panneaux photovoltaïques, les différentes méthodes de recyclage utilisées en citant quelques industries de recyclage existantes, au final nous allons effectuer une analyse économique et environnementale de diverses sources telles que des articles scientifiques en rapport avec le recyclage de panneaux solaires en fin de vie.

II.1 Caractérisation des déchets issus de la filière photovoltaïque

L'identification de l'ensemble des déchets issus de la filière photovoltaïque est importante pour déterminer d'éventuelles synergies dans leur recyclage (Figure II.1) :

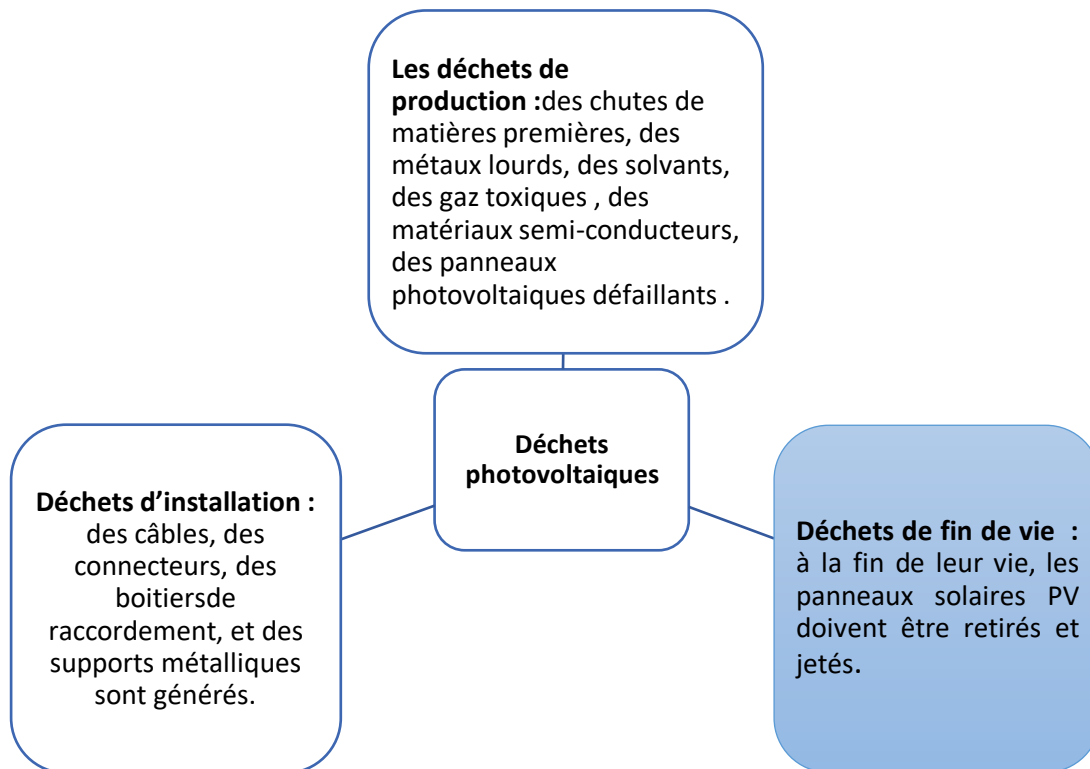


Figure II-1: Les déchets issus de la filière photovoltaïque.

II.2 Causes de fin de vie des panneaux photovoltaïques

La durée de vie du module qui est largement déterminée par la stabilité et la résistance à la corrosion des matériaux à partir de laquelle il est construit. Pour cela les fabricants des modules photovoltaïques, suivant la qualité du silicium, dont sont construit ces modules, donnent une garantie pour une durée de vie d'environ de 25 ans pour un module photovoltaïque à base de Si et 10 ans pour des modules à couches minces [62].

Les performances des modules PV se dégradent selon :

- **Changements brutaux et répétés de température** : La disposition des cellules solaires dans un module modifie le flux de chaleur entrant et sortant de celui-ci. Une modification du flux de chaleur signifie que le changement de température auquel le module fonctionne augmente. Cette augmentation de la température entraîne une baisse de la tension de sortie du module photovoltaïque, ce qui se traduit par une baisse de l'alimentation électrique, ce phénomène suggère une puissance de sortie réduite. Une augmentation de la température entraîne également la dégradation ou la défaillance d'un module PV car l'augmentation de la température est liée à la dilatation thermique. En outre, l'augmentation de la température accroît également le taux de dégradation. La température de fonctionnement d'un module photovoltaïque est déterminée par l'équilibre entre la chaleur produite par le module photovoltaïque et la chaleur que le module PV perd dans l'environnement, et donc la température ambiante de fonctionnement [63].
- **Exposition prolongée aux UV** : Dégradation due au vieillissement des matériaux. C'est une Dégradation principalement de la couche EVA, l'absorption des rayons UV par la couche EVA, conduit souvent à une réduction de la durée de vie pour les matériaux d'encapsulation du module. En particulier, Brunissement de cette couche présentée dans la figure II.2, accompagné d'une accumulation de l'acide acétique qui est utilisé comme catalyseur, son rôle c'est d'accélérer la réaction et rendre le milieu acide., son cumul provoque une réduction graduelle de la production d'énergie de certains modules. [64]
- **Infiltrations d'eau dans le module.**
- **Exposition à des environnements à haute salinité.**
- **Dégradation due à l'éclatement du verre du module** : L'éclatement de la surface vitrée peut se produire en raison d'actes de vandalisme, agression par pierre (Figure II.3), le stress thermique, la manutention, le vent ou la grêle.
- **Effet "hot-spot"**: Ce phénomène a lieu lorsqu'une unique cellule parmi une série d'autres est à l'ombre. La cellule se comporte alors comme une résistance ohmique et surchauffe jusqu'à sa propre dégradation car le courant continue de circuler. La présence de diode permet de « by-passer ». [65]



Figure II -2: Dégradation de la couche EVA et création de point chaud à la surface du model PV.

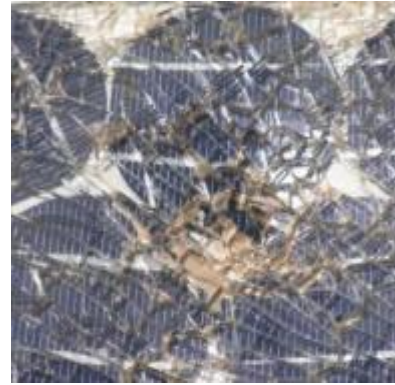


Figure II -3: Dégradation de la surface du module monocristallin, suite à une agression par pierre

II.3 Evaluation des quantités PV en fin de vie

Les modules photovoltaïques ont une durée de vie utile estimée à environ 25 à 30 ans. [66] Néanmoins, la fin de vie prématurée surgie, elle est principalement due aux aléas naturels, en raison des dommages subis lors de l'installation ou des tempêtes, des défaillances des composants, mauvais entretien. [67] Les projections de l'Agence internationale pour les énergies renouvelables [68] indiquent que la production mondiale de déchets photovoltaïques pourrait atteindre 8 millions de tonnes en 2030 et approcher les 80 millions de tonnes en 2050, en tenant compte d'un scénario de perte précoce. [2]

Si l'on considère un scénario de pertes régulières, dans lequel où seuls les panneaux en fin de vie sont remplacés, les projections sont de 1,7 million de tonnes pour 2030 et 2050. [2] En Europe, les panneaux photovoltaïques en fin de vie ont commencé à être considérés comme des "déchets d'équipements électriques et électroniques" (DEEE) par la directive européenne DEEE 2012/19/EU. De plus, un système de logistique inverse a été imposé aux fournisseurs, fabricants, importateurs et revendeurs de modules photovoltaïques qui sont tenus de collecter et de recycler les modules photovoltaïques en fin de vie. [69]

Le volume cumulé de panneaux en fin de vie dans le monde était estimé fin 2016 entre 43 500 et 250 000 tonnes. Cela représente 0,1 % à 0,6 % du volume de panneaux photovoltaïques installés. [70] En prenant une durée de vie moyenne de 30 ans, le volume cumulé de panneaux à recycler commencera à être important à partir de 2030, où il représentera environ 35 fois le volume de 2016. En 2050, il pourrait dépasser les 60 millions de tonnes, dont plus de la moitié en Chine, aux États-Unis, au Japon et en Inde. À titre de comparaison, le volume de déchets électriques et électroniques pour la seule année 2014 était de près de 42 millions de tonnes dans le monde (Figure II.4). Assurer le recyclage des panneaux photovoltaïques s'avèrent donc crucial dès aujourd'hui, avec un enjeu de taille quant au futur changement d'échelle industrielle.

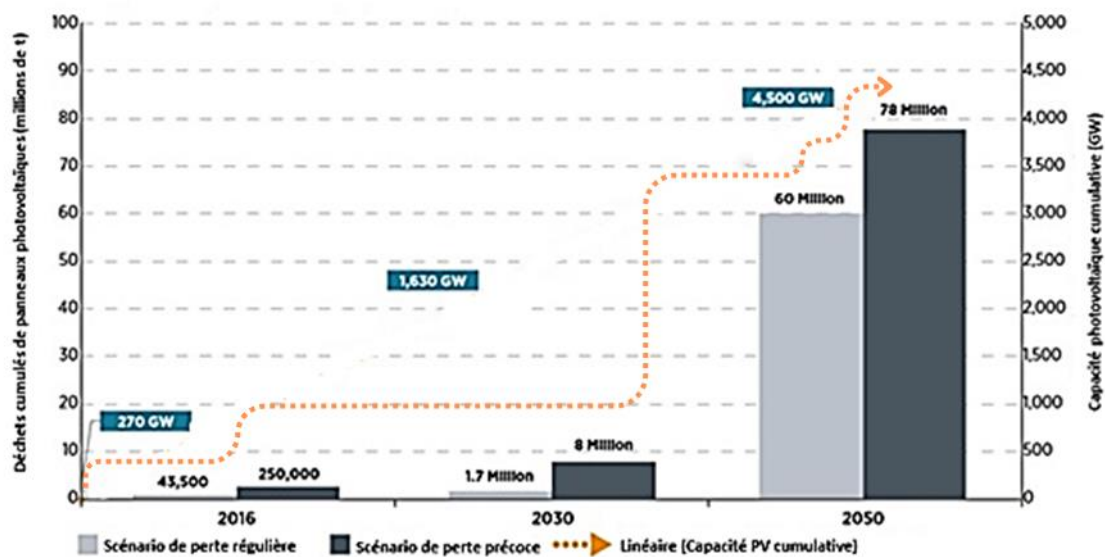


Figure II -4: Évolution possible des quantités cumulées de déchets issus des panneaux photovoltaïques dans le monde [70]

II.4 Filière de recyclage

Les modules photovoltaïques sont largement recyclables, toutes technologies confondues sont principalement composées de verre et d'aluminium. Cependant, les panneaux photovoltaïques sont dans certains cas composés de composants stratégiques, toxiques ou à haute valeur ajoutée. Afin de comprendre les enjeux du recyclage des PV, il est donc nécessaire d'étudier la composition type d'un module PV par type de technologies, Jusqu'à présent, les méthodes les plus courantes de recyclage des modules PV c-Si sont basées sur des processus mécaniques, thermiques et chimiques.

Bien que les cellules solaires à couche mince utilisent beaucoup moins de matériaux que les cellules c-Si, la disponibilité et la toxicité de matériaux tels que le tellure (Te), l'indium (In) et le cadmium (Cd), par exemple, suscitent des inquiétudes. En outre, les processus de production génèrent également des émissions de gaz à effet de serre lors de certaines opérations de nettoyage des réacteurs. En raison de ces problèmes, il est très important de se concentrer sur le recyclage des modules photovoltaïques pour toutes les technologies [71].

II.5 Le recyclage des modules photovoltaïques par type de technologies

II.5.1 Les modules à base de silicium cristallin

Représentent plus de 95 % de la production mondiale. Ils sont constitués presque exclusivement de matériaux intégralement recyclables. En effet, en pourcentage de la masse d'un panneau, il y a surtout du **verre (plus de 75 %)**, des **polymères (10 %)** et de **l'aluminium (8 %)** qui sont classifiés comme des déchets non dangereux et réutilisables. Les polymères sont des plastiques de type Tedlar. Le reste est composé de **silicium (environ 5 %)**, de **cuivre (1 %)** et de moins de **0,1 % d'argent** et d'autres métaux (principalement de l'étain et du plomb) qui, même s'ils demandent plus d'attention, peuvent être recyclés. [72]

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

- Par **un traitement thermique**, en particulier pour éliminer le polymère encapsulant le panneau : en le brûlant, on sépare les différents éléments du module photovoltaïque (cellules, verre et métaux).
- Par **un traitement chimique**. Les éléments restants du module, broyés finement, sont plongés dans un ou plusieurs solvants pour extraire des matériaux secondaires par fractions. Cela permet d'extirper les contacts métalliques et la couche antireflet.

II.5.2 Les technologies couches minces

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

- Les panneaux CdTe sont composés, en masse, de 97 % de verre et 3 % de semi-conducteurs.
- Les panneaux CIS-CIGS contiennent 89 % de verre, 7 % d'aluminium et 4 % de semi-conducteurs. [72]

Les modules « couches minces » en fin de vie doivent être traités avec une attention particulière afin de récupérer les complexes métalliques semi-conducteurs qu'ils contiennent, car certains comme le cadmium sont toxiques. Néanmoins, les études réalisées sur le cadmium présent dans les couches minces sous la forme de tellure de cadmium (CdTe) soulignent la grande stabilité de ce composé, ce qui minimise le risque. La filière est au stade de la recherche et des méthodes efficaces sont déjà testées. Certains travaux [73] montrent qu'il est possible de récupérer 90 % du verre et 95 % des semi-conducteurs (en masse) d'un panneau par **traitement mécanique** puis **chimique** : mélange d'acide sulfurique et de peroxyde d'hydrogène pour filtrer les différentes matières broyées, puis précipitation pour récupérer les métaux.

On peut noter que le fabricant de panneaux et prestataire de traitement First Solar obtient déjà aujourd'hui des taux de récupération de 90 % pour le verre et 90 % pour le matériaux semi-conducteur (CdTe). [74]

II.6 Les méthodes de recyclage

Le recyclage consiste à séparer les différents constituants qui font la composition d'un panneau solaire en suivant les 6 étapes suivantes [75] :

- **Etape 1** : Retirer Le cadre en aluminium d'abord du panneau mécaniquement.
- **Etape 2** : C'est ensuite au tour de la connectique, le boîtier électrique et des câbles en cuivre. Ils sont récupérés et envoyés vers les lignes de traitement des Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques (DEEE).

- **Etape 3** : À ce stade, les panneaux sont découpés en lamelles et passés dans différents broyeurs.
- **Etape 4** : Durant le passage des panneaux dans l'un des broyeurs, on retire le lamier photovoltaïque : c'est-à-dire que l'on doit séparer le silicium, le verre qui le protège ainsi que la face en polyester à l'arrière du panneau.
- **Etape 5** : Vient le tour de l'électrode métallique présente à la surface des cellules qui sont décapées selon le métal utilisé.
- **Etape 6** : Enfin, il reste les plaquettes de silicium (aussi appelées wafers) qui peuvent être réutilisées pour la production de nouveaux panneaux solaires ou envoyées vers une filière de recyclage.

II.6.1 Techniques de séparation

Durant les étapes de recyclage, les différents matériaux utilisés seront éliminés ou récupérés pour une éventuelle réutilisation. Le processus de recyclage des modules photovoltaïques est caractérisé par les techniques des séparations qui peuvent être classés selon [76] :

II.6.1.1 Le traitement mécanique

Il consiste à séparer mécaniquement les câbles, les boîtes de jonction et le cadre métallique.

II.6.1.2 Le traitement thermique

C'est est la première étape du recyclage des modules photovoltaïques. Cette étape consiste à disposer un module dans un four. Ce four sera monté progressivement en température de 400°C à 600°C. Cette méthode permet de séparer les différents éléments du module photovoltaïque à base de silicium des autres composants solides (verre, métaux). Les composants synthétiques comme l'EVA (éthylène-acétate de vinyle), la colle du cadre et le substrat du module en plastique seront brûlés.

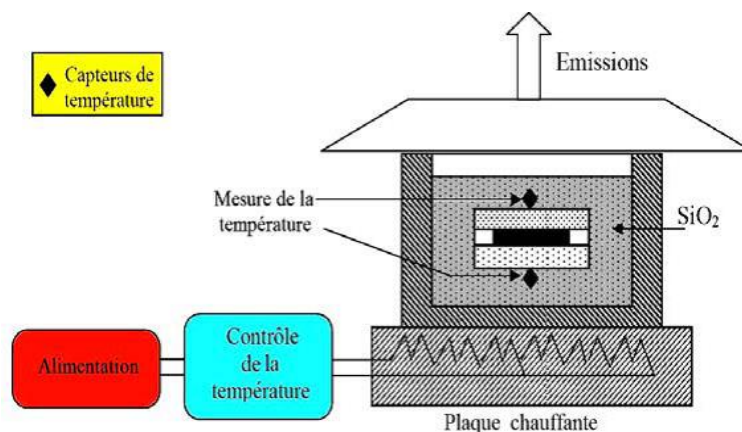


Figure II -5: Le traitement thermique d'un module photovoltaïque dans un four [77]

- Élimination des couches EVA et Tedlar-Aluminium-Tedlar :

Ces produits sont, sous forme de feuilles de résine transparente et d'aluminium, montées à l'avant et à l'arrière du module. Sous l'effet de la température (150 et 160 °C), ces feuilles sont transformées pour former avec les cellules solaires et le verre de protection un corps solidaire, rigide et durable. Durant le processus de recyclage, l'objectif est de récupérer

des produits à haute valeur pour leur éventuelle réutilisation. Les produits, EVA et Tedlar-Aluminium-Tedlar, seront brûlés afin de libérer les cellules solaires.

Les rubans en aluminium qui forment les connexions des différentes cellules solaires sont récupérer.

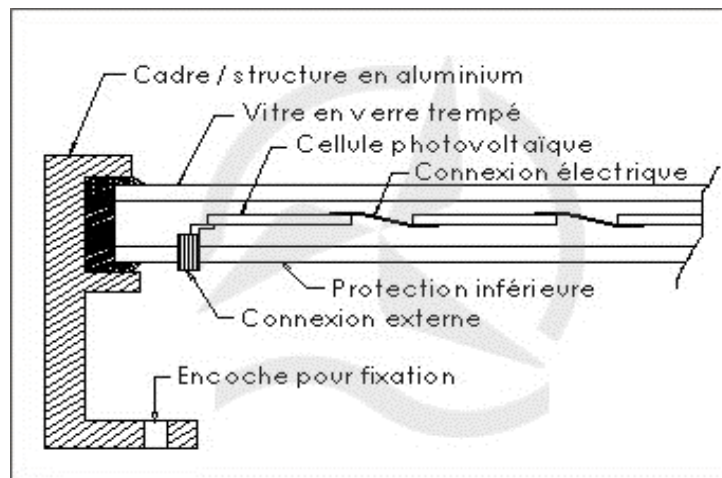


Figure II-6: Vue en coupe d'un panneau photovoltaïque [78]

Durant la phase de traitement thermique, le verre libéré de la couche EVA, et il ne peut pas être réutilisé comme tel s'il n'est pas transformé en des granulés, pour cela il doit être broyé et transformé en granulé puis cédé aux industries du verre pour sa transformation en verre plat trempé.



Figure I-7: Vue d'une installation de récupération du verre. Après broyage, le verre est transporté à l'aide d'une vis sans fin, vers le lieu de stockage [79]

La séparation des cellules se fait manuellement à la fin du traitement thermique, les cellules récupérées vont subir un traitement chimique pour récupérer le silicium.



Figure II -8: Séparation par effet thermique [80]

II.6.1.3 Le traitement chimique

Les cellules récupérées manuellement vont subir un traitement chimique permettant de récupérer le silicium. Le but étant de récupérer du silicium pur, pour cela les différentes couches, la grille de contact, le dioxyde de silicium (SiO_2), la couche dopée n, la métallisation de la face avant et de la face arrière et la couche antireflet devront être éliminés en premier. [76] Le synoptique du processus chimique est représenté ci-dessous :

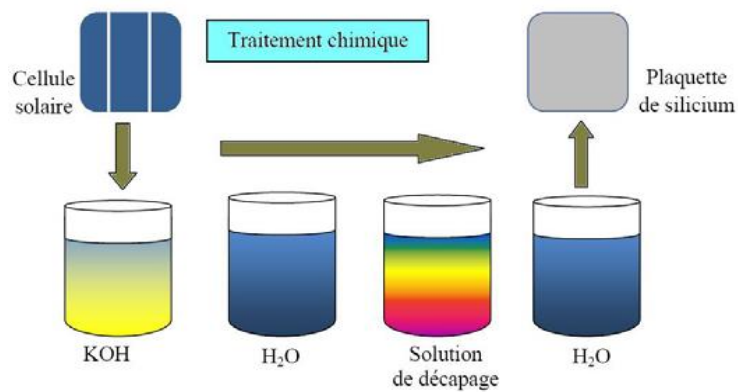


Figure II -9: Le traitement chimique des cellules [78]

II.6.1.4 Le traitement physique

Il intervient au milieu d'un des procédés de recyclage. Il se situe entre le procédé thermique et chimique (Voir figure ci-dessus). Ce traitement permet de séparer manuellement le cuivre et le verre après avoir effectué un traitement thermique [76].

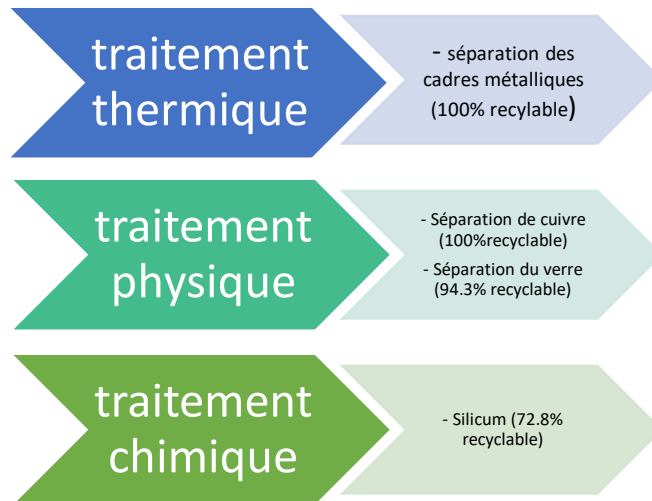
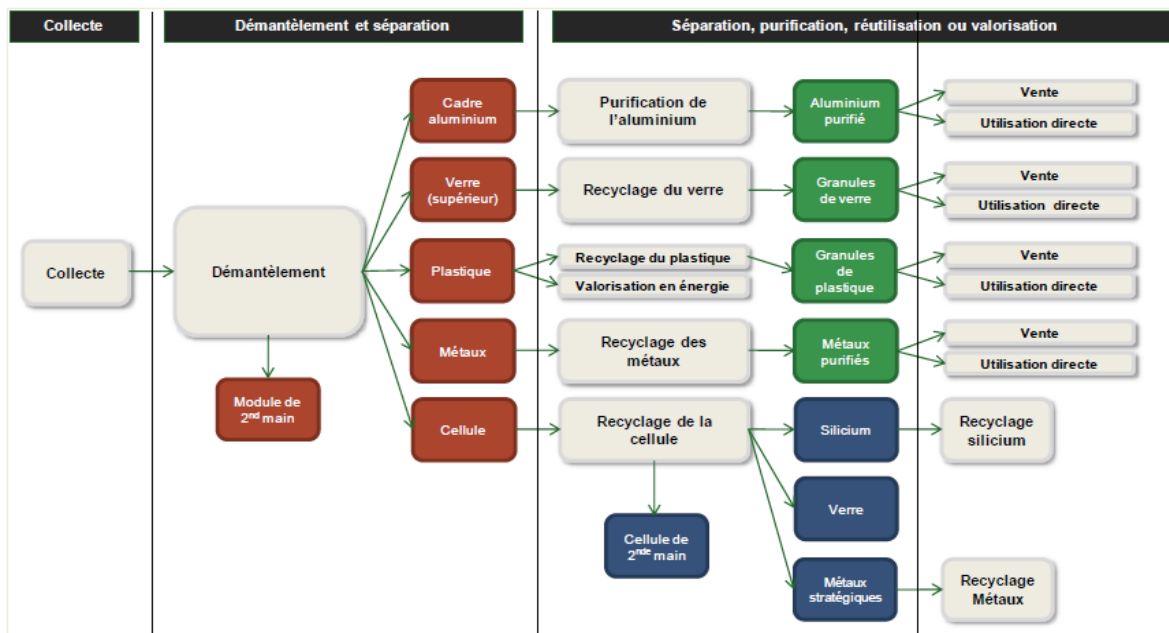


Figure I-10: Procédés SUNICON

La filière complète du recyclage des modules photovoltaïques comprend un nombre varié d'activités : de la collecte à la revente des matières recyclées, en passant par le démantèlement, la purification de fractions spécifiques, puis la réutilisation de ces dernières [75]. L'ensemble de ces activités sont résumées et structurées dans le diagramme ci-dessous (Figure II-11)



Source : RECORD / ENEA Consulting

Figure I-11: L'ensemble des activités du recyclage des panneaux photovoltaïques [75]

- Voies de recyclage et de valorisation des composants :

Tableau II -1: Voies de recyclage et valorisations des composants [75]

Composant	Voie de recyclage et valorisation
Verre	<ul style="list-style-type: none"> - Industrie du verre plat - Industrie photovoltaïque - Laine de verre Construction
EVA	<ul style="list-style-type: none"> - Réutilisation dans l'industrie chimique - Incinération pour valorisation énergétique
Semi-conducteur (Si)	<ul style="list-style-type: none"> - 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)	<ul style="list-style-type: none"> - Réutilisation à son niveau de pureté d'origine - Fabrication de nouvelles cellules photovoltaïques
Métaux stratégiques	<ul style="list-style-type: none"> - Réutilisation à leur niveau de pureté d'origine
Aluminium	<ul style="list-style-type: none"> - Réutilisation à son niveau de pureté d'origine

II.6.2 Méthodes de recyclage des panneaux photovoltaïques dans le monde

Auparavant, beaucoup d'études sur le recyclage des modules photovoltaïques, en fin de durée de vie, ont été effectuées, mais aucune d'entre elles, n'a trouvé d'application au niveau de l'industrie. Aujourd'hui, beaucoup d'entreprises s'intéressent à la mise en œuvre d'un programme de recyclage tel que la société PV CYCLE. L'énergie solaire a donc longtemps souffert de l'idée préconçue selon laquelle les panneaux photovoltaïques ne sont pas recyclables. Pour cela l'étude a montré qu'il existe six classes de recycleurs et qui 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 [75] :

- 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 (filières de recyclage connexes)

- Recycleur initialement recycleur de DEEE (Déchets d'équipements électriques et électroniques) qui étend son catalogue de produits acceptés
- Expert scientifique dont le domaine est commun à celui du procédé de recyclage.

II.7 Contexte réglementaire du recyclage de panneaux photovoltaïques en fin de vie

Seules deux régions sont en passe de mettre en application une loi spécifique au retraitement des modules photovoltaïques. Pour le reste des pays ne présentant pas de cadre réglementaire spécifique, le retraitement est réglementé par les directives générales sur l'environnement, la santé, la sécurité et le retraitement des déchets [75] :

- **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.

Pour le reste des pays ne présentant pas de cadre réglementaire spécifique, le retraitement est réglementé par les directives générales sur l'environnement, la santé, la sécurité et le retraitement des déchets.

Il est important de souligner que l'ensemble des pays actifs sur le marché du photovoltaïque disposent à minima d'un cadre réglementaire pour le retraitement des déchets. La qualité de mise en application de ces réglementations est fluctuante d'un pays à l'autre, notamment en ce qui concerne les exportations illégales de déchets dangereux. Le principe de responsabilité élargie du producteur est déjà appliqué en Europe, en Inde, en Californie et en Chine pour certains déchets spécifiques.

La mise en œuvre d'une autre filière de recyclage basée sur ce même principe serait facilitée. Les expériences passées de mise en place d'autres systèmes de reprise et de récupération de déchets spécifiques montrent qu'un programme volontaire de reprise et de recyclage des déchets requiert une transparence envers les entités régulatrices. Un système de traçabilité, reposant sur des outils de mesure et d'évaluation des résultats, est en outre une condition nécessaire à la reconnaissance d'un programme volontaire. Par ailleurs, selon Ökopol [81], un système de reprise et de récupération de déchets spécifiques gagne à être établi par un panel varié d'acteurs. Les situations de monopoles d'un acteur responsable de la coordination de l'ensemble des acteurs de la filière seraient à éviter. Dans le cas de la mise en place d'une filière spécifique pour les déchets photovoltaïques dans le cadre de la DEEE, une amélioration des performances de recyclage et les acteurs actuels de la filière photovoltaïques seraient potentiellement favorisés. Cependant, la mise en place d'éco-organismes spécifiques aux déchets photovoltaïques peut présenter un risque important d'oligopole et interdépendance entre les éco-organismes et les centres de retraitement spécialisés.

11.8 Industries de recyclage des panneaux photovoltaïques

Tableau I-2: Industries de recyclage de panneaux photovoltaïques en fin de vie [186].

Nom de l'entreprise	Région	Services de recyclage	Produits recyclés
Aurubis	Allemagne	Commerce de matières recyclées	Éléments chimiques [82]
Chaoqiang Silicon Material	Chine	Recyclage direct	Lingot, plaquettes [83]
Dynamic Lifecycle Innovations	Etas-Unis	Recyclage direct	Panneaux solaires, Câble, boîte de jonction, cadre. [84]
ECS Refining	Etas-Unis	Recyclage direct	Panneaux solaires [85]
Eiki Shoji	Japon	Commerce de matières recyclées	Panneaux solaires [86]
Elsi	Allemagne	Commerce de matières recyclées	Panneaux solaires [87]
Envaris	Allemagne	Recyclage direct	Panneaux solaires, Cable [88]
Euresi	Espagne	Commerce de matières recyclées	Encapsulant, feuille arrière [89]
Exotech	Etas-Unis	Commerce de matières recyclées	[90]
Experia Solution	Italie	Recyclage direct des équipements	Panneaux solaires, ruban, Verre, Câble, boîte de jonction... [91]
First solar	Etas-Unis	Recyclage direct	Panneaux solaires [92]
Frisetec	Allemgane	Recyclage direct	Recycalge de lingot, Plaquettes, Cellules [93]
Green lights recycling	Etas-Unis	Recyclage direct	Panneaux solaires [94]
Gvs	Suisse	Recyclage direct	Panneaux solaires [95]
IBA	Hong Kong	Commerce de matières recyclées	Lingot, Plaquettes[96]
IMMARK	Suisse	Recyclage direct	Panneaux solaires [97]
Infoactiv	Australie	Recyclage direct	Panneaux solaires [98]
Interco trading	Etas-Unis	Recyclage direct	Panneaux solaires, Verre, Boîte de jonction, Cadre [99]
Jiangsu Juxin Energy Silicon Technology	Chine	Recyclage direct	Lingot, plaquettes, Cellules, Panneaux solaires, bouillie[100]
Kunshan Aotesi Solar Technology	Chine	Recyclage direct	Recyclage de cellules, panneaux solaires. [101]
Kunshan Hairunder Recycling Management	Chine	Commerce de matières recyclées	Plaquettes, Panneaux solaires, Ruban [102]
Kunshan Suda Jingwei Electronic Technology	Chine	Recyclage direct	Lingot, Plaquettes, Cellules, Panneaux solaires, bouillie [103]

KWB Planreal	Suisse	Commerce de matières recyclées	Panneaux solaires [104]
La Mia Energia	Italie	Recyclage direct des équipements	Lingot, plaquettes, Cellules, panneaux solaires, Métallisation [105]
Metal & Catalyst Resources	Etas-Unis	Recyclage direct	Éléments chimiques [106]
Morgen Industries	Etas-Unis	Recyclage direct	Cellules [107]
Panoramic Resources Partners	Royaume-Unis	Recyclage direct	Recyclage de panneaux solaires [108]
PV Techno Cycle	Japon	Recyclage direct	Panneaux solaires [109]
R3 TECH	Hong Kong	Commerce de matières recyclées	Panneaux solaires, Cadre [110]
Reclaim PV Recycling	Australie	Recyclage direct	Cellules [111]
Recycle IT	Irlande	Recyclage des équipements	[112]
Recycle Solar Technologies	Royaume-Unis	Recyclage direct	Panneaux solaires, Verre, Cable, boîte de jonction....[113]
Recyklix	République tcheque	Recyclage direct	Panneaux solaires [114]
Reiling Glas Recycling	Allemagne	Recyclage direct	Panneaux solaires [115]
REMA PV Systém	Czech Republic	Recyclage direct	Panneaux solaires [116]
Rinovasol	Allemagne	Recyclage direct	Panneaux solaires [117]
RoSi Solar	France	Commerce de matières recyclées	[118]
SENS Foundation	Suisse	Recyclage direct	Panneaux solaires [119]
SIC Processing	Germany	Recyclage direct des équipements	Bouillie [120]
Silcontel	Israel	Recyclage direct	Recycle...Lingot, Plaquettes, Cellules, Panneaux solaires. [121]
Silrec	Etas-Unis	Recyclage direct	Lingot, Plaquettes [122]
Solar2Recycle	Royaume-Unis	Recyclage direct	Cellules, panneaux solaires Cable, boîte de jonction [123]
SolRecycle	Espagne	Recyclage direct des équipements	Plaquettes, Cellules, Panneaux solaires, Verre,Cable, boîte de jonction [124]
SRS	Etas-Unis	Recyclage direct	Lingot [125]
Suzhou Hedeying Metal	Chine	Recyclage direct	Ruban [126]
Suzhou Minlai Silicon Energy Recycling	Chine	Commerce de matières recyclées	Plaquettes, Cellules, metallization [127]
Suzhou Shangyunda	Chine	Recyclage direct	Lingot, Plaquettes, Cellules, Panneaux solaires, bouillie...[128]

Suzhou Shunhui New Energy Technology	Chine	Recyclage direct	Plaquettes, Cellules, Panneaux solaires...[129]
Tekoverly	Etas-Unis	Recyclage direct	Panneaux solaires [130]
The Recycling Village	Irlande	Recyclage direct	Panneaux solaires [131]
Trinity	Japon	Recyclage direct	Recycle...Lingot, Plaquettes, Cellules, éléments chimiques [132]
Yezon-PV	Chine	Recyclage des équipements	Bouillie [133]
Yuepeng New Energy	Chine	Recyclage direct	Plaquettes, Cellules, Panneaux solaires, Bouillie, Métallisation... [134]

11.9 Etude économique du recyclage des panneaux photovoltaïques

Tableau II -3: Etude économique comparative entre des articles du recyclage des panneaux solaires.

Thèmes	Méthodes utilisées	Résultats
Hai Cui et al. [135] Dans leur article intitulé Techno-économique analyse de recyclage des modules photovoltaïques en silicium cristallin Procédés, adoptent la méthode ascendante du National Renewable Energy Laboratory pour estimer les coûts de fabrication des modules photovoltaïques afin d'en analyser l'aspect économique.	<ul style="list-style-type: none"> Le processus Full Recovery End of Life Photovoltaic (FRELP) (récupération totale de l'énergie photovoltaïque en fin de vie) Processus de l'Arizona State University (ASU) Un processus hybride hypothétiquement proposé comme combinant les deux 	<ul style="list-style-type: none"> Le processus FRELP présente des taux de récupération plus élevés pour les produits finaux L'argent est la principale source de revenus L'aluminium est le deuxième contributeur en termes de recettes
R. Deng, et al. [136] Les méthodes de recyclage des modules photovoltaïques en silicium sont examinées dans ce travail et comparées à la mise en décharge. Les tendances probables de la valeur des matériaux récupérables, les coûts des traitements, les implications politiques, l'analyse technico-économique compare plusieurs technologies pour aider à comprendre les barrières économiques actuelles sont également pris en compte.	<ul style="list-style-type: none"> Décharge Broyage et recyclage du verre Processus mécanique + chimie simple Processus thermique + chimie plus complexe 	<ul style="list-style-type: none"> Le coût de la collecte doit être inférieur à 200 \$/tonne pour décourager suffisamment la mise en décharge et soutenir les modules de recyclage. Le recyclage du verre est aujourd'hui l'option de recyclage la plus économiquement viable Le recyclage thermique est susceptible de devenir la méthode de recyclage la moins chère lorsque les revenus du silicium dépassent 350 dollars par tonne de modules recyclés. Le recyclage mécanique et le recyclage thermique doivent réduire le coût total du traitement d'au moins 30 %, pour atteindre respectivement 400-500 \$/tonne et 700-800 \$/tonne, afin de devenir financièrement viables.
DENG ET AL. [137] Dans leur article, ils identifient les possibilités d'utilisation du silicium récupéré dans les modules PV en fin de vie pour la fabrication de seconde vie, en prenant comme exemple un module monocristallin de 60 cellules à émetteur et cellule arrière passivés (PERC) pour explorer les	<ul style="list-style-type: none"> Production de modules PERC mono standard. Le silicium recyclé remplace le MG-Si lors de la production de poly-Si. 	<ul style="list-style-type: none"> Le coût du MG-Si recyclé devrait être inférieur à 2,5 USD/kg, pour en faire une source importante d'approvisionnement de l'industrie photovoltaïque.

<p>avantages économiques lorsque le silicium récupéré remplace la demande de silicium vierge.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Le silicium recyclé remplace le SoG-Si lors de la production des plaquettes. • Le silicium recyclé remplace les plaquettes mono-silicium lors de la production des cellules. 	<ul style="list-style-type: none"> • Nous pourrions utiliser le SoG-Si recyclé comme matière première pour la croissance des plaquettes, car les pertes d'efficacité sont faibles par rapport à la cellule standard. 2.5%_{abs}. Les modules reconditionnés deviennent plus chers, ce qui nécessite une réduction supplémentaire des coûts et une technologie de recyclage. • Les tranches de silicium intactes de haute pureté récupérées peuvent être réutilisées pour la fabrication de cellules, même si ces cellules remises à neuf ont un rendement inférieur à celui des cellules standard. 0.4%_{abs}. Bien que ces cellules remises à neuf aient un rendement inférieur à celui des cellules standard, les fabricants peuvent potentiellement économiser plus de 20 % des coûts de fabrication.
<p>Emmanuel Ndzibah et al. [138] ont abordé dans leur étude de recherche la description technique des processus technologiques pour l'utilisation des panneaux solaires photovoltaïques en fin de vie, ils ont également abordé le phénomène en décrivant les problèmes au niveau mondial et les défis pour les économies en développement, comme c'est le cas du Ghana, ils ont également proposé une feuille de route pour réduire les impacts environnementaux possibles et maximiser les opportunités économiques et l'amélioration de la qualité de la vie.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Cette approche utilise une technique d'échantillonnage raisonné pour rassembler des échantillons d'experts à partir de sources de données secondaires, telles que des articles de journaux, des rapports officiels, des thèses et des sites web vérifiés. 	<ul style="list-style-type: none"> • L'acte de réparation et de recyclage a permis de développer un cadre de réduction fondamental. • La création de valeur, ainsi que l'intégration transparente des partenariats public-privé dès le début de l'adoption ou de la diffusion des systèmes photovoltaïques solaires, sont cruciales dans ces pays en développement. • La proposition d'une plateforme d'éducation à la durabilité peut contribuer à lever les obstacles classiques liés aux tactiques de gestion inadéquates qui prévalent dans de nombreuses économies en développement.
<p>Elizabeth Markert et al. [139] Ils ont procédé à une évaluation des coûts et des avantages du recyclage des panneaux photovoltaïques en silicium cristallin (c-Si), en tenant compte des facteurs privés et externes.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • La méthode FRELP (Full Recovery End-of-Life Photovoltaic). 	<ul style="list-style-type: none"> • Le coût de la gestion de la durée de vie d'un module photovoltaïque c-Si est de 6,72 USD/an.m² • Le coût le plus élevé était lié au transport (3,36 USD/m²). • Les dépenses liées au processus de recyclage, qui englobent le coût des matériaux consommés, de l'électricité et de l'investissement dans les installations de recyclage, se sont révélées les plus insignifiantes (0,25 USD/m²) • le coût externe de la gestion du PV EoL est très similaire au coût privé (environ 5,2 USDm²). • Si l'on ne tient pas compte des coûts externes du recyclage, l'avantage économique net de la

		<p>méthode FRELFP est de près de 7 USD par m^2 de module. Cependant, lorsque les coûts externes du recyclage sont pris en compte, l'avantage diminue à 1,19 USD par m^2.</p>
<p>Abylkaiyr Omar et al. [140] Ont présenté dans leur article un examen complet des technologies actuelles de recyclage des panneaux photovoltaïques et de leur utilisation dans des projets antérieurs. La section des résultats et de la discussion examine la faisabilité du recyclage pour le cas Burnoye-1 dans la région de Jambyl au Kazakhstan et évalue les avantages de l'incorporation de cet aspect dans la centrale électrique existante.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • La plateforme RETScreen Expert est utilisée pour effectuer l'analyse. 	<ul style="list-style-type: none"> • Les dépenses liées à l'investissement et à la transformation comprennent le coût des matériaux utilisés, tels que l'hydroxyde de calcium, l'acide nitrique, l'eau et l'électricité. C'est l'électricité qui a l'impact le plus important. • Le centre de recyclage est situé à proximité de l'usine Burnoye-1. Les coûts de transport pour la collecte peuvent être négligeables, ce cas ne prend en compte que les coûts de transport pour la mise en décharge, qui s'élèvent à 0,79 USD par 100 km. • La valeur économique calculée des matériaux récupérés est de 13,6 USD/an.m^2 • Fournir un revenu de 1,17 million USD pour les dépenses de fonctionnement, inexistant dans le scénario de base. • Augmenter le bénéfice net actuel du projet de 0,16%.
<p>P.S.S. Camargo et al. [141] Dans leurs travaux, le processus de traitement thermique est utilisé pour séparer et concentrer les matériaux économiquement intéressants des laminés de modules photovoltaïques en silicium cristallin.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Analyse chimique • Analyse thermogravimétrique 	<ul style="list-style-type: none"> • L'argent représente 35,2 % de la valeur économique obtenue par la récupération des matériaux d'un module PV. • Le cuivre représentait 5,2 % de la valeur économique totale, compte tenu du prix de 5,0 USD/kg. • Le recyclage du verre n'est économiquement viable que dans les pays où les taux de mise en décharge sont élevés ou où la mise en décharge des modules est interdite • Le traitement mécanique et le recyclage thermique doivent voir leurs coûts réduits d'au moins 30 % pour devenir économiquement viables • L'utilisation circulaire de silicium de haute pureté et de plaquettes de silicium intactes provenant de modules photovoltaïques en fin de vie peut être économiquement réalisable avec une réduction de 20 % du coût de fabrication des modules de seconde vie
<p>M.S.W. Lim et al [142] ont commencé leur travail par des évaluations expérimentales, y compris le démontage manuel et les caractérisations, la gravure à l'acide et l'électrodéposition. En outre, ils</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Démontage et caractérisation • Gravure à l'acide 	<ul style="list-style-type: none"> • Les simulations de SuperPro Design indiquent un taux de rendement interne de 28,2 % pour une capacité de traitement

<p>ont analysé le cycle de vie et les évaluations économiques afin d'évaluer les impacts environnementaux et économiques du processus.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Voltampérométrie cyclique (CV) et électrodéposition 	<p>de 892,5 kg/hr. De plus, le projet a une période de récupération d'un an et une valeur actuelle nette de 5 212 000 \$ (taux d'intérêt de 7,0 %).</p> <ul style="list-style-type: none"> • Malgré ses quantités relativement faibles, la récupération de l'Ag génère la part la plus importante des recettes en raison de sa rareté. • Les cadres en aluminium sont les composants qui génèrent le deuxième chiffre d'affaires le plus élevé, avec 43 % du chiffre d'affaires total. • La récupération du plastique, du silicium et du cuivre représente un revenu marginal d'environ 2 à 6 %.
--	---	---

II.10 Etude environnementale du recyclage des panneaux photovoltaïques

Tableau II -4: Etude environnementale comparative entre des articles du recyclage des panneaux solaires.

Thèmes	Méthodes utilisées	Résultats
<p>Manisha Sheoran et al. [143] Discutent dans leur article de l'évaluation des déchets photovoltaïques en Inde et de leur impact sur l'environnement, ils ciblent également l'influence sociale et économique apparemment florissante des panneaux photovoltaïques solaires recyclés.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Méthodologie Life cycle assessment (LCA). 	<ul style="list-style-type: none"> • La production de panneaux solaires photovoltaïques nécessite l'utilisation de produits chimiques dangereux qui constituent une menace pour la santé et la sécurité des personnes. • L'utilisation de matériaux dangereux doit être remplacée par des substances respectueuses de l'environnement • Les panneaux de silicium cristallin contiennent la majorité des métaux sûrs par rapport aux panneaux CdTe, CIS, GaAs et amorphes. • Les émissions gazeuses libérées dans l'environnement au cours de la fabrication ont un impact négatif. • Les panneaux de silicium cristallin contiennent des quantités minimales autres que l'argent et ne sont pas toxiques pour l'environnement.
<p>Ilke Celik et al. [144] Dans cette étude, des analyses économiques et environnementales sont menées pour évaluer les impacts liés au transport de différentes technologies de modules photovoltaïques en fin de vie.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Méthode Life cycle assessment (LCA) pour calculer les impacts environnementaux des processus de recyclage 	<ul style="list-style-type: none"> • $CO2_{eq}$ Associées aux transports représentent une part importante des incidences sur les émissions de gaz à effet de serre. • Les émissions associées au transport $CO2_{eq}$ contribuent à hauteur de 47 %, 28 % et 40 % à l'impact global sur l'environnement des déchets photovoltaïques de type c-Si, CdTe et CIGS. • Les camions à essence ont un impact environnemental supérieur de 65 à 95 % à celui des options de transport

		<p>alternatives que sont les trains et les bateaux diesel et électriques.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les émissions liées à la phase EoL sont plus importantes pour les modules photovoltaïques à couche mince que pour les technologies photovoltaïques au silicium cristallin
<p>Aleksandra Ziemińska-Stolarska et al. [145] Ont examiné dans cette étude l'état actuel des technologies CPV (photovoltaïque concentré) dans des conditions réelles et en laboratoire, en soulignant leur valeur marchande et en évaluant l'impact environnemental des technologies individuelles à l'aide de la méthodologie de l'analyse du cycle de vie (ACV).</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Life cycle assessment (LCA) 	<ul style="list-style-type: none"> • Pour la plupart des constructions, la principale contribution à la charge environnementale est l'optique de focalisation, le système de suivi et le cadre en aluminium. • Les optiques de mise au point ont l'effet le plus important sur les émissions totales de dioxyde de carbone.
<p>Sina Herceg et al. [146] Ont examiné dans cette étude la réduction de l'impact sur l'environnement grâce à une analyse complète des différentes approches de gestion des déchets basées sur le recyclage. L'objectif principal est de quantifier les impacts des approches de gestion de l'EoL et d'évaluer leur contribution à l'empreinte environnementale globale de l'électricité produite par différentes technologies photovoltaïques, avec une attention particulière pour l'Allemagne.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Life cycle assessment (LCA) avec six approches • (Approches, matériaux, méthode d'élimination des fractions non récupérées) • N°1 Verre, aluminium, cuivre "Mise en décharge" • N°2 Verre, aluminium, cuivre "Mise en décharge / incinération". • N°3 Verre, aluminium, cuivre "Mise en décharge *./Incinération **./Incinération de la feuille de support". • N°4 Verre, aluminium, cuivre "Décharge / incinération / pyrolyse de la feuille de support". • N°5 Verre, aluminium, cuivre, MG-Si, argent "Mise en décharge/incinération". • N°6 Verre, aluminium, cuivre, MG-Si, argent "Mise en décharge/pyrolyse". 	<ul style="list-style-type: none"> • Le recyclage dédié tel que présenté dans les approches n°5 et n°6 présente le meilleur potentiel pour améliorer l'empreinte environnementale de la production d'électricité photovoltaïque. • Le traitement de la couche de feuille arrière dans les approches n°3 et n°4 n'a pas d'impact majeur sur le profil environnemental du recyclage des modules étudiés en raison de leur faible fraction massique. • Le développement d'un réseau de recyclage approprié n'apportera pas seulement des avantages sur le plan de l'environnement, mais aussi sur le plan de l'économie. Mais aura également un impact important sur l'économie et les équilibres financiers.
<p>Rishikesh Bajagain et al. [147] Abordent dans cette étude le risque de rejet d'espèces chimiques dangereuses par les modules PV et les critères de classification des déchets de panneaux PV. En outre, l'estimation des déchets solaires PV, leur catégorisation, les approches de gestion, les directives nationales et le recyclage des déchets de panneaux PV.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Diverses méthodes de test de lixiviation 	<ul style="list-style-type: none"> • Les déchets des systèmes photovoltaïques (PV) sont susceptibles de créer un problème important de gestion des déchets. En effet, les substances présentes dans les panneaux photovoltaïques peuvent potentiellement s'infiltrer dans le sol et les eaux souterraines, ce qui entraîne une pollution de l'environnement et des problèmes de sécurité. • Le recyclage des modules PV et le processus de fabrication des PV nécessitent de l'énergie et l'utilisation de matériaux toxiques lors du traitement de certaines substances.
<p>Jasleen Kaur Daljit Singh et al. [148] Dans leur étude, l'analyse du cycle de vie (ACV) de trois scénarios différents de systèmes photovoltaïques en fin de vie est prise en compte pour la</p>	<p>L'analyse du cycle de vie (ACV) de trois options d'écoconception est examinée :</p> <ul style="list-style-type: none"> • décharge 	<ul style="list-style-type: none"> • Les émissions de CO2 dans l'air ont été réduites de 0,059 kg de CO2 par kWh (scénario de mise en décharge,

<p>production de 1 kWh d'électricité en Australie sur une durée de vie de 30 ans.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • FRELP (Full Recovery EoL Photovoltaïque) • LGRF (Installation de recyclage de verre feuilleté) sont considérées. 	<p>c'est-à-dire sans recyclage) à 0,054 kg par kWh.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pour les scénarios LGRF et FRELP, cette valeur est réduite à 0,046 kg de CO2 par kWh. • L'impact du score unique de ReCiPe pour une durée de vie de 30 et 50 ans était de 0,00706, 0,00424 (diminution de 40 %) et de 0,00212 (diminution de 70 %) pour une durée de vie de 100 ans. • L'augmentation de la durée de vie du système photovoltaïque réduit également les incidences sur l'environnement. • Le panneau photovoltaïque a l'impact environnemental le plus important par rapport aux autres composants du système (système de montage, onduleur et installation électrique)
<p>F. Ardense et al. [149] Ont analysé dans leur article divers procédés de recyclage des déchets photovoltaïques en silicium cristallin, en évaluant leurs performances en termes d'efficacité des ressources et en évaluant les avantages et les charges pour l'environnement qui y sont associés.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Processus FRELP • Processus base de référence 	<ul style="list-style-type: none"> • Le processus FRELP représente un impact de 461 kg d'équivalent CO2 (CO2 eq) par tonne de déchets traités (contre 116 kg de CO2 eq/tonne pour le processus de référence) • Le recyclage des cadres en aluminium permet à lui seul de réaliser d'importants gains environnementaux. • Le transport des déchets photovoltaïques vers les installations de recyclage doit être inférieur à 100 km pour que le recyclage soit respectueux de l'environnement • Le processus FRELP se caractérise par des impacts plus importants, mais aussi par des bénéfices plus élevés. • Le processus de référence se caractérise toujours par des avantages environnementaux élevés • Les avantages du processus FRELP sont plus évidents si l'on considère les catégories d'impact axées sur l'utilisation et la récupération des matières premières.

Discussion :

Ces études ont permis d'identifier les facteurs, les barrières et les facilitateurs du recyclage des panneaux solaires au niveau économique et environnementale :

Les facteurs :

Economiquement, Permettre une gestion responsable de l'EoL des panneaux photovoltaïques conformément aux concepts de l'économie circulaire permettra d'éviter la pénurie de matériaux rares et de garantir que les ressources sont utilisées au maximum de leur potentiel [150-154,139], Les panneaux photovoltaïques contiennent des matériaux précieux qui permettent d'économiser des coûts de production grâce à la réutilisation et au recyclage des matériaux [155,156,157,135], La gestion de l'EoL renforcera l'image écologique de l'entreprise

et, par conséquent, la confiance des consommateurs et des parties prenantes. [158,159,160], Les matériaux intégrés dans les panneaux photovoltaïques proviennent de différents endroits, La réutilisation et le recyclage de ces matériaux réduiront la demande d'importation de matériaux [151].

Environnementalement, Le fait de permettre la réutilisation et le recyclage des matériaux intégrés dans les panneaux photovoltaïques permettra d'éviter l'émission d'une quantité importante de gaz à effet de serre au cours des étapes de production [161,155,151,144]. De plus, la rénovation et le recyclage des panneaux photovoltaïques (PV) nécessitent moins d'énergie que leur fabrication à partir de matériaux vierges [161,151]. En veillant à la mise en œuvre de stratégies appropriées de gestion de la fin de vie, étayées par des preuves de l'impact des produits et des matériaux [151,162].

Les Barrières :

Au plan économique, Le coût de la récupération est plus élevé que la valeur des matériaux récupérés, de même que la production à partir de matériaux vierges [150,163,137]. De plus Il n'existe aucune réglementation spécifique concernant la collecte et le recyclage des panneaux photovoltaïques ainsi que les responsabilités financières et non financières des acteurs tout au long de la chaîne d'approvisionnement [166]. En plus Il n'y a pas ou peu d'incitations pour promouvoir les activités de collecte et de recyclage EoL [150,164]. Les modèles commerciaux ou les politiques de collecte actuels ne sont pas efficaces pour inciter les producteurs à collecter les panneaux photovoltaïques EoL ou les consommateurs à les retourner [165]. Plus encore Aucune mesure d'incitation n'est prévue pour promouvoir les activités de recherche et de développement en vue de mettre au point des panneaux photovoltaïques faciles à recycler [166 ,167].

Certains consommateurs sont réticents à renvoyer les produits parce qu'ils pensent que c'est la responsabilité des fabricants ou des gouvernements [167]. De même Les producteurs sont réticents à partager des informations sur les produits avec les recycleurs en raison de la concurrence du marché, Les recycleurs ne peuvent donc pas déterminer la meilleure méthode de recyclage [166].

Au plan environnemental, Utilisation intensive de produits chimiques, de traitements thermiques et de machines au cours du processus de recyclage des panneaux photovoltaïques [168,169,143,147]. De plus, Demande d'énergie élevée pour le recyclage des panneaux photovoltaïques EoL [161,170]. La complexité du processus de recyclage inclut la qualité des produits EoL, la dispersion des produits dans différentes zones géographiques, la nécessité de recourir à différentes technologies en raison de la diversité des types de panneaux photovoltaïques. [172,173,146] L'installation de panneaux photovoltaïques est dispersée sur différents sites géographiques le transport des équipements peut entraîner des impacts environnementaux [144]. Des centres de collecte et des usines de recyclage adéquats sont nécessaires pour garantir des taux de collecte et de recyclage élevés [173,174,165].

Les Facilitateurs :

Pour le **secteur économique**, Les réglementations peuvent obliger les consommateurs, les producteurs et les recycleurs à retourner/collecter les produits à la fin de leur cycle de vie, ainsi que les producteurs ou les recycleurs à respecter une certaine norme en matière de taux de récupération [166,172,153].L'existence d'un système de reprise/collecte permet aux consommateurs de renvoyer leurs produits à la fin de leur cycle de vie pour qu'ils soient valorisés par le processus grâce à différents modèles commerciaux [163,155,175]. De plus Les incitations économiques visant à promouvoir une gestion efficace des panneaux photovoltaïques : subventions aux technologies de récupération, allègements fiscaux, pénalités pour non-conformité et augmentation du prix des matériaux vierges [150,163,176]. Des mesures incitatives stimuleront la recherche et le développement (R&D) afin d'améliorer la recyclabilité des panneaux photovoltaïques [165,177]. En outre L'augmentation du coût de l'élimination fera du recyclage une solution plus abordable [166,160,136].

Pour l'autre **secteur environnemental**, La sensibilisation des consommateurs à l'environnement est importante pour promouvoir un taux de collecte élevé des panneaux PV EoL et pour développer le marché des panneaux PV recyclés [178]. Certains producteurs recyclent le photovoltaïque pour démontrer leur responsabilité sociale et environnementale (accroître leur réputation écologique), bien que le recyclage ne soit pas rentable [161,168 ,179].

Conclusion

Ce travail nous a permis d'appréhender l'importance du recyclage des modules photovoltaïques, aussi bien un côté environnemental que du côté économique où l'entreprise doit prendre ses responsabilités et établir des programmes de collecte et de recyclage des modules photovoltaïques.

CHAPITRE III

Recyclage d'un panneau photovoltaïque

Chapitre III

Partie expérimentale

Méthodologie

Dans ce présent travail, le recyclage d'un panneau photovoltaïque en fin de vie va être réalisé. Pour ce, un panneau réalisé en 1995 sera le but de notre étude. Les cellules de ce dernier ont été fabriquées par une firme américaine, et l'encapsulation a été réalisée au CRTSE.

Ainsi le panneau étudié est du type ARCO (122×35 cm), dont le poids est de 5,512kg et comportant 35 cellules rondes. Les dimensions du panneau sont de (121,5×30 cm). La figure III.1 présente ce dernier.



Figure III -1: Panneau ARCO de 35 Cellules rondes (CRTSE)

Tableau III -1: Caractéristique du panneau ARCO (35 cellules)

Caractéristiques du panneau
P_{max} : 30 watts
I_{sc} : 2 ampères
V_{co} :15 v

Pour réaliser le recyclage du panneau différentes opérations ont été effectuées afin d'achever ce travail

III.1 Le traitement mécanique

III.1.1 Démantèlement et séparation

Durant cette étape nous allons retirer le cadre d'aluminium, la boîte à jonction, des câbles en cuivre, les vises...etc. en utilisant des outils (perceuse-visseuse bosch GSR 180-LI, différents tournevis, couteau, pince coupante, couteau multi-usage) tel que c'est présenter sur (la figure III-2).



Figure III -2: Les outils utilisés lors du recyclage du panneau photovoltaïque.

- Démantèlement de la boîte de jonction :



Figure III -3: Démantèlement de la boîte de jonction

- Séparation de la partie métallique de la boîte de jonction :

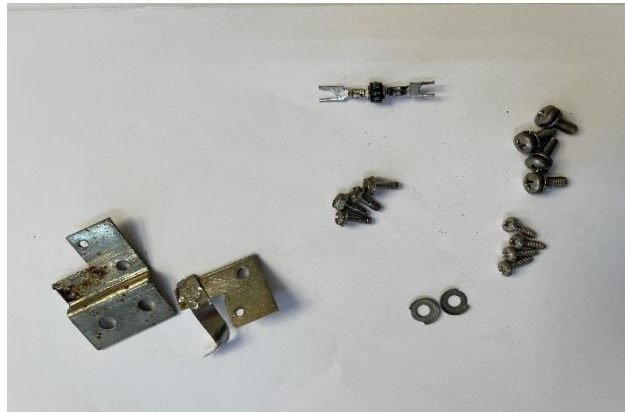


Figure III -4: Séparation de la partie métallique de la boîte de jonction

- Démantèlement du cadre aluminium :



Figure III -5: Démantèlement du cadre aluminium



Figure III -6: Résultats du démantèlement du cadre aluminium

III.2 Le traitement thermique

Dans Cette étape nous allons déposer le module dans un four. Ce four sera monté progressivement en température jusqu'à atteindre 110°C, afin de séparer la couche EVA et le tedlar. La Figure (III-7) représente le four pour le traitement thermique.

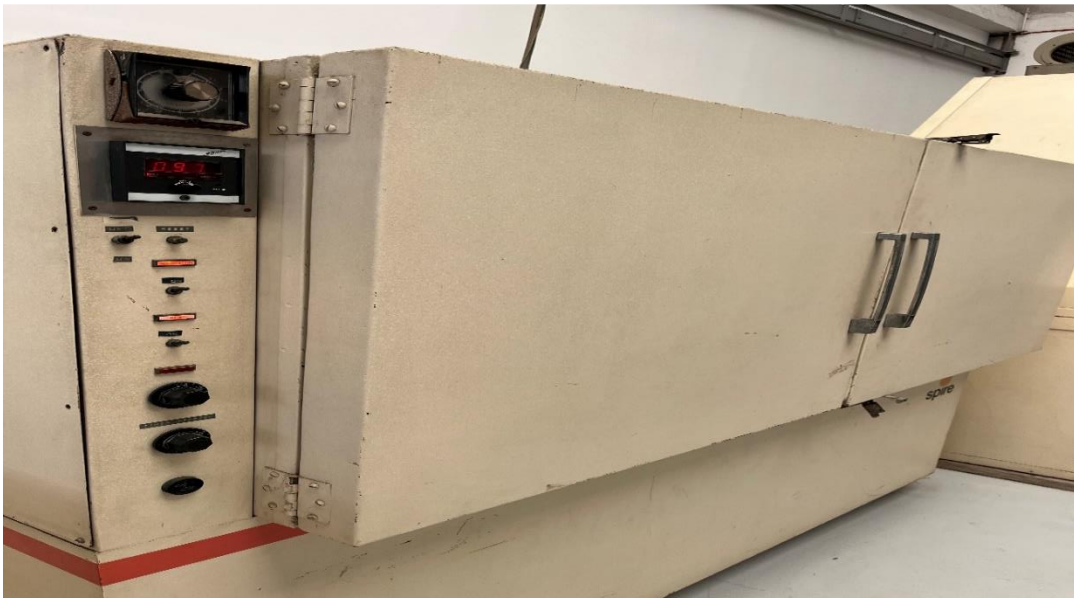


Figure III -7: le four pour le traitement thermique (CRTSE)

La figure (III-8) représente la séparation du teldar dans le four



Figure III -8: Séparation de la couche tedlar dans le four monté à 110°C

- On a pu retirer **les 3 couches de tedlar** à une température de 110°C pendant **5 minutes**.



Figure III -30: Les 3 couches tedlar retirés

- On a pu éliminer **2 couches EVA** en face arrière manuellement avec effort à une température ambiante (basse température) tels présenté dans la figure III-9 et III-10.
- Après, on a procédé au découpage à l'aide d'une tronçonneuse le panneau photovoltaïque en plusieurs échantillons dont les dimensions sont (10×9,7 cm) tel présenté dans la figure III.11 et l'échantillon obtenue est présenté sur la figure III.12.



Figure III -10: couche EVA retirés (CRTSE)

Après, on a procédé au découpage à l'aide d'une tronçonneuse le panneau photovoltaïque en plusieurs échantillons dont les dimensions sont (10×9,7 cm) tel présenté dans la figure III-11 et l'échantillon obtenue est présenté sur la figure III-12.



Figure III -11: Opération de découpe du panneau

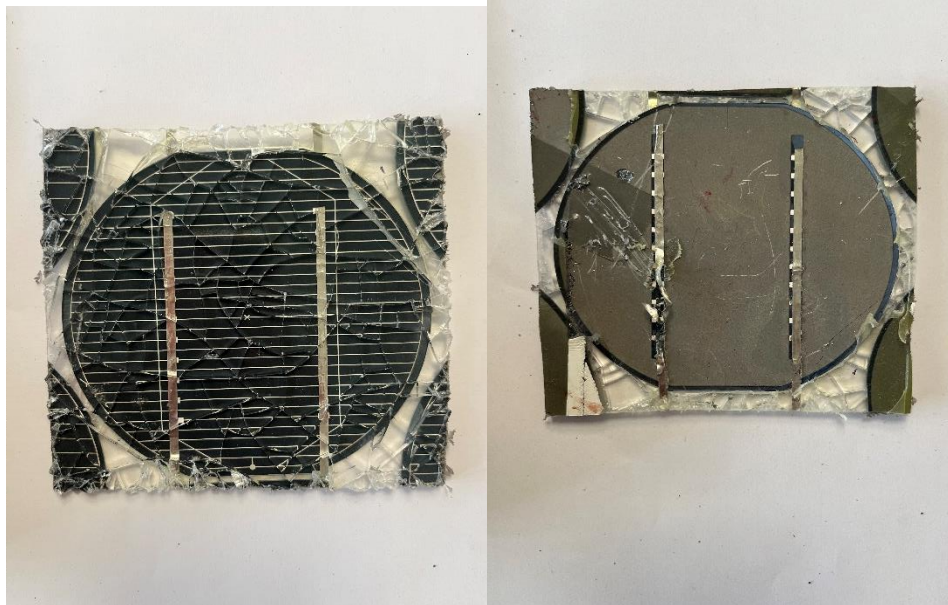


Figure III -31: Echantillon (10×9,7 cm) / face avant et face arrière (CRTSE).

III.2.1 Séparation des composants du panneau

Dans un agitateur thermique chauffée à 200°C, On va déposer notre échantillon pour pouvoir éliminer la **couche EVA face avant** ainsi récupérer **le verre, le silicium, cuivre, collecteur en cuivre** tel que c'est présenté sur la figure III.13.



Figure III -32: Echantillon (10×9,7 cm) traité sur a un agitateur thermique à 200°C (CRTSE).

Le verre présenté sur la figure III-15, les collecteurs de cuivre présentés sur la figure III-16 et le silicium présenté sur la figure III-14 ont été récupéré avec succès.



Figure III -33: les collecteurs en cuivre (CRTSE).



Figure III -34: Le silicium récupéré



Figure III -35: Verre non-trempe (CRTSE)

Résultats obtenus après le traitement mécanique et thermique

Les matériaux récupérés suite aux travaux effectués sont représentés sur le tableau III-2

Tableau III -2: Les matériaux récupérés d'un panneau ARCO

Type de panneau	Poids	Pourcentage
Panneaux ARCO	5.512 kg	100%
12 vis en acier	0.01334 kg	0.242%
Boîte de jonction	0.293kg Partie métallique :0.238kg Partie plastique :0.053kg	5.31%
Cadre d'aluminium	1.406 kg	25.05%
Tedlar	0.094 kg Couche 1: 0.029 kg Couche 2: 0.025 kg Couche 3: 0.040 kg	1.70%
Couche EVA (face avant+ face arrière)	0.018kg	0.32%
Verre non-trempe	3.371kg	61.15%
Cuivre	0.0379 kg	0.68%
Une Cellule	0.0079 kg	0.14%
35 cellules	0.2765 kg	5.01%
Les pertes	0.02193kg	0.398%

Avant de passer à la purification du silicium récupéré du panneau photovoltaïque en fin de vie, on a eu recours à la technique de caractérisation des surfaces la plus performante pour pouvoir déterminer le type de couche anti reflet et les contacts métalliques de la face avant et arrière de la cellule.

1er. La spectroscopie de photoélectrons XPS (X-ray photoelectron spectroscopy)

La spectroscopie de photoélectrons XPS consiste en l'analyse de l'énergie cinétique des électrons issus de l'ionisation des éléments d'un solide irradié par un faisceau monochromatique de rayons X.

Cette technique donne un accès direct à la composition chimique des couches superficielles d'un matériau, ainsi qu'à la structure électronique des éléments présents. Elle renseigne principalement sur les proportions relatives des éléments présents dans les premières couches atomiques et sur leur état d'oxydation [180-182].

La spectroscopie de photoélectrons XPS utilisée dans le cadre de notre travail est du type Escalab Xi+ au niveau du CRTSE présenté sur la figure III-17.



Figure III -36: La spectroscopie de photoélectrons XPS « Escalab 250 Xi » CRTSE

Résultats de l'analyse :

Par analyse XPS, on a déterminé le type de couche anti reflet et le type de contact métallique sur la face avant et arrière du silicium à purifier.

Selon la figure III-18, la couche anti reflet est du type TiO_2 et le contacte métallique est constitué d'argent

Selon la figure III-19 le contact métallique présent dans la face arrière du silicium à recycler est de l'argent aussi.

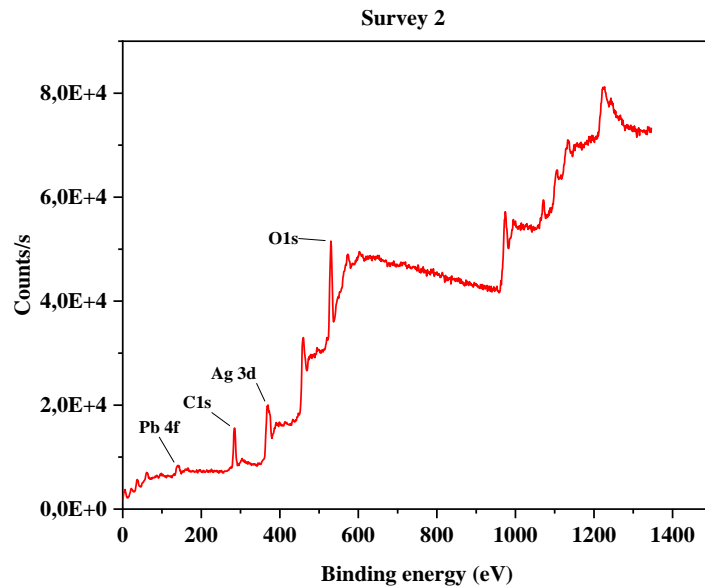


Figure III -37 : Spectre XPS de la face arrière du silicium récupéré

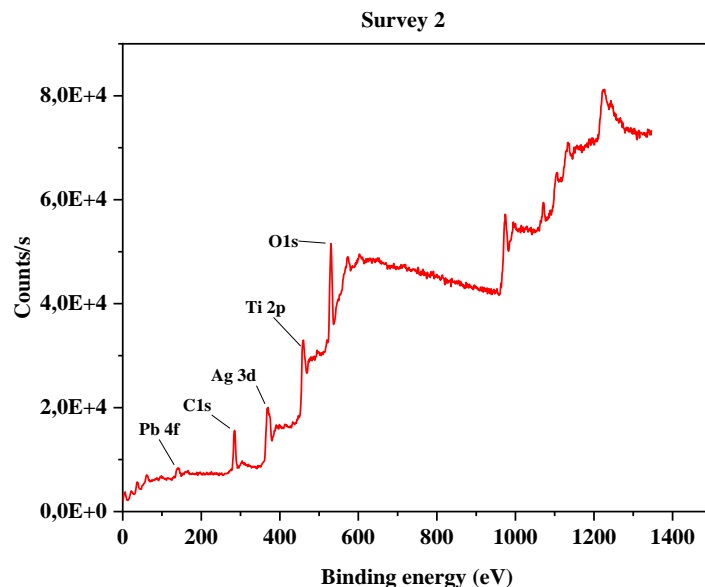


Figure III -38 : Spectre XPS de la face avant du silicium récupéré

Pour confirmer nos résultats déjà trouvés par XPS on a eu recours à l'analyse par microscopie électronique à balayage.

2e. Microscopie électronique à balayage (MEB)

- La microscopie électronique à balayage a été employée comme technique pour repérer et mesurer les empreintes de nano indentation [183]
- Le microscope électronique à balayage caractérise principalement par une sonde électronique, La sonde électronique est focalisée sur l'échantillon et l'image est formée en mode balayage. En effet, un faisceau d'électrons est focalisé dans une sonde avec une taille qui peut être inférieure au nanomètre au niveau de la zone étudiée de l'échantillon. L'acquisition d'une image se fait par balayage de la sonde sur la zone d'intérêt point par point et à chaque position de la sonde il y a la collection des

électrons transmis. Un grand avantage de ce mode d'analyse est la variété d'informations que l'on peut recueillir [184].

- C'est une technique a été conçue et développée pour produire des images d'objets avec une résolution qui peut atteindre le nanomètre sur les meilleurs équipements actuels, Par rapport à la microscopie optique, la microscopie électronique permet de plus forts grossissements et une excellente profondeur de champ [185].

Le Microscope Electronique à Balayage utilisé dans le cadre de notre travail est du type JSM-7610FPlus au CRTSE présenté sur la figure III-20.



Figure III -39 : Microscope Electronique à Balayage de haute résolution (MEB) JSM- 7610FPlus

Résultats de l'analyse :

La figure III-21 représente la face avant du silicium récupéré et le contacte métallique qui est l'argent est bien mis en évidence.

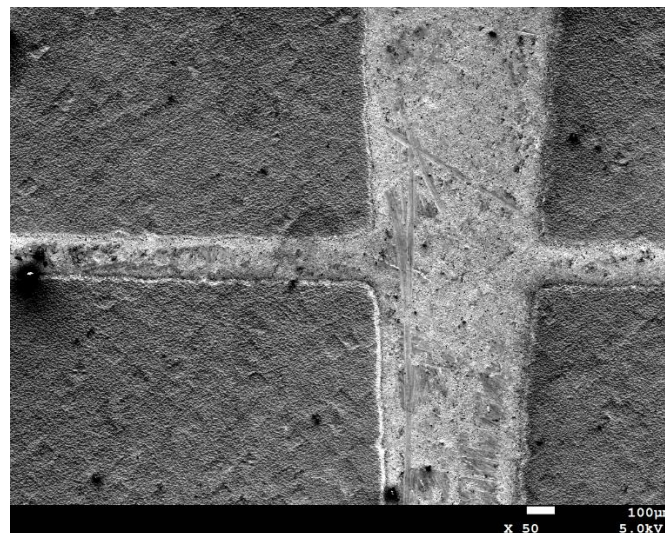


Figure III -40: Micrographie de la face avant du silicium récupéré par microscopie électronique à balayage

La figure III-22 représente la face arrière du silicium récupéré et le contact métallique qui est l'aluminium est bien mis en évidence.

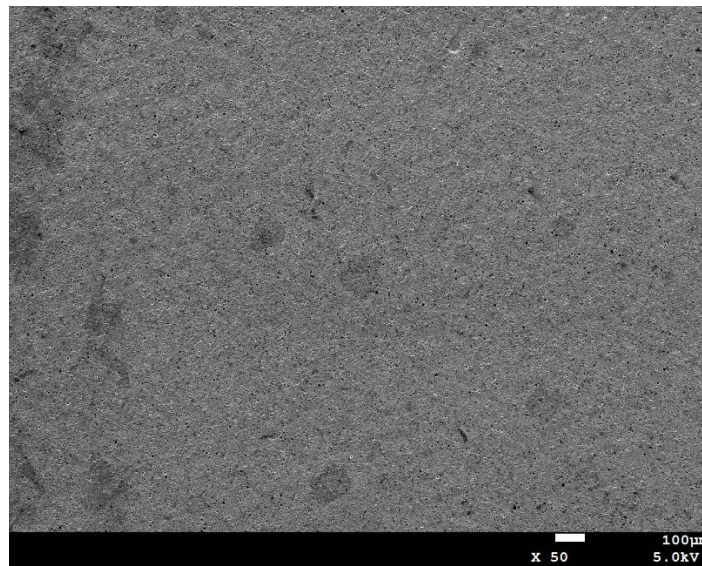


Figure III -41: Micrographie de la face arrière du silicium récupéré par microscopie électronique à balayage

Ainsi à partir de ces données on va choisir un protocole adéquat pour pouvoir éliminer le contact métallique et la couche anti reflet ainsi purifier le silicium.

III.3 Le traitement chimique

La première étape consistait à éliminer les traces d'EVA restant accrochés après leur élimination chimique tel que c'est procéder sur la figure III-23

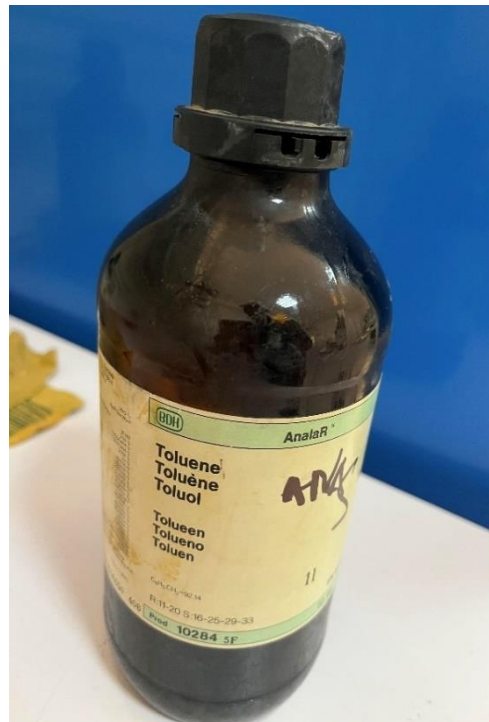
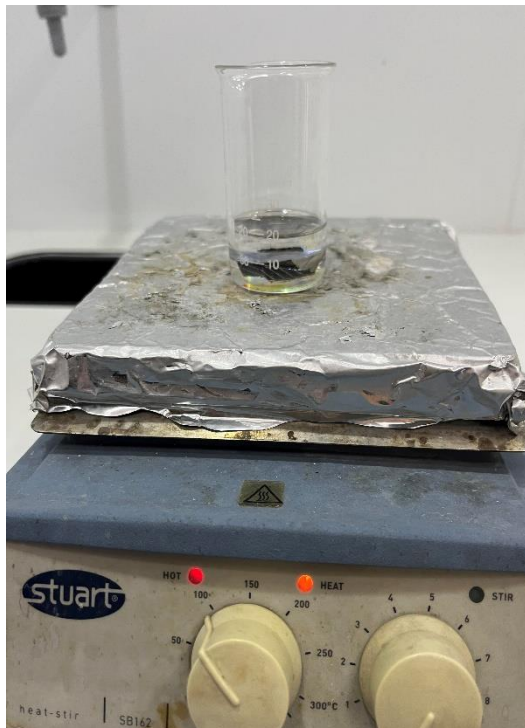


Figure III -42: Séparation de la couche EVA (quelques traces)

Pour procéder à la purification du silicium récupéré et pour mettre en évidence l'effet de l'attaque chimique sur le silicium, nous avons pris une cellule ARCO endommagé (un échantillon représentatif de grande dimension) au niveau du CRTSE, pour procéder à la purification du silicium.

- Au niveau du laboratoire de chimie nous avons utilisés une solution aqueuse de **150ml** (l'hydroxyde de sodium **NaOH** d'une concentration de **45%** + **eau distillé**) afin de séparer l'argent et la couche anti reflet de notre cellule.

La couche antireflet a pris une minute pour disparaître car elle n'est pas recyclable.

L'argent et la couche présent sur la face avant de la cellule a pu être éliminés après trois minutes de traitement tel que c'est présenté sur la figure III.24.

L'argent présent sur la face arrière de la cellule a pu être éliminés après huit minutes de traitement tel que c'est présenté sur la figure III.25.

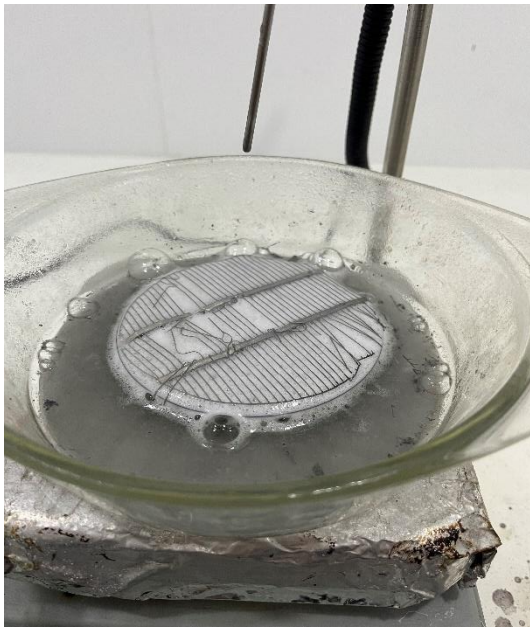


Figure III -43: Couche anti reflet éliminé Et argent séparé de la cellule de la face avant de la cellule



Figure III -44: Argent séparé de la face arrière de la cellule après 8 min

L'argent récupéré suite à l'attaque chimique de la face avant et arrière de la cellule est représenté sur la figure III-26 et III-27 respectivement.



Figure III -26 : L'argent récupéré du traitement chimique de la face avant de la cellule.



Figure III -27 : L'argent récupéré de la face arrière du traitement chimique (CRTSE).

Et finalement la cellule de silicium purifiée est présentée sur la figure III.28

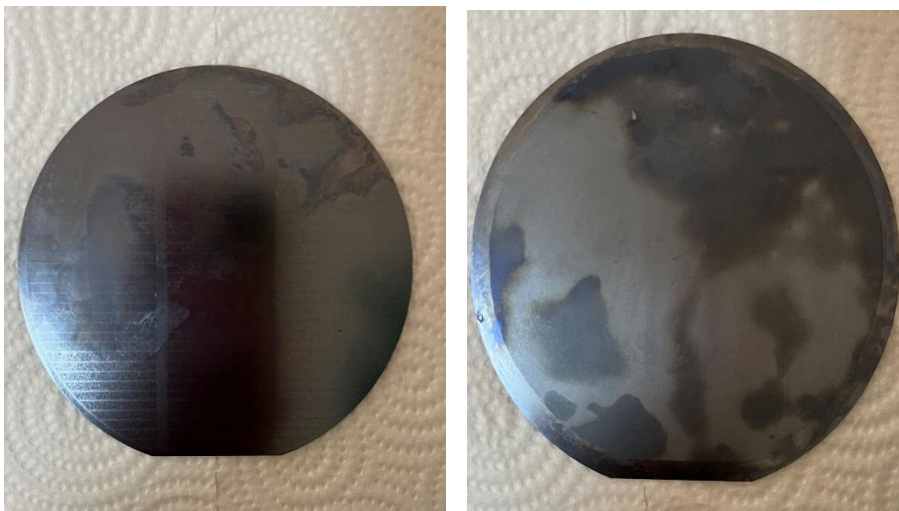


Figure III -28: Cellule solaire après purification du silicium face avant (côté gauche) et face arrière (côté droit).

Résultats obtenus du traitement chimique

35 Cellules ARCO	Poids
Argent (face arrière)	31.2 g
Argent (face avant)	7.5 g

Conclusion

Cette expérience nous a montrés que les modules photovoltaïques sont donc recyclables avec une récupération de plus de 99% des éléments le constituant.

Le recyclage des panneaux permet donc une économie circulaire grâce à laquelle il n'est pas nécessaire d'extraire sans cesse de nouveaux matériaux afin de fabriquer des modules

Conclusion générale

Le recyclage des panneaux solaires est au cœur des préoccupations du monde. Si la réduction des déchets est l'un des enjeux majeurs du recyclage de panneaux solaires, il permet aussi de limiter la quantité d'énergie nécessaire pour fournir les matières premières. Il limite ainsi les impacts environnementaux liés à la fabrication des panneaux et doit permettre à terme de baisser son coût.

Le recyclage des panneaux solaires représente un enjeu économique important. Si le volume de panneaux photovoltaïques traités est actuellement faible, une hausse exponentielle est à venir. Aujourd'hui, 1000 tonnes de déchets sont traitées chaque année dont 1% seulement provient de panneaux solaires en fin de vie. Le reste étant composé de panneaux endommagés.

Avec l'essor de la filière, près de 130 000 tonnes de panneaux solaires seront traités d'ici 2030 chaque année en Europe, contre 1 000 tonnes aujourd'hui. Cette évolution présente un enjeu économique important, en termes d'emplois et de ressources puisque le traitement des déchets solaires permet de récupérer des matériaux précieux tels que le silicium purifié dont la pénurie, entre 2006 et 2009, avait ralenti la production.

Ainsi toutes ces raisons nous ont motivés pour contribuer à la réalisation de ce travail sous la tutelle du CRTSE qui siège sur deux projets internationaux qui traite le recyclage des panneaux photovoltaïques en fin de vie, et du fait que les panneaux photovoltaïques endommagés sont constitués de matériaux inestimables ayant la possibilité d'être recyclés et réutilisés et qui répondent aux besoins de la fabrication de nouveaux modules photovoltaïques. Cette étude a permis de démontrer que le recyclage des panneaux photovoltaïques est le principal objectif des chercheurs et industriels afin d'atténuer les problèmes environnementaux liés aux traitements de fin de vie et permettre d'accroître les possibilités de développement économique tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre.

Afin de mieux comprendre les questions liées à la gestion des déchets photovoltaïques, en particulier le recyclage, depuis les processus techniques jusqu'aux implications économiques. Plusieurs brevets et recherches importants ont été examinés dans le présent travail, présentant une référence de connaissances scientifiques sur le recyclage des modules PV en c-Si.

Plus de 53 industries de recyclage de panneaux de recyclage ont été créées, de sorte que le déploiement généralisé des panneaux solaires dans le passé devrait donc créer une énorme opportunité pour le secteur du recyclage une fois que les panneaux auront atteint leur durée de vie utile.

Les résultats obtenus du recyclage effectuée sur un panneau photovoltaïque de type Arco dans le présent document ont montré qu'on a pu récupérer jusqu'à 99% des matériaux à savoir le silicium, le verre, l'encapsulant du panneau EVA, tedlar, l'argent, le cuivre, le cadre aluminium et la boîte de jonction en utilisant les différents traitements (mécanique, thermique et chimique).

L'encapsulant polymères en plastiques (EVA) et tedlar sont les plus difficiles à recycler et ont une faible valeur commerciale.

Pour procéder à la purification du silicium issue du recyclage du panneau photovoltaïque, l'analyse XPS a été effectuée et a déterminé le type de la couche anti reflet et le type de contact métallique sur la face avant et arrière du silicium.

La microscopie électronique à balayage MEB a confirmé la présence du contact métallique qui est l'argent en face avant et arrière du silicium récupéré.

La récupération totale du silicium purifié qu'on a pu effectuer dans le cadre de notre travail est le défi le plus intéressant qu'on a pu relever, bien sûr, vient après la récupération d'autres matériaux à savoir :

Le verre représente à lui seul 75 % des matériaux utilisés pour fabriquer un panneau solaire photovoltaïque et il est entièrement recyclable, l'aluminium, réutilisable à l'infini, Les métaux conducteurs sont également réutilisables pour la fabrication de nouveaux panneaux ou dans d'autres filières.

Enfin, le plastique peut être en partie recyclé pour être transformé en granules.

Au final, ce travail vise à accentuer l'importance du recyclage étant une incontournable stratégie considérable de transition vers une économie circulaire étant donné que l'évolution vers les énergies renouvelables n'est pas une réalité facile. Cependant mieux gérer la fin de vie du photovoltaïque pourrait représenter une opportunité majeure.

Références bibliographiques

- [1] Garcia CGY and Olvera BAB. The importance of increasing actual INDCs' ambitions to meet the Paris agreement temperature targets: An innovative fuzzy logic approach to temperature control and climate assessment using FACTS. In: Proc. of 2016 sixth International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications (SIMULTECH), 2016, pp. 1-5.
- [2] S.Weckend, A.Wade, and G.Heath, End of Life Management: Solar Photovoltaic Panels, National Renewable Energy Lab 2016.
- [3] Ministère de transition écologique Française “Le photovoltaïque choix technologiques, enjeux matières et opportunités industrielles”, Commissariat général au développement durable Décembre 2020.
- [4] Etude RECORD n° 11-0912/1A : Recyclage des panneaux photovoltaïques en fin de vie, Juillet 2012.
- [5] P. Cerchier, K. BrunelliLuca, P. Pezzato, “Innovative recycling of end of life silicon PV panels,” DETRITUS. Volume 16 - 2021 / pages 41-47 [4] Patrick J. M. Isherwood “Reshaping the Module: The Path to Comprehensive Photovoltaic Panel Recycling,” Sustainability 2022, 14, 1676
- [6] Patrick J. M. Isherwood “Reshaping the Module: The Path to Comprehensive Photovoltaic Panel Recycling,” Sustainability 2022, 14, 1676
- [7] Andrea Mulazzani, Panagiotis Eleftheriadis and Sonia Leva,” Recycling c-Si PV Modules: A Review, a Proposed Energy Model and a Manufacturing Comparison”, Bari, Italy, 7–10 September 2021.
- [8] Jäger-Waldau, A. (2018). PV Status Report 2018 (Publications Office of the European Union, Ed.). http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC113626/pv_status_report_2018_online.pdf. Accessed: 14 February 2019
- [9] I. Celik, Brooke E. Mason, A. Phillips, Environmental impacts from photovoltaic solar cells made with single walled carbon nanotubes, Article, 2017
- [10] RH Ahangharnejhad, Adam B. Phillips, Kiran Ghimire, Prakash Koirala, Irradiance and temperature considerations in the design and deployment of high annual energy yield perovskite/CIGS tandems, Article, Energy Fuels 2019
- [11] Renewables 2018 Global Status Report, REN21
- [12] Paarth Gupta et al. A Review on Life Cycle Assessment of Solar PV Panel,article ,2021
- [13] Kakkan Ramalingam, Chandrasen Indulkar, Solar Energy and Photovoltaic Technology, Article, 2017
- [14] Mengkoing SRENG, Development of in-situ photoluminescence characterization tools for the study of semiconductors for photovoltaics application, these de doctorat, 2019
- [15] Julien Degoulange, Purification et caractérisations physico-chimiques et électriques de silicium d'origine métallurgique destiné à la conversion photovoltaïque, Article, 2009
- [16] Daniel Lincot, La conversion photovoltaïque de l'énergie solaire, Journal article, 2007
- [17] Mehul C, Raval and Sukumar Madugula Reddy, Industrial Silicon Solar Cells, Article, 2019
- [18] J. Safarian, G. Tranell, M. Tangstad, Processes for Upgrading Metallurgical Grade Silicon to Solar Grade Silicon, Energy Procedia, Article (2012)
- [19] A. Omazic, Relation between degradation of polymeric components in crystalline silicon PV module and climatic conditions: A literature review, Article,2018
- [20] Koch EC Special materials in pyrotechnics: VI, Siliconan old fuel with new perspectives, Propellants Explos Pyrotech,2007
- [21] Li H-Y, Perret-Aebi, Laure-Emmanuelle, towards in-line determination of EVA gel content during PV modules lamination processes, Proc 25th PVSC Conf 2010
- [22] J. Safarian, G. Tranell, M. Tangstad, Processes for upgrading metallurgical grade silicon to solar grade silicon,Article, Energy Procedia 20 (0) (2012)
- [24] Deren Yang, Handbook of Photovoltaic Silicon, 2019
- [25] A. Waernes, Solar grade silicon by direct metallurgical process, SINTEF/ECN/SCANARC/SUNERGY, Silicon for the chemical industry VIII,Article, June 2006

- [26] K. Peter, E. Enebakk, K. Friestad, R. Tronstadet, "Investigation of Multicrystalline Silicon Solar Cells from Solar Grade Silicon Feedstock", 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, June 2005
- [27] E. Øvrelid, B. Geerligs, A. Wærnes, O. Raaness, "Solar Grade Silicon by a Direct Metallurgical Process", Silicon for the Chemical Industry VIII, June 2006
- [28] J.W. Bencik, M. McNamara, Clean Technology—Solar Energy Primer—Report, Jefferies & Company Inc, 2007
- [29] K. Friestad, C. Zahedi, E. Enebakk, M.G. Dolmen, "Solar Grade Silicon from Metallurgical Route", 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, June 2004
- [30] Rynningen B., Lohne O., Kondo M., "Characterisation of Solar Grade (SoG) Multicrystalline Silicon Wafers Made from Metallurgically Refined Material", 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference, September 2007
- [31] R. Gløckner, J.-O. Odden, G. Halvorsen, R. Tronstad, "Environmental life cycle assessment of the Elkem Solar metallurgical process route to solar grade silicon with focus on energy consumption and greenhouse gas emissions", June 2008
- [32] Jordi Veirman, Effets de la compensation du dopage sur les propriétés électriques du silicium et sur les performances photovoltaïques des cellules à base de silicium solaire purifié par voie métallurgique, 2011
- [33] Erwann Fourmond, Contribution au photovoltaïque de première génération : du matériau silicium aux couches diélectriques, 2011
- [34] Srinivas et al. Review on Present and Advance Materials for Solar Cells, International Journal of Engineering Research-Online, 2015
- [35] Dmitrijev. S, Principles of Semiconductor Devices, Oxford University Press, Oxford, 2006
- [36] Bertolli. M, Solar Cell Materials, Course: Solid State II, Department of Physics, University of Tennessee, 2008
- [37] Jayakumar. P, Solar Energy Resource Assessment Handbook, Renewable Energy Corporation Network for the Asia Pacific, (2009)
- [38] B. Ferrand, Méthodes d'élaboration de cristaux massifs pour l'optique, in : EDP Sciences, 2003
- [39] J. DUVEAU, M. PASQUINELLI, M. THOLOMIER, Électronique IUT 1 re année, 2ème Édition, 2017, France
- [40] Photovoltaïque.info - Techniques de fabrication des modules au silicium (2023)
- [41] Caroline Boulord : « DEVELOPPEMENT DE TECHNIQUES DE METALLISATION INNOVANTES POUR CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES A HAUT RENDEMENT », Thèse de Doctorat, 2011
- [42] M. HASNI, Comparaison par simulation numérique entre une cellule solaire n/p et une cellule solaire p/n en silicium cristallin par SCAPS, Mémoire de Master, Université Med Khider Biskra, 2014
- [43] Steven Hegedus, and Antonio Luque, Achievements and Challenges of Solar Electricity from Photovoltaics, 2010
- [44] A. Luque, S. Hegedus, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, British Library, 2002,
- [45] S. Dubois, Influence des interactions impureté-défaut et impureté-impureté sur le rendement de conversion des cellules photovoltaïques au silicium cristallin, Thèse de l'université Paul Cézanne, 2007
- [46] Jiang S et al. Encapsulation of PV modules using ethylene vinyl acetate copolymer as the encapsulant, Macromol React Eng 2015
- [47] Abay Serikkanov et tout, The Possibility of Silicon Purification by Metallurgical Methods: Part I, Article, 2022
- [48] BELKHAYAT Merieme, Les fours de cristallisation du silicium photovoltaïque, mai 2017
- [49] Lightning in a bottle? Solar power in a chip Silicon purification process "under control" by ABB, rapport, 2012
- [50] L. Arnberg, M. Di Sabatino, Eivind J. Øvrelidet, State-of-the-art growth of silicon for PV applications, Journal of Crystal Growth (2012)
- [51] Frederic Jay, « Nouveaux substrats de silicium cristallin destinés aux cellules photovoltaïques à haut rendement –cas du silicium mono-like et du dopage aux donneurs thermiques liés à l'Oxygène pour les cellules à hétérojonction de silicium », Doctorat en Matériaux, Mécanique, Génie Civil, Electrochimie (2MGE), Université de Grenoble Alpes, 2016

- [52] Amal Nadri, Modélisation de la microstructure des grains dans le silicium multi cristallin pour le photovoltaïque, Autre, Université de Grenoble, 2012
- [53] M. Rafik BENRABBAH, Développement de procédés plasma pour l'élaboration et la caractérisation du silicium photovoltaïque, Thèse de doctorat, 2015
- [54] Oliveira MCC de, Diniz Cardoso ASA, Viana MM, Lins V de FC, The causes and effects of degradation of encapsulant ethylene vinyl acetate copolymer (EVA) in crystalline silicon photovoltaic modules: a review, *Renew Sustain Energy Rev* 2018
- [55] Abdelouahab Zaatri, S. Belhour, Reconstitution de la caractéristique I – V et détermination de la puissance d'un système photovoltaïque, article, 2009
- [56] *photon international* 2012
- [57] Sashivinay Kumar Gaddam et al. Advanced polymer encapsulates for photovoltaic devices A review, Article, 2021
- [58] Oliveira MCC de et al. the causes and effects of degradation of encapsulant ethylene vinyl acetate copolymer (EVA) in crystalline silicon photovoltaic modules: a review, *Renew Sustain Energy Rev* 2018
- [59] Snapshot of Global PV Markets 2023 Report IEA-PVPS T1-44:2023
- [60] Andrea Mulazzani, Panagiotis Eleftheriadis and Sonia Leva, "Recycling c-Si PV Modules: A Review, a Proposed Energy Model and a Manufacturing Comparison", Bari, Italy, 7–10 September 2021.
- [61] IRENA and IEA-PVPS. End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels; Technical Report, 2016.
- [62] Sharma, D. D. (2011). PERFORMANCE OF SOLAR POWER PLANTS. NEW DELHI: Central Electricity Regulatory Commission.
- [63] Gangal, S. (2020, november 2). The Effect of Heat and Temperature on Photovoltaic Modules. Retrieved january 2021
- [64] K. Hamouda , A. Tkouti , M.D. Mouss , C. Hamouda et A. Malek "Analyse technique et économique de recyclage des modules photovoltaïques" , *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 15 N°2 (2012) 331 350
- [65] Charline Froitier - Tsinghua University, "Technology assessment of recycling end of life photovoltaic solar panels: a prospective study," Tsinghua University, Rapport de thèse 2010
- [66] Paiano, A. (2015). Photovoltaic waste assessment in Italy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 99–112. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.208>
- [67] Tao, M., Fthenakis, V., Ebin, B., Steenari, B. M., Butler, E., Sinha, P., Corkish, R., Wambach, K., & Simon, E. S. (2020)
- [68] IRENA. (2021b). International Renewable Energy Agency –
- [69] Padoan, F. C. S. M., Altimari, P., & Pagnanelli, F. (2019). Recycling of end of life photovoltaic panels: A chemical prospective on process development
- [70] End-of-Life Management: Solar Photovoltaics Panels [en ligne]. International Renewable Energy Agency (IRENA), juin 2016
- [71] Photovoltaic Degradation Rates – An Analytical Review [en ligne]. Dirk C. JORDAN and Sarah R. KURTZ, juin 2012, 32 pages
- [72] Fraunhofer ISE, Photovoltaics Report, updated 14.11.2019
- [73] Parikhit Sinha, Maxime Cossette, and Jean-François Ménard, End-of-Life CdTe PV Recycling with Semiconductor Refining 2012
- [74] The recycling advantage – Cost effective. Sustainable. *FIRST SOLAR*. 8 juillet 2020
- [75] Etude RECORD n° 11-0912/1A : Recyclage des panneaux photovoltaïques en fin de vie, Juillet 2012.
- [76] K. Hamouda, A. Tkouti, M.D. Mouss, C. Hamouda et A. Malek "Analyse technique et économique de recyclage des modules photovoltaïques", *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 15 N°2 (2012) 331 – 350
- [77] E. Radziemska, P. Ostrowski, A. Cenian and M. Sawczak, 'Chemical, Thermal and Laser Processes in Recycling of Photovoltaic Silicon Solar and Modules', *Ecological Chemistry and Engineering*, Vol. 17, N°3, pp. 385 – 391, 2010
- [78] Fabrication d'un module photovoltaïque, <http://www.energiesdouce.com/conseils-faq-panneaux-solaires-photovoltaïques-faq>

- [79] O. Papathanasiou, A. Kreuzmann, 'Schrott im grünen Mäntelchen', Photon das Solarstrom-Magazin, Februar 2008
- [80] Hichem Zayani, Fedia Mabrouk, Med Amine Gharbi, Le colloque international de l'Eco-Innovation «ECONOV 2022». Le 07-09 Mai 2022. Tunisie
- [81] Okopol, "Study on the development of a take-back and recovery system for photovoltaic products," November 2007
- [135] Hao Cui, G. Heath, T. Remo, Techno economic analysis of high-value, crystalline silicon photovoltaic Module recycling processes, article, 2022
- [136] R. Deng, Nathan L. Chang, Zi Ouyang, Chee Mun Chong, A techno-economic review of silicon photovoltaic module recycling, article, 2019
- [137] R. Deng, N. Chang, M. Monteiro Lunardi, Remanufacturing end-of-life silicon photovoltaics: Feasibility and viability analysis, article, 2020
- [138] Emmanuel Ndzibah, G. Andrea De La Cruz, A. Shamsuzzoha, end of life analysis of solar photovoltaic panel: roadmap for developing economies, article, 2021
- [139] Elizabeth Markert, Ilke Celik, Defne S Apul, Private and Externality Costs and Benefits of Recycling Crystalline Silicon (c-Si) Photovoltaic Panels, article, 2020
- [140] Abylkaiyr Omar, Zanggar Seilkhan, Gulzhahan Bissembayeva, The Circular Economy Approach to Evaluating End-of-Life Cost Alternatives of Solar PV Panels: The case of Burnoye-1, Kazakhstan, article, 2022
- [141] P.S.S. Camargo, Andrey da Silva Domingues, João Guê Palomero, photovoltaic module recycling: thermal treatment to degrade polymers and concentrate valuable metals, article, 2021
- [142] M.S.W. Lim, Dong He, Jasmine Sie Ming Tiong, Experimental, economic and life cycle assessments of recycling end-of-life monocrystalline silicon photovoltaic modules, article, 2022
- [143] Manisha Sheoran, Pancham Kumar, Susheela Sharma, Photovoltaic waste assessment in india and its environmental impact, article, 2021
- [144] Ilke Celik, Marina Lunardi, Austen Frederickson, Sustainable End of Life Management of Crystalline Silicon and Thin Film Solar Photovoltaic Waste: The Impact of Transportation, article, 2020
- [145] Aleksandra Ziemińska-Stolarska, Monika Pietrzak, Ireneusz Zbiciński, Application of LCA to Determine Environmental Impact of Concentrated Photovoltaic Solar Panels—State-of-the-Art, article, 2021
- [146] Sina Herceg, Sebastián Pinto Bautista, Karl-Anders Weiß, Influence of Waste Management on the Environmental Footprint of Electricity Produced by Photovoltaic Systems, article, 2021
- [147] Bajagain, R., Panthi, G., An, Y. J., & Jeong, S. W, Current Practices on Solar Photovoltaic Waste Management: An Overview of the Potential Risk and Regulatory Approaches of the Photovoltaic Waste, article, 2020
- [148] Daljit Singh, J. K., Molinari, G., Bui, J., Soltani, B., Rajarathnam, G. P., & Abbas, A, Life Cycle Assessment of Disposed and Recycled End-of-Life Photovoltaic Panels in Australia, article, 2021
- [149] F. Ardente et al. Resource efficient recovery of critical and precious metals from waste Silicon PV panel recycling, article, 2019
- [150] Anctil, A., & Fthenakis, V, Critical metals in strategic photovoltaic technologies: abundance versus recyclability, 2012
- [151] Dominiguez et Geyer, Photovoltaic waste assessment in Mexico, 2017
- [152] Vasilis Fthenakis et Hyung Chul Kim, Land use and electricity generation: A life-cycle analysis, 2008
- [153] Giacchetta, G., Leporini, M., & Marchetti, B, Evaluation of the environmental benefits of new high value process for the management of the end of life of thin film photovoltaic modules, 2013
- [154] Goe et Gaustad, Estimating direct climate impacts of end-of-life solar photovoltaic recovery, 2016
- [155] Choi et Fthenakis, Economic Feasibility of Recycling Photovoltaic Modules, 2010
- [156] Corcelli, F., Ripa, M., & Ulgiati, S, End-of-life treatment of crystalline silicon photovoltaic panels. An emergy-based case study, 2017
- [157] Cucchiella, F., & Rosa, P, End-of-Life of used photovoltaic modules: A financial analysis, 2015

- [158] Larsen.K, End-of-life PV: then what? 2009
- [159] McDonald et Pearce, Producer responsibility and recycling solar photovoltaic modules, 2010
- [160] Xu, Y., Li, J., Tan, Q., Peters, A. L., & Yang, C, Global status of recycling waste solar panels: A review, 2018
- [161] Alonso, E., Gallo, A., & Galleguillos, H, Solar thermal energy use in lead acid batteries recycling industry: A preliminary assessment of the potential in Spain and Chile, 2017
- [162] Paiano, Photovoltaic waste assessment in Italy, 2015
- [163] Arranz, P., Anzizu, M., Pineau, A., Marwede, The development of a resource-efficient photovoltaic system, 2014
- [164] Duan, H., Wang, J., Liu, L., Rethinking China's strategic mineral policy on indium: implication for the flat screens and photovoltaic industries, 2016
- [165] Jung, B., Park, J., Seo, D., & Park, N. Sustainable System for Raw-Metal Recovery from Crystalline Silicon Solar Panels: From Noble-Metal Extraction to Lead Removal, 2016
- [166] Besiou et Van Wassenhove; Closed-loop supply chains for photovoltaic panels: a case-based approach, 2016
- [167] Besiou, M., Van Wassenhove, L. N., Williams, Enablers and barriers for producer responsibility in the electrical and electronic equipment sector, 2012
- [168] Marwede, M., Berger, W., Schlummer, M., Mäurer, A., & Reller, A, recycling paths for thin-film chalcogenide photovoltaic waste – Current feasible processes, 2013
- [169] Strachala, D., Hylský, J., Vaněk, J., Fafílek, G., & Jandová, K, Methods for recycling photovoltaic modules and their impact on environment and raw material extraction, 2017
- [170] Marwede et Reller; Future recycling flows of tellurium from cadmium telluride photovoltaic waste, 2012
- [171] Bogacka, M., Pikoń, K., & Landrat, M., Environmental impact of PV cell waste scenario, 2017
- [172] Brenner et Adamovic, A circular economy for Photovoltaic waste - the vision of the European project CABRISS, 2017
- [173] Choi et Fthenakis, Crystalline silicon photovoltaic recycling planning: macro and micro perspectives, 2014
- [174]: Goe et Gaustad, Estimating Direct Climate Impacts of End-of-Life Solar Photovoltaic Recovery, 2016
- [175]: Collins et Anctil, Implications for current regulatory waste toxicity characterization methods from analysing metal and metalloid leaching from photovoltaic modules, 2017
- [176] Jia et Fang, Review of solar photovoltaic system recycling technologies and regulations in China, 2016
- [177] Espinosa, N., Laurent, A., & Krebs, F. C., Eco-design of organic photovoltaic modules from Danish and Chinese perspectives, 2015
- [178] Hsueh et Lin, Constructing a network model to rank the optimal strategy for implementing the sorting process in reverse logistics: case study of photovoltaic industry, 2015
- [179] Sica, D., Malandrino, O., Supino, S., Testa, M., & Lucchetti, M. C., Management of end-of-life photovoltaic panels as a step towards a circular economy, 2018
- [180] WATTS, John F. et WOLSTENHOLME, John (2019) An introduction to surface analysis by XPS and AES. John Wiley & Sons, 2019.
- [181] Isaacs, M. A., Davies-Jones, J., Davies, P. R., Guan, S., Lee, R., Morgan, D. J., & Palgrave, R. (2021). Advanced XPS characterization: XPS-based multi-technique analyses for comprehensive understanding of functional materials. *Materials Chemistry Frontiers*, 5(22), 7931-7963.
- [182] Mazzotta, E., Rella, S., Turco, A., & Malitesta, C. (2015). XPS in development of chemical sensors. *RSC advances*, 5(101), 83164-83186.
- [183] Madyan Amer. Carbure de silicium 4H et 3C : microstructures de déformation dans le domaine fragile [En ligne]. Thèse Milieux denses, matériaux et composants. Poitiers : Université de Poitiers, 2012. Disponible sur Internet <http://theses.univ-poitiers.fr>

- [184] Dris Ihiawakrim. Etude par les techniques avancées de microscopie électronique en transmission de matériaux fragiles. Matière Condensée [cond-mat]. Université de Strasbourg, 2019. Français. ffNNT : 2019STRAE005ff. fftel-02464449
- [185] Selsabil Sejlil. Optimisation de l'épitaxie VLS du semiconducteur 4H-SiC : Réalisation de dopages localisés dans 4H-SiC par épitaxie VLS et application aux composants de puissance SiC. Matériaux. Université de Lyon, 2017. Français. ffNNT : 2017LYSE1170ff. fftel-01838259f
- [186] Sabiha Anas Boussaa ,Abdelhak Benkrid , Naima Zaourar Boutarek , Messaouda Ayachi . End of life silicon based photovoltaic panels: A review,2020

Références webographique

- [23] www.energy.gov.dz
- [82] <https://www.aurubis.com>
- [83] <http://bjchaoqiang.qiyanan.biz/>
- [84] <https://thinkdynamic.com/>
- [85] <https://www.ecsrefining.com>
- [86] <https://www.eikishoji.co.jp/>
- [87] <http://www.jinchensolar.com/en/>
- [88] <http://www.envaris.de/fr/>
- [89] <https://euresi.com/>
- [90] <https://exotech.com/>
- [91] <https://www.experia.solar/>
- [92] <http://www.firstsolar.com/>
- [93] <https://www.fresitec.de/>
- [94] <http://www.glrnow.com/>
- [95] <http://www.glasverbund.ch/index.html>
- [96] <http://www.ibaimpex.com/>
- [97] <http://www.immark.ch/>
- [98] <https://ecoactiv.com.au/>
- [99] <http://www.intercotradingco.com/>
- [100] <http://yangzhou090011.11467.com/>
- [101] <http://www.aositekj.com/>
- [102] <http://www.soguijian.cn/>
- [103] <http://www.kwbplanreal.ch/>
- [104] <http://www.lamiaenergia.eu/>
- [105] <https://www.metalandcatalyst.com/>
- [106] <http://www.morgenindustries.com/>
- [107] <http://panoramicresourcespartners.com/>
- [108] <https://pvtechno.info/>
- [109] <https://www.r3-tech.biz/>
- [110] <http://reclaimpv.com/>
- [111] <https://recycleit.ie/>
- [112] <https://recyclesolar.co.uk/>
- [113] <http://recyklaciapanelov.sk/>
- [114] <https://www.reiling.de/>
- [115] <https://www.rema.cloud/>
- [116] <http://www.rinovasol.com/>
- [117] <https://www.rosi-solar.com/>
- [118] <https://www.erecycling.ch/>
- [119] <https://www.sic-processing-bautzen.de/>

- [120] www.silcontel-ltd.com
- [121] <https://silrec.com/>
- [122] <http://www.solar2recycle.com/>
- [123] <http://solucciona.com/>
- [124] <http://www.solarsilicon.com/>
- [125] <http://www.hedeying.com/>
- [126] <http://www.xumin188.com/>
- [127] <http://szdcphs.com/>
- [128] <http://www.szshxny.com/>
- [129] <http://www.tekoverly.com/>
- [130] <https://werecycleit.ie/>
- [131] <https://www.therecyclingvillage.ie/>
- [132] <https://www.trinity-jck.com/>
- [133] <http://yezon-pv.com/>
- [134] <https://de.ensolar.com/directory/service/58330/yuepeng-new-energy>