Mediachimie
Donner matière à l'avenir

MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE
Liberté
Égalité
Fraternité

LE RECYCLAGE DES ÉOLIENNES ET DES PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES

Sophie Le Roy

Partie des programmes de physique-chimie associées

- Programme de physique-chimie de seconde générale et technologique – Constitution de la matière de l'échelle macroscopique à l'échelle microscopique, A) Description et caractérisation de la matière à l'échelle macroscopique
- Programme de sciences physiques et chimiques en laboratoire de première STL – Chimie et développement durable, Sécurité et environnement
- Programme de physique-chimie et mathématiques de première STI2D – Matière et matériaux, Propriétés des matériaux et organisation de la matière
- Programme d'innovation technologique et d'ingénierie et développement durable de première et d'ingénierie, innovation et développement durable de terminale STI2D – 1. Principes de conception des produits et développement durable, 1.5. Approche environnementale
- Programme d'enseignement scientifique de terminale générale – Thème 2 : Le futur des énergies

Mots-clés : éolien, photovoltaïque, recyclage, polymère, composite

INTRODUCTION

L'éolien et le solaire photovoltaïque sont des technologies clés de la transition énergétique. Ils permettent de produire de l'électricité sans émission directe de gaz à effet de serre. Cependant, leur développement rapide pose une question cruciale : que faire des installations en fin de vie ?

Les éoliennes et panneaux photovoltaïques sont composés de matériaux complexes, souvent coûteux à produire, et parfois difficilement recyclables. Pour garantir leur durabilité, le défi est d'intégrer une logique d'économie circulaire à chaque étape de leur cycle de vie : réduction des pertes, allongement de la durée de vie, réemploi, recyclage.

Nous explorerons ici les cas des pales d'éoliennes et des cellules photovoltaïques en mettant en avant des situations technologiques concrètes et innovantes cherchant à répondre au défi de la circularité.

LES DÉFIS DU RECYCLAGE DES PALES D'ÉOLIENNES

La face cachée de l'éolien

Une éolienne terrestre est principalement constituée d'une tour en acier, d'une nacelle contenant un alternateur et de trois pales géantes. Celles-ci sont fabriquées en matériaux composés de fibre de verre ou de carbone et résine[1] thermodurcissable[2], ce qui leur permet de résister aux contraintes mécaniques en restant « légères ».

1. Une résine est un mélange liquide d'additifs et de monomère(s) réactifs qui y sont dilués.

2. Une résine thermodurcissable est composée d'un polymère de structure tridimensionnelle qui reste à l'état solide après avoir durci, sa forme ne pouvant plus évoluer. Elle ne peut pas retrouver son état initial même après chauffage.

© Fondation de la Maison de la chimie, 2025

Une pale, de durée de vie moyenne de 20 ans, peut mesurer plus de 100 m de long et peser plusieurs dizaines de tonnes. Sa fabrication nécessite ainsi des quantités de matériaux considérables, ce qui génère, en fin de vie, une quantité non moins élevée de déchets. Les projections indiquent qu'à partir de 2030-2035, plus d'un million de tonnes de déchets de pales seront produits chaque année (figure 1). S'ajoutent à ces déchets ceux liés à la production et la maintenance du produit manufacturé durant son cycle de vie.

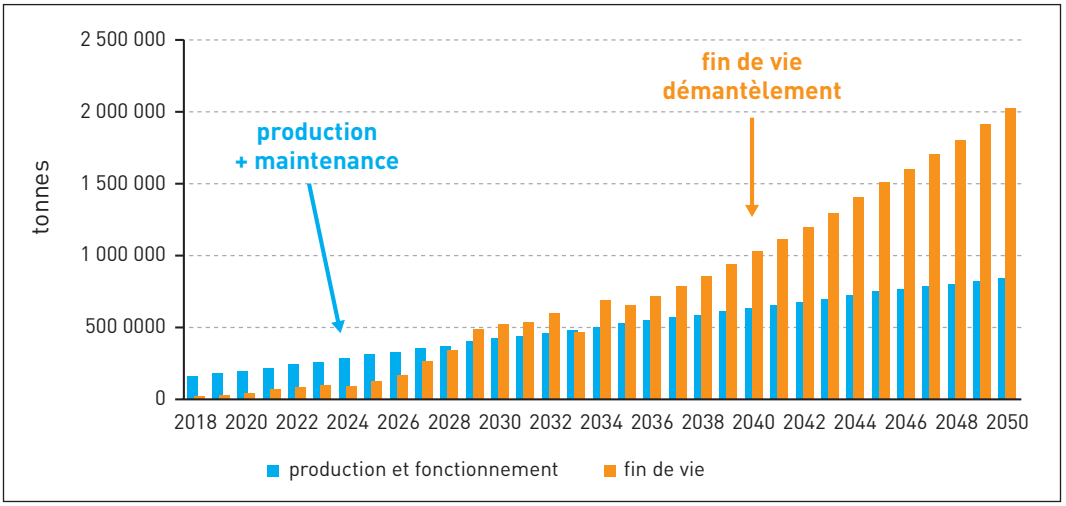


Figure 1. Prévisions d'évolution des masses de déchets générés lors de la production et utilisation des éoliennes (en bleu) et les déchets générés lors de la fin de vie des éoliennes (en orange). Source : Armand Adjari.

Actuellement, après avoir été déposées et tronçonnées, les pales sont simplement enfouies sous terre, sans aucun recyclage (figure 2).

Figure 2 : Photographie d'un site d'enfouissement de pales d'éoliennes. Casper Regional Landfill, Wyoming, États-Unis. Source : Armand Adjari.

Des essais afin d'éviter l'enfouissement des pales en fin de vie sont par exemple menés par Veolia. Un démantèlement suivi d'un broyage permet d'aboutir à une sorte de poudre, mélange de fibres et de résine. L'objectif pour l'entreprise est maintenant de trouver des solutions pour valoriser ce mélange. Une piste consiste à chauffer ce broyat pour l'utiliser en remplacement du charbon, de sable et d'argile pour la fabrication de ciment[1].

De nouveaux matériaux pour un modèle durable ?

Le principal obstacle au recyclage est la nature de la résine thermodurcissable utilisée dans la fabrication des pales qui ne peut pas être refondue. Ces résines, époxy[2] ou polyesters[3], sont réticulées, avec un

1. Voir : https://www.veolia.com/fr/actualites/etats-unis-veolia-redonne-seconde-vie-aux-pales-eoliennes-ge-renewable-energy-fabriquer

2. Résine époxy : polymère composé d'un monomère contenant un groupe époxyde (atome d'oxygène créant un « pont » entre 2 atomes de carbone).

3. Résine polyester : polymère dont les motifs de répétition de la chaîne principale contiennent la fonction ester.

© Fondation de la Maison de la chimie, 2025

réseau complexe de liaisons chimiques, ce qui crée un objet figé avec des fibres emprisonnées, sans retour en arrière possible (comme un blanc d'œuf qui ne peut pas retrouver sa forme originelle après cuisson).

Pour pallier ces difficultés, plusieurs solutions sont possibles :

- remplacer les résines thermodurcissables par des résines thermoplastiques[1] (chaînes longues comme des spaghettis qui s'entrelacent et se dénouent par chauffage). Mais pour les grands objets, des problèmes de fabrication existent : les liquides injectés, de grande viscosité, ne pénètrent pas entre les fibres, conduisant à des matériaux composites de mauvaise qualité ;
- allonger la durée de vie des éoliennes en optimisant leur utilisation et en surveillant leur état d'usure ;
- augmenter la taille des éoliennes pour une meilleure rentabilité et une consommation de matière moindre.

C'est cette dernière solution qui semble être la direction choisie depuis les 10-15 dernières années, et pour les suivantes. Mais cela ne résout pas le problème du recyclage.

Pour contourner ce blocage et faciliter la recyclabilité des pales d'éoliennes, le groupe Arkema a mis au point une résine acrylique thermoplastique innovante : « Elium ». Elle permet de valoriser les pales en fin de vie, selon deux voies de recyclage (figure 3) :

- **recyclage mécanique :** les pales sont broyées, puis les fragments de résine et fibres sont revalorisés dans la fabrication de nouveaux composites ;
- **recyclage chimique :** on récupère séparément les fibres de verre ou de carbone et la résine qui peut être décomposée en ses constituants originels (monomères). Ces derniers peuvent à leur tour être réutilisés pour régénérer la résine, réutilisable.

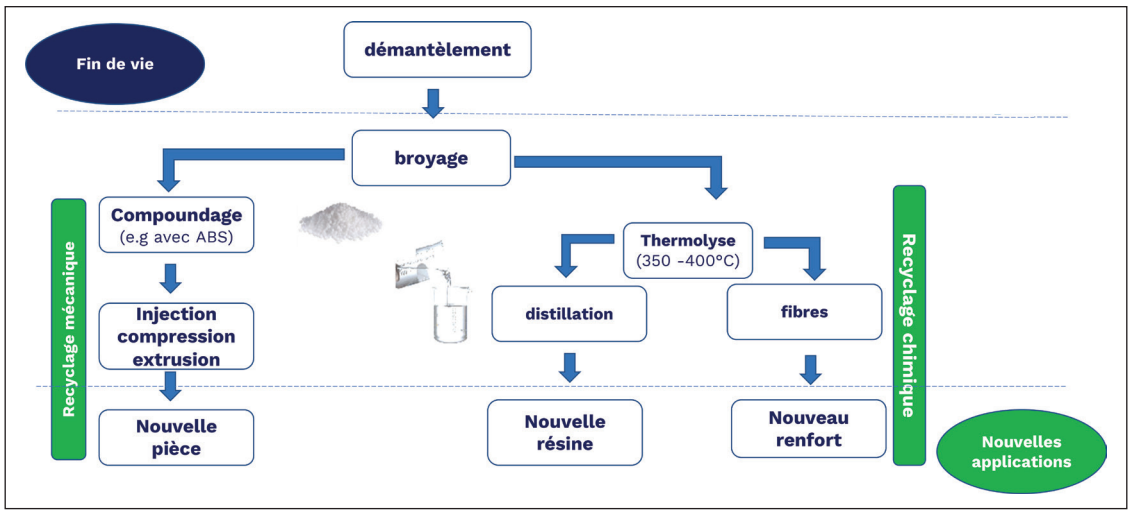


Figure 3. Les voies de recyclage possibles pour la résine Elium. Source : Armand Adjari.

La résine Elium, récompensée par le prix Potier[2] en 2020, a déjà été utilisée pour fabriquer des prototypes de pales ainsi que dans des bateaux à voile ou des réservoirs à hydrogène (figure 4).

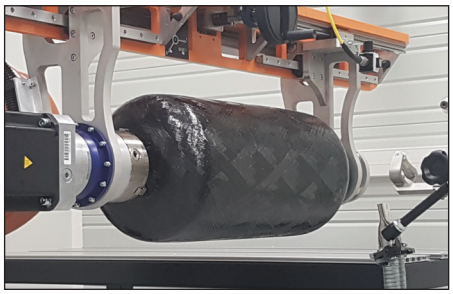


Figure 4. Des applications de la résine Elium. Source : Armand Adjari.

1. Un polymère thermoplastique est rigide à l'état solide, mais peut être ramolli par chauffage et durcir à nouveau.

2. Le prix Pierre Potier met en lumière et récompense chaque année les initiatives de la Chimie en faveur du développement durable et du développement de démarches écoresponsables dans la filière.

© Fondation de la Maison de la chimie, 2025

La mise en place de cette technologie à grande échelle, tout en ouvrant la voie à une véritable économie circulaire de l'éolien, se heurte à des obstacles économiques : coûts de production, absence de filière de recyclage en place, manque de réglementation incitative. Un changement durable nécessitera des politiques publiques ambitieuses et une coopération entre industriels, recherche académique et start-ups.

Focus sur les composites

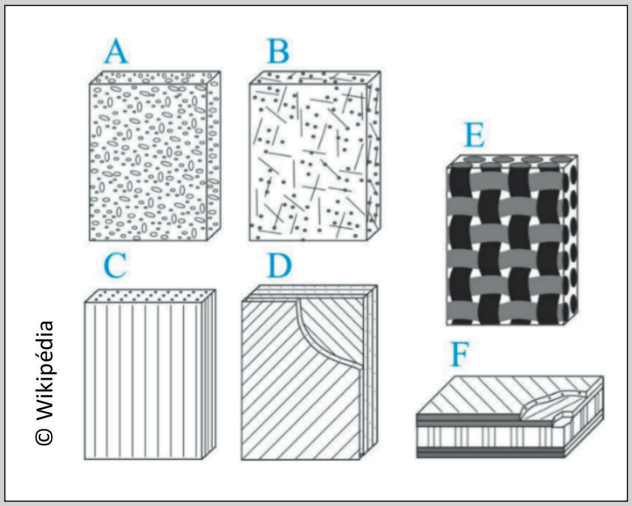
Une grande variété de matériaux composites est apparue dans les années 1950, et est aujourd'hui utilisée dans les domaines où une excellente tenue mécanique du matériel est nécessaire.

Les composites sont très utilisés dans des secteurs exigeants comme l'aéronautique (structures d'avions, pales d'hélicoptères), l'automobile (pièces de carrosserie, châssis allégés), le sport de haut niveau (cadres de vélo, raquettes, skis) ou encore dans le secteur médical (prothèses, implants).

Les matériaux composites sont des matériaux constitués de l'association de deux ou plusieurs composants aux propriétés différentes, qui, une fois combinés, donnent un matériau aux performances supérieures. Ils sont essentiellement constitués d'une **matrice** dans laquelle se trouve un **renfort**. Un exemple bien connu dans le domaine du bâtiment est le béton armé, constitué d'une matrice de ciment renforcée par des barres d'acier ou par des pierres dures.

La matrice, souvent en plastique, métal ou céramique, lie et protège un renfort comme des fibres de verre, de carbone ou de kevlar qui apporte la résistance mécanique et la rigidité du matériau. La matrice permet de maintenir le renfort, de répartir les contraintes mécaniques au sein du matériau, d'assurer la tenue chimique du matériau et de conférer sa forme au produit fini. Cette structure permet d'obtenir des matériaux à la fois légers, solides et résistants à la corrosion, à l'humidité et/ou aux chocs.

La disposition des fibres (unidirectionnelle, tissée, en nappes) influence fortement les propriétés finales du composite.



© Wikipédia

A. Composites renforcés par particules : la matrice contient des particules dispersées (souvent sphériques ou irrégulières) qui améliorent certaines propriétés comme la dureté ou la résistance à l'usure.

B. Composites renforcés par fibres courtes : des fibres courtes sont mélangées à la matrice, ce qui améliore la résistance mécanique de manière isotrope (dans toutes les directions).

C. Composites unidirectionnels : les fibres sont toutes orientées dans la même direction, ce qui donne une très grande résistance dans ce sens précis.

D. Stratifiés : plusieurs couches de composites sont empilées avec des orientations de fibres différentes, ce qui permet d'optimiser les propriétés mécaniques dans plusieurs directions.

E. Plastiques à renforts tissés : les fibres constituant le renfort sont tissées, ce qui combine résistance et flexibilité.

F. Structure alvéolaire : une âme forme de nid d'abeilles est prise en sandwich entre deux peaux rigides, conférant rigidité et légèreté au matériau.

© Fondation de la Maison de la chimie, 2025

LES PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES : DES MINES URBAINES DE HAUT POTENTIEL

Le silicium au cœur de la transition

Les panneaux photovoltaïques sont composés de verre (85 % en masse), de métaux (aluminium, cuivre, argent), de polymères, et surtout de silicium de très grande pureté (8N à 11N)[1] : voir figure 5.

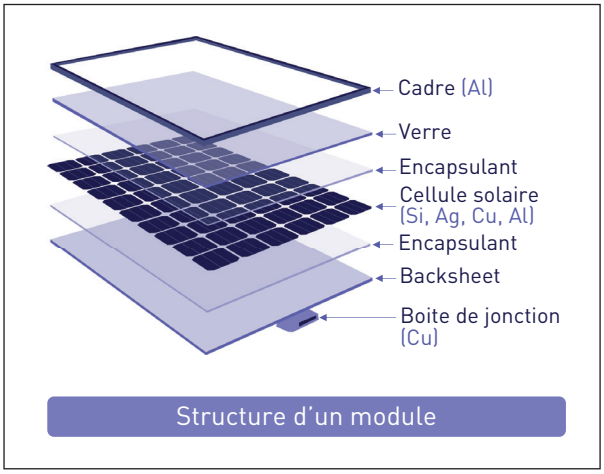


Figure 5. Structure d'un panneau photovoltaïque. Source : Yohan Parsa

Différentes étapes mettant en jeu des quantités très importantes de ressources naturelles, d'énergie et émettant beaucoup de CO_2, sont nécessaires pour produire des modules photovoltaïques.

Le silicium issu de ressources naturelles (quartz, bois, charbon) est purifié puis refondu sous forme de lingots. Lors de la découpe des lingots de silicium en tranches (*wafers*), 40 % du matériau est perdu sous forme de sciure contaminée, appelée *kerf* (figure 6). Ce déchet riche en silicium très pur n'est aujourd'hui que très peu valorisé.

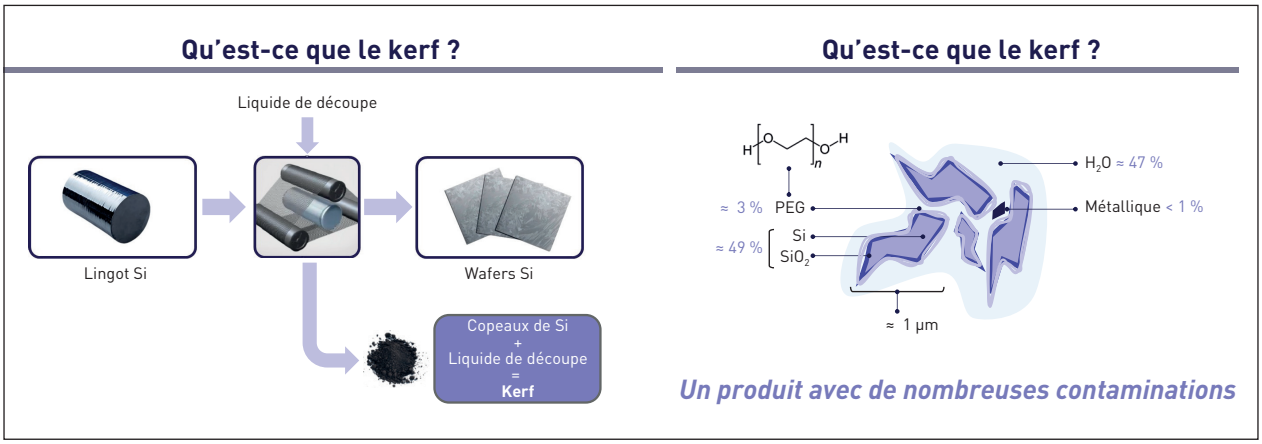


Figure 6. Le kerf : poussières de silicium contaminées issues de la découpe des lingots. Source : Yohan Parsa.

S'inscrivant dans une démarche de revalorisation et de recyclage de ce type de déchets, la start-up Rosi Solar a mis au point un procédé innovant pour purifier ce *kerf* et récupérer un silicium pur à 4N ou 5N. Cela permet de réinjecter ce silicium dans l'industrie photovoltaïque ou chimique, par exemple dans celle des silicones.

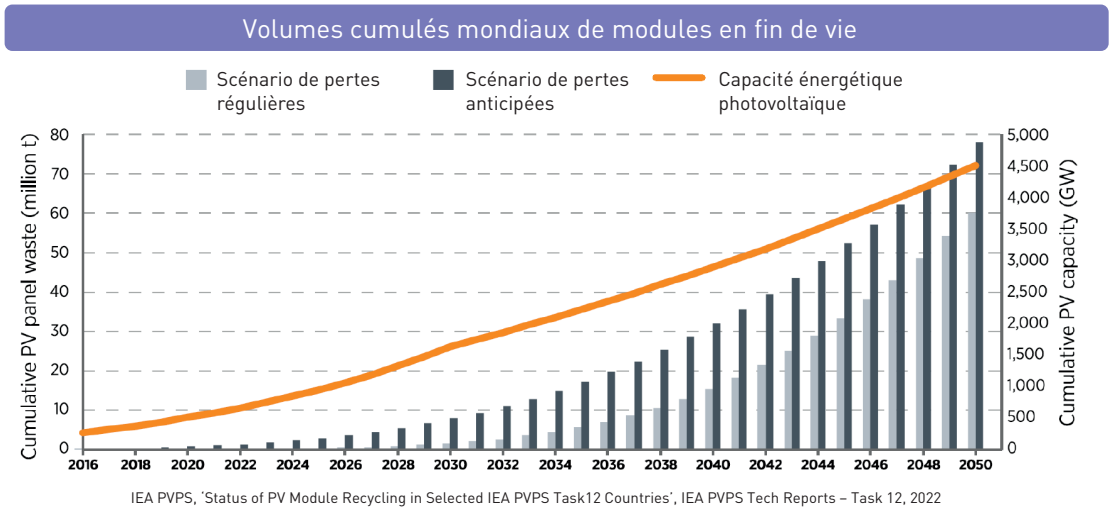
Gestion des panneaux en fin de vie

Un panneau a une durée de vie aux alentours de 20 ans. D'ici 2050, les volumes de modules à recycler auront été multipliés par 500 (figure 7). Pourtant, les procédés actuels se contentent souvent de broyer les panneaux, mille-feuilles de matériaux, pour en extraire le verre et l'aluminium, laissant de côté silicium et argent.

1. Unité donnant le nombre de « 9 » présents dans la pureté d'un métal. Par exemple, 2N désigne une pureté de 99 %, et 5N à 99,999 %.

© Fondation de la Maison de la chimie, 2025

Modules en fin de vie, des volumes en explosion



IEA PVPS, 'Status of PV Module Recycling in Selected IEA PVPS Task12 Countries', IEA PVPS Tech Reports – Task 12, 2022

Volume cumulé ×500 de 2020 à 2050 !

Figure 7. Volumes mondiaux de modules en fin de vie cumulés, en fonction du temps (données et projections). Source : Yohan Parsa.

Or, même si l'argent ne représente que 1 % de la masse du panneau, il constitue 50 % de sa valeur économique. Le silicium, très pur, mérite également d'être récupéré plutôt que non utilisé (figure 8).

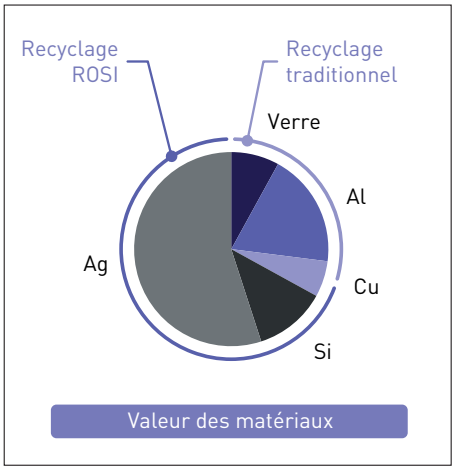


Figure 8. Valeur relative des matériaux composant un panneau photovoltaïque. Source : Yohan Parsa.

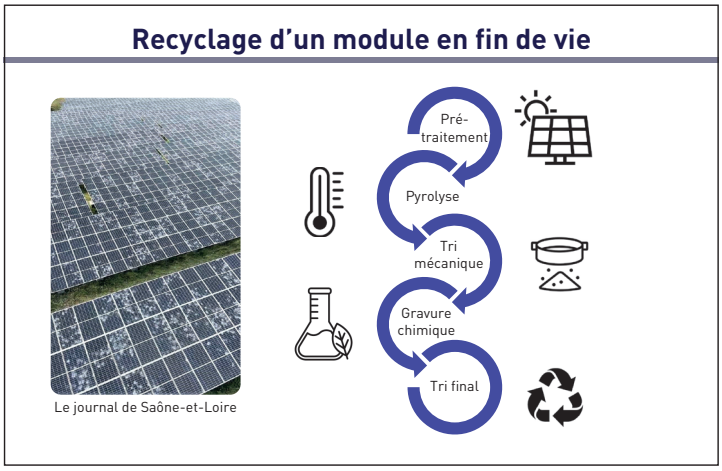


Figure 9. Schéma de principe du recyclage d'un panneau en fin de vie par Rosi Solar. Source : Yohan Parsa.

La société Rosi Solar a développé une solution allant dans ce sens. Elle repose sur plusieurs étapes (figure 9) :

1. prétraitement et pyrolyse : les panneaux sont chauffés pour brûler les polymères qui permettent l'adhésion entre les différentes couches. Les autres composants peuvent alors être récupérés ;
2. tri mécanique : cuivre, verre et restes des cellules photovoltaïques sont séparés les uns des autres. Le verre et le cuivre peuvent ainsi être revalorisés ;
3. traitement par chimie douce : les fils d'argent sont détachés des cellules ;
4. tri fin final : le silicium et l'argent sont séparés.

Ces techniques permettent de revaloriser tous les métaux critiques comme le cuivre et l'argent (figure 10), et ainsi d'alléger la pression sur les ressources.

© Fondation de la Maison de la chimie, 2025

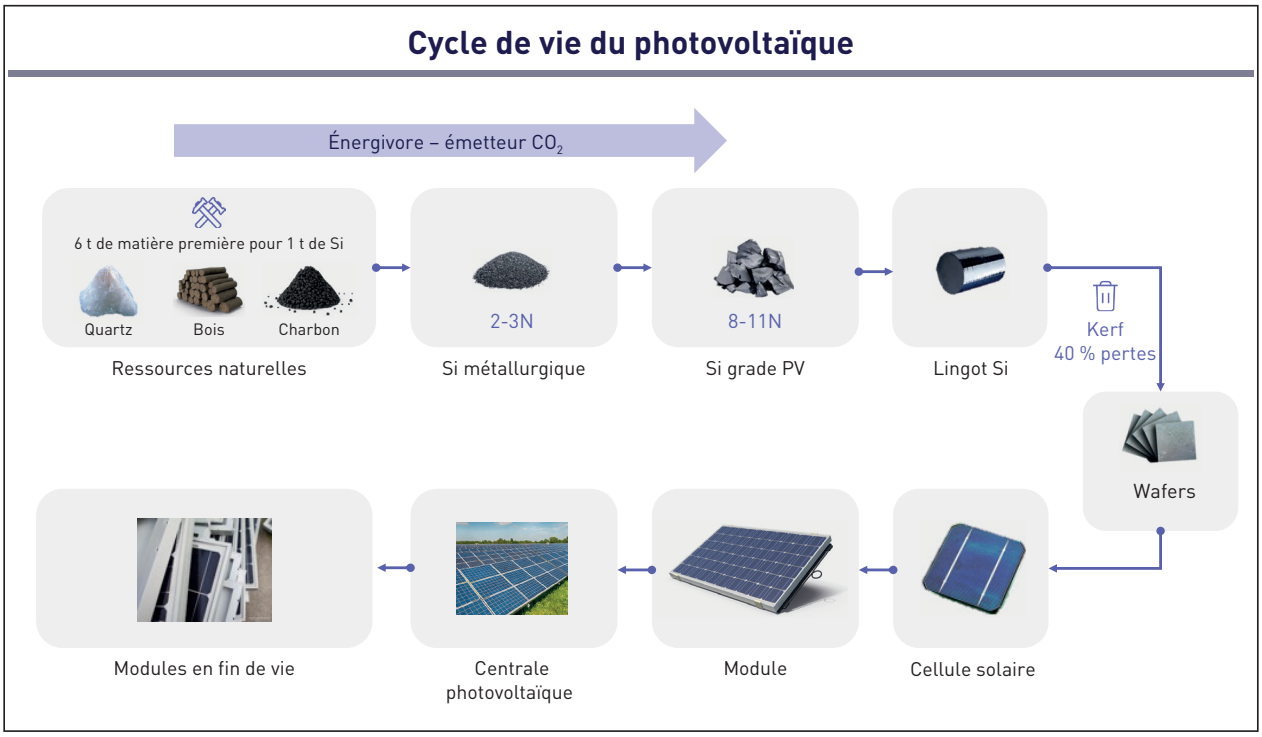


Figure 10. Un processus de recyclage à 100 % des panneaux photovoltaïques en fin de vie. Source : Yohan Parsa.

CONCLUSION

Le recyclage des matériaux utilisés dans les systèmes de production d'énergie renouvelable comme l'éolien et le photovoltaïque est un enjeu à la fois technologique, environnemental et économique. Il ne suffit pas qu'un matériau soit recyclable : l'existence d'une chaîne et la rentabilité du process sont indispensables. Cela demande de l'innovation, de la coopération et une vision à long terme. Comme les exemples d'Arkema et de Rosi Solar le montrent, des solutions techniques existent pour valoriser les déchets liés à la fabrication et améliorer le recyclage en fin de cycle de vie. Il reste maintenant les soutenir et les intégrer dans nos politiques industrielles.

SOURCES PRINCIPALES

« Matériaux de spécialité pour une économie circulaire : illustration sur le recyclage des pales d'éoliennes » par Armand Adjari

https://www.mediachimie.org/sites/default/files/9782759836246_CREC_Ch04.pdf

« Industrie photovoltaïque : les enjeux de la circularité » par Yohan Parsa

https://www.mediachimie.org/sites/default/files/9782759836246_CREC_Ch08.pdf

Sophie Le Roy est professeure certifiée de physique-chimie

Comité éditorial : Danièle Olivier, Jean-Claude Bernier, Grégory Syoen

© Fondation de la Maison de la chimie, 2025