



Sommaire :

- 1) Le bilan carbone des panneaux photovoltaïques
- 2) Zoom sur le recyclage des panneaux

## 1) Le bilan carbone des panneaux photovoltaïques

Le bilan carbone d'un panneau solaire renvoie à la quantité de gaz à effet de serre générés lors de sa fabrication (sachant que pendant son activité il ne produit pas de gaz à effet de serre). Les principaux critères influençant ce bilan carbone sont les composantes des panneaux et le lieu de fabrication.

### A) le critère des catégories de panneaux

Pour estimer ce bilan carbone, il convient cependant de distinguer selon la catégorie de panneaux photovoltaïques.

Le marché du solaire photovoltaïque se partage en deux grandes catégories : **les technologies à base de silicium cristallin** (silicium monocristallin, polycristallin ou amorphe), qui sont de loin les plus utilisées aujourd'hui (plus de 95 % en 2017), et les **technologies dites « couches minces »**, utilisant des complexes de matériaux en fines couches. Fortement médiatisées il y a quelques années, ces dernières restent cependant très minoritaires.

La production d'un panneau photovoltaïque cristallin implique les étapes suivantes. Il faut d'abord prélever du **sable**, ce qui implique une faible quantité d'énergie puisque c'est une matière assez facilement accessible. Si l'impact environnemental de l'extraction sablière est de plus en plus dénoncé, la part actuelle et même future (si la demande explose) du photovoltaïque cristallin dans les volumes de sable est négligeable (à vérifier).

Une fois la silice extraite, il faut la « casser » en l'élevant à très haute température (de 1100 à 1700°C, selon l'étape de raffinage concernée ; pour d'autres sources la transformation en silicium implique 2000°C) afin d'en retirer le **silicium** recherché, c'est-à-dire de qualité solaire (raffiné plusieurs fois). C'est cette étape qui consomme le plus d'énergie. Les techniques de purification du silicium méritent donc encore un perfectionnement et l'Europe réfléchit à une éco-conception du photovoltaïque, autour des techniques d'extraction et de raffinage du silicium.

Géologiquement, le silicium n'est pas un métal rare, il est largement présent dans la couche terrestre. Les industriels et fabricants n'ont pas d'angoisse particulière sur cette ressource, car des réseaux de production existent partout dans le monde, et les capacités sont suffisantes pour faire face à la demande croissante. La production et la découpe des lingots de silicium se fait majoritairement en Asie, mais d'autres acteurs sont implantés en Europe. Les panneaux sont généralement assemblés en Chine. L'enjeu serait de relocaliser en Europe, afin de limiter également les impacts du transport, qui pèse logiquement sur le bilan carbone mondial.

En revanche, il est vrai que **les panneaux photovoltaïques de 2ème et 3ème génération** (qui constituent moins de 10% du marché mondial à l'heure actuelle) nécessitent du gallium, de l'indium, du sélénium, du cadmium, du tellure, etc. Ce sont des métaux rares [*le bore et le phosphore des panneaux cristallins ne sont nécessaires qu'en très faibles quantités*] dont la Chine maîtrise une



immense majorité de la production mondiale, et qu'elle exploite selon des modalités confidentielles dans des régions reculées telles que le Baotou.

Cela signifie d'une part des destructions écologiques locales énormes : la purification de ces métaux non-ferreux requiert des quantités d'eau énormes (au moins 200 m<sup>3</sup>/tonne de terres rares) qui se chargent de métaux lourds et d'acides, parfois radioactifs (avant la purification, les métaux rares sont séparés du reste de la roche cassée extraite grâce à des produits chimiques à haute nocivité). Opérant sans le moindre contrôle sanitaire, ces compagnies minières relâchent les eaux telles quelles dans l'environnement, menant à des sols stériles et des contaminations mortelles pour les habitants des régions environnantes via la pénétration de ces eaux toxiques dans les nappes phréatiques. Et pour le niveau global, le bilan carbone de l'extraction et du raffinage de ces métaux est bien plus élevé que celui du silicium, tant de par la difficulté d'accès à ces minerais que par les comportements industriels peu regardants des exploitants du Baotou.

## B) Le critère de la localisation de la fabrication

La localisation de la production a une influence importante sur les émissions de gaz à effet de serre liées à la phase de production des panneaux photovoltaïques. En effet, ces émissions peuvent varier d'un facteur 10 d'un pays à l'autre (cf. la Chine principal producteur de panneaux mais dont le mix énergétique est composé à 78% de charbon). Ainsi, un changement du lieu de production peut réduire les émissions de 15 à 75%. Selon l'institut de recherche allemand Fraunhofer ISE, les panneaux fabriqués en Europe ont une empreinte inférieure de 40% à ceux fabriqués en Chine. Le transport maritime ne contribue que pour 3% des émissions totales. L'essentiel de la différence tient à l'énergie nécessaire à la fabrication des panneaux qui représentent 53% à 60% des émissions totales.

Comme tout produit industriel, une cellule photovoltaïque est constituée de divers matériaux dont l'extraction n'est pas neutre du point de vue environnemental et social. En Chine, en plus des bas salaires et des conditions de travail extrêmes, des scandales de rejets massifs dans l'atmosphère de poudre de silicium (matière première de la cellule photovoltaïque), et de pollution causée par les opérations de raffinage du silicium ont été dénoncés au cours des dix dernières années.

Ainsi, l'entreprise Voltec Solar dont les panneaux solaires produits en Alsace présentent un taux de recyclabilité proche des 100 % (à vérifier) – une solution pour limiter les besoins de matières premières.

## C) La compensation liée à la quantité d'énergie produite par les panneaux

La quantité d'électricité produite par un panneau solaire au bout de 2 ou 4 ans, selon les sources et l'ensoleillement, permet de compenser la quantité de gaz carbonique rejetée dans l'atmosphère au cours de sa fabrication. La durée de vie d'un panneau solaire est d'au moins 30 ans. Son activité au cours de son cycle de vie permettra de « récupérer » jusqu'à 6 fois le gaz carbonique rejeté dans l'atmosphère lors de sa fabrication.

Grâce à sa composition, le panneau solaire peut être recyclé à plus de 80 %. Le panneau solaire photovoltaïque est composé en partie de silicium, qui peut être utilisé à nouveau dans la fabrication de nouvelles cellules photovoltaïques. La partie en aluminium quant à elle peut être fondue et réutilisée à plusieurs fins (cf. pour plus de détails section suivante).

En France, PV Cycle, un éco-organisme à but non lucratif agréé par les pouvoirs publics, assure la collecte et le recyclage de tous types de panneaux solaires photovoltaïques. A noter que cette collecte s'applique à tous types de technologies, de marques, et quelque soit l'année de mise sur le marché. PV Cycle met à disposition de tous les acteurs des points de collecte gratuits afin de faciliter



le transport et la logistique des déchets vers des usines spécialisées, et il en existe plus de 200 ! A ce jour, l'association déclare recycler plus de 90% des panneaux.

Sources : (fiabilité faible/moyenne)

<https://www.jokosun.solutions/blog/bilan-carbone-panneau-photovoltaïque>

<https://www.actu-environnement.com/ae/news/acv-bilan-carbone-environnemental-photovoltaïque-17276.php4>

## 2) Les panneaux photovoltaïques sont ils recyclables ?

La très grande majorité des matériaux composant les panneaux photovoltaïques est recyclable. **Plus de 90 % de la masse des panneaux (verre, plastiques et aluminium) sont recyclés dans les filières industrielles existantes.** Les composants comme le silicium ou des métaux en bien plus faibles quantités (argent, cuivre, et autres complexes semi-conducteurs) sont, eux aussi, récupérables et recyclables. Certains pourront être réutilisés pour fabriquer de nouveaux panneaux photovoltaïques.

### A) Avant d'être recyclé, un panneau solaire peut être utilisé pendant au moins 30 ans

Au fur et à mesure qu'il vieillit, essentiellement par usure liée aux intempéries, un panneau solaire photovoltaïque perd progressivement une part de sa capacité à produire de l'électricité. Aujourd'hui, la plupart des fabricants garantissent que leurs panneaux perdront au plus 20 % d'efficacité après 25 ans d'utilisation<sup>2</sup>. En réalité, il apparaît que les panneaux photovoltaïques sont plus résistants que la garantie donnée par les fabricants. Une étude, réalisée sur les premiers panneaux installés en France en 1992, a montré qu'après 20 ans ils fournissaient encore plus de 91 % de leur puissance initiale.

Malgré le peu d'équipements aujourd'hui en fin de vie, le recyclage des panneaux solaires est déjà opérationnel : les constructeurs ont d'ailleurs l'obligation de récupérer les panneaux usagés et de mettre en place une filière de recyclage. Le développement et le renforcement de la filière de recyclage sont nécessaires afin d'être en capacité de traiter les volumes à venir. Deux grandes familles de modules photovoltaïques

### B) Récupération des matériaux composant les panneaux photovoltaïques

Que leur technologie repose sur du silicium cristallin ou sur des « couches minces », les panneaux sont majoritairement constitués de verre, une matière première pouvant être intégralement recyclée.

**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.



**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.

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 :

- soit 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). Des techniques de pyrolyse sont testées, par exemple au Japon, pour améliorer ces procédés thermiques ;
- soit 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.

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.

### C) Quelle valorisation pour les matières premières récupérées ?

Les filières de valorisation des matériaux extraits lors des opérations de recyclage sont de deux types : la production de modules photovoltaïques (recyclage dit « en boucle fermée ») et les filières traditionnelles des matières premières secondaires comme le verre et l'aluminium ainsi que le marché des métaux pour le cuivre, l'argent, le cadmium, le tellure, etc. (recyclage dit « en boucle ouverte »).

Même s'il contient une fraction de polymère, de silice ou de métaux, le verre récupéré, peut être mélangé avec d'autres verres recyclés (à hauteur de 15 à 20 %), notamment pour l'industrie de la fibre de verre.

Les polymères représentent 10 % de la composition des modules à base de silicium cristallin. Une fois séparés, ils sont transformés en combustible solide de récupération et peuvent ainsi être utilisés comme source d'énergie, notamment pour les fours de cimenterie notamment. Notons que d'une manière générale, si le recyclage des plastiques est préférable d'un point de vue environnemental, la valorisation énergétique s'applique a priori aux plastiques qui n'ont pas été triés, qui ont été contaminés par d'autres déchets ou qui sont composés d'un mélange de polymères rendant leur recyclage trop complexe. Bertrand Lempkowitz, chargé de communication de PV Cycle, indique que les polymères utilisés dans les panneaux photovoltaïques « pourraient être utilisés comme liant pour de la peinture, mais [que] cela nécessiterait de les nettoyer. Il est de fait plus écologique de [les] incinérer (en incinérateur filtré) que d'utiliser des tonnes d'eaux pour [les] nettoyer<sup>14</sup> ».

À titre de comparaison, le taux de valorisation (par recyclage ou valorisation énergétique) de



l'ensemble des déchets plastiques avoisine 62 % en France en 2019, mais leur taux de recyclage atteint seulement 22 %<sup>15</sup>.

L'aluminium et le cuivre des câbles peuvent également être intégrés dans les industries existantes du recyclage de ces métaux.

Quant aux plaquettes de silicium, elles peuvent être recyclées de deux façons :

- soit elles sont intégrées dans le process de fabrication de cellules et utilisées pour la fabrication de nouveaux modules, si elles ont été récupérées dans leur intégrité (par exemple, les rebuts de fabrication n'ayant pas quitté l'usine). Ce recyclage du silicium en boucle fermée<sup>16</sup> a été étudié dans les années 2000 dans une ligne pilote de l'entreprise allemande SolarWorld (un des plus grands fabricants de panneaux photovoltaïques) mais n'a jamais été déployé car le prix du silicium solaire a fortement chuté entre 2006 et 2010.
- soit elles sont fondues et intégrées dans le process de fabrication des lingots de silicium, utilisables dans les industries qui en ont besoin. Ainsi, le silicium récupéré dans les lignes de traitement repart dans les filières des alliages métalliques ou dans celle du verre plat.

Dans la composition d'un panneau photovoltaïque, si le cadre en aluminium et le verre sont majoritaires en poids (entre 83 % et 97 % du poids selon les technologies) ils sont minoritaires en valeur<sup>17</sup>. Le silicium, le cuivre et l'argent utilisés pour la fabrication des cellules solaires sont des matériaux de très haute valeur. Il y a donc un fort intérêt à développer des solutions technologiques permettant de les récupérer en recherchant la pureté la plus élevée possible. L'amélioration des procédés de recyclage et le développement des filières de valorisation font l'objet de projets de recherche. On citera par exemple le projet européen CABRISS<sup>18</sup>, mené entre 2015 et 2018, qui visait le développement d'une économie circulaire fondée sur le recyclage, la réutilisation et la récupération d'indium, de silicium et d'argent, principalement pour l'industrie photovoltaïque, mais aussi pour la production de verre et de composants électroniques.

Sources : (fiabilité forte)

<https://decrypterlenergie.org/les-panneaux-photovoltaïques-sont-ils-recyclables>