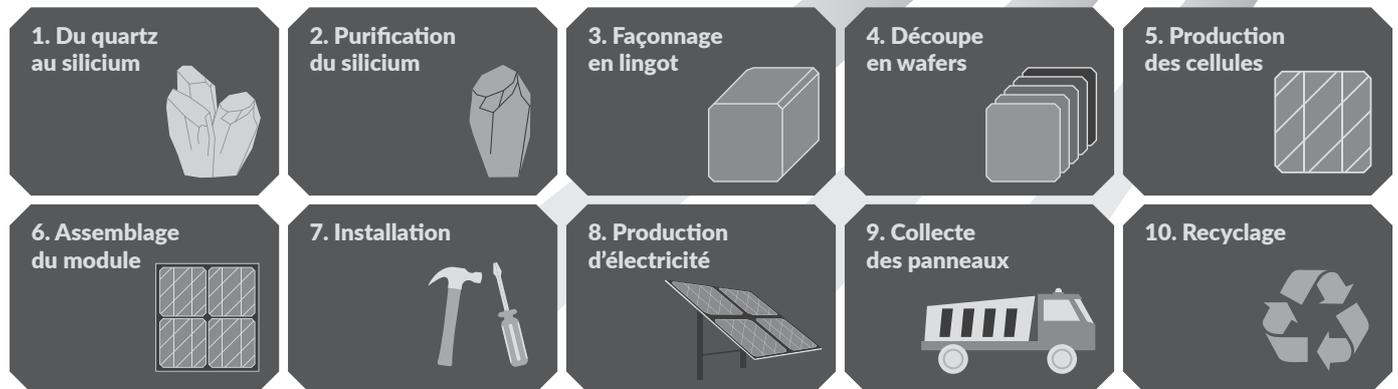


Les dix étapes du cycle de vie d'un panneau photovoltaïque



MÉTHODOLOGIE

1

L'analyse de cycle de vie (ACV) permet d'évaluer et de comparer, sur des bases communes, l'impact environnemental d'un produit tout au long de son existence, de sa fabrication à son recyclage, en utilisant des indicateurs quantitatifs standardisés. Cette méthode est encadrée au niveau international par les normes ISO 14040 et ISO 14044.

2

Dans cette infographie, nous avons choisi comme référence **un panneau photovoltaïque fabriqué en Chine**. En 2024, la Chine dominait à 90 % le marché européen. Le mix électrique chinois, majoritairement basé sur le charbon, augmente l'empreinte carbone liée à la production du panneau.

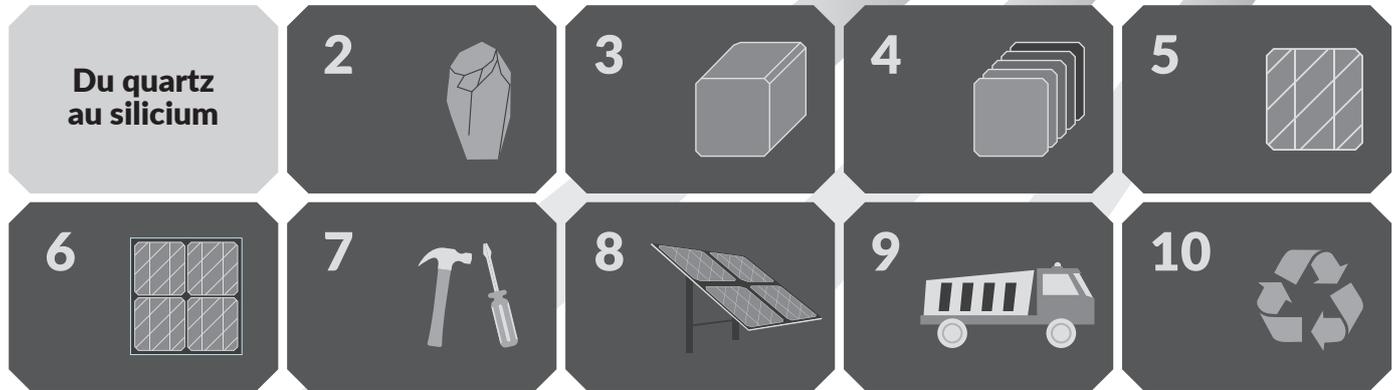
3

Nous avons retenu **deux procédés industriels courants** : la voie chimique (« procédé Siemens ») pour la production du silicium solaire (étape 2) et le procédé dit Czochralski pour la fabrication du silicium monocristallin (étape 3).

4

La France est prise comme lieu d'utilisation, ce qui influence l'énergie nécessaire pour le transport, l'installation et le recyclage du panneau. Ce choix impacte surtout la quantité d'électricité produite, liée à l'ensoleillement local. Plus un panneau produit d'électricité, plus il compense rapidement l'énergie grise qui a été consommée pour sa production.

Les dix étapes du cycle de vie d'un panneau photovoltaïque



ÉTAPE 1 - DU QUARTZ AU SILICIUM

OBJECTIFS

- Obtenir du silicium à partir de la silice (SiO_2) contenue dans le quartz ou le sable
- Extraire l'oxygène de la silice pour obtenir un silicium de qualité métallurgique (MG-Si)

PROCÉDÉS

- Chauffer un mélange de quartz et de combustible carboné (coke, houille et bois)
- Le carbone et l'oxygène se combinent pour donner du CO_2
- Il reste du silicium métallurgique pur à 98-99 %

IMPACTS

- Consommation d'énergie et d'eau, émissions de CO_2

FLUX ENTRANTS

Pour produire 1 kg de MG-Si

0,51

Eau (en m^3)

11

Électricité (en kWh)

23,10

Chaleur (en MJ)

3

Sable (en kg)

2,6

Combustible (en kg)

nota : un kWh vaut 3,6 mégajoules (MJ)

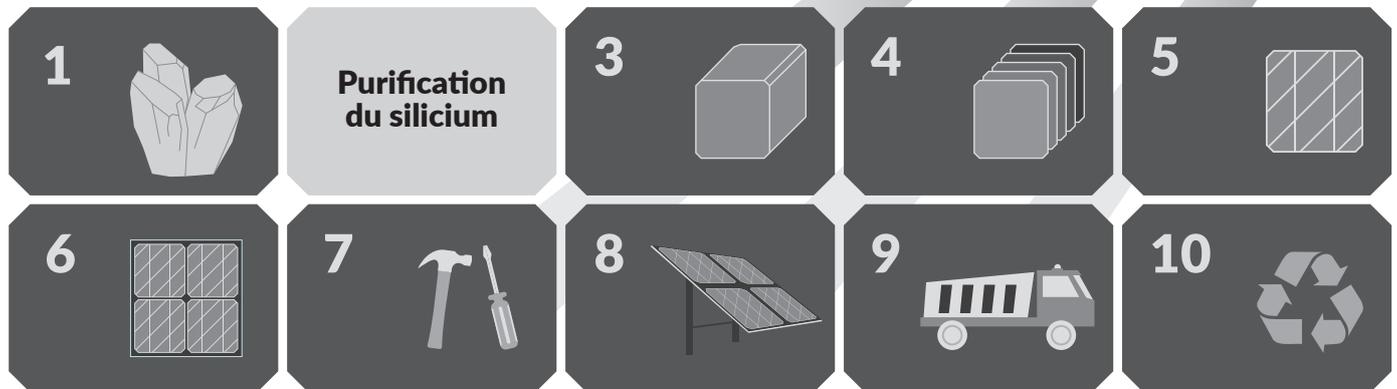
FLUX SORTANTS

29,5

Émissions CO_2 par watt (en g)

Poussières fines

Les dix étapes du cycle de vie d'un panneau photovoltaïque



ÉTAPE 2 - PURIFICATION DU SILICIUM

OBJECTIFS

- Purifier le silicium métallurgique pour obtenir un silicium polycristallin de qualité solaire, pur à 99,9999 % (SoG-Si)

PROCÉDÉS

- Voie chimique ou métallurgique
- Principalement chimique aujourd'hui car permet d'obtenir un matériau plus pur, mais consomme plus d'énergie et présente des risques liés à l'utilisation de produits chlorés

IMPACTS

- Ces deux premières étapes représentent 40 % de l'énergie consommée dans tout le cycle de production d'un panneau photovoltaïque

FLUX ENTRANTS

Pour produire 1 kg de SoG-Si

0,35

Eau (en m³)

49

Électricité (en kWh)

28,80

Chaleur (en MJ)

1,13

MG-Si (en kg)

2

Produits chimiques (en kg)

FLUX SORTANTS

88,1

Émissions CO₂ par watt (en g)

Produits chlorés

Les dix étapes du cycle de vie d'un panneau photovoltaïque



ÉTAPE 3 - FAÇONNAGE EN LINGOT

OBJECTIFS

- Transformer le silicium solaire polycristallin, dont les atomes sont disposés de manière aléatoire, en un silicium monocristallin, où ils sont alignés de façon ordonnée
- Façonner le silicium sous forme de lingot

PROCÉDÉS

- Fondre et resolidifier progressivement le silicium solaire en ajoutant un élément dopant, le bore

IMPACTS

- Importante consommation de gaz

FLUX ENTRANTS

Pour produire 1 lingot d'1 kg

5,09

Eau (en m³) dont
4,8 m³ à retraiter

32

Électricité (en kWh)

68,20

Gaz naturel pour
brûleur (en MJ)

1,02

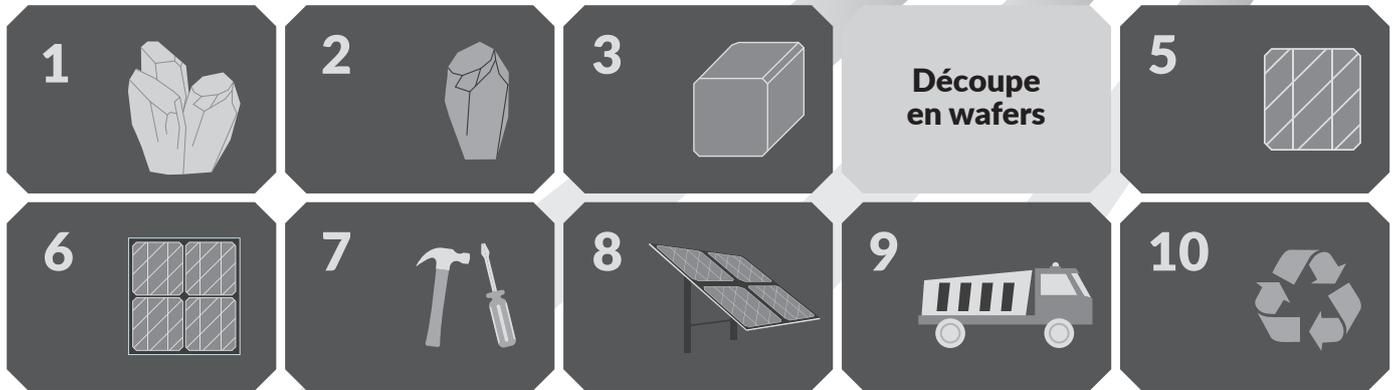
SoG-Si (en kg)

FLUX SORTANTS

26,5

Émissions CO₂
par watt (en g)

Les dix étapes du cycle de vie d'un panneau photovoltaïque



ÉTAPE 4 - DÉCOUPE EN WAFERS

OBJECTIFS

- Découper les lingots monocristallins en tranches fines de 250 micromètres (μm), les wafers

PROCÉDÉS

- Utiliser une scie à fil avec une solution abrasive (slurry)

IMPACTS

- Perte importante de 30-40 % de matériau lors du sciage
- Recyclage possible de la poudre dans d'autres filières industrielles

FLUX ENTRANTS

Pour produire 1 m² de wafers

0,056

Eau (en m³)

4,76

Électricité (en kWh)

4

Gaz naturel pour brûleur (en MJ)

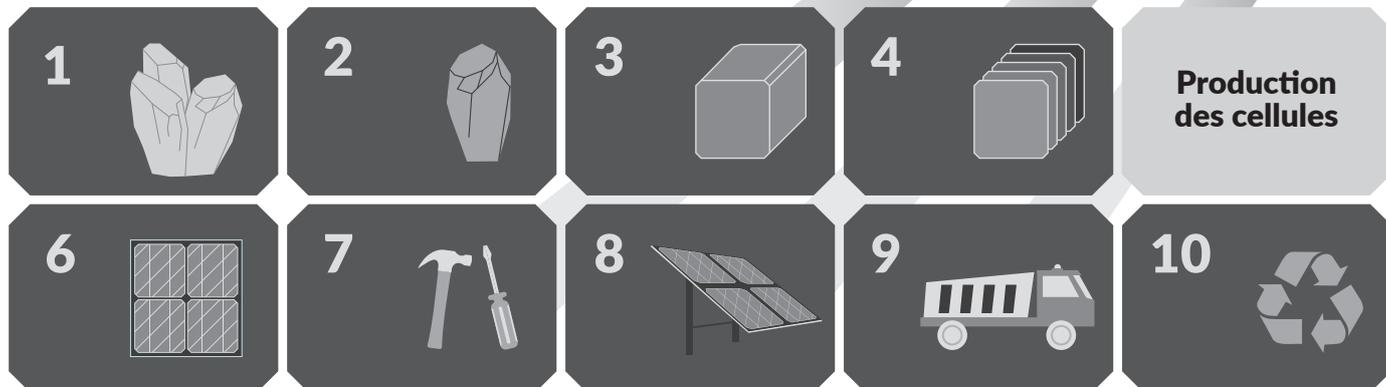
FLUX SORTANTS

8,19

Émissions CO₂ par watt (en g)

Produits de silicium, slurry

Les dix étapes du cycle de vie d'un panneau photovoltaïque



ÉTAPE 5 - PRODUCTION DES CELLULES

OBJECTIFS

- Fabriquer des cellules qui transforment l'énergie lumineuse en énergie électrique
- Les cellules peuvent être carrées ou rectangulaires (15-20 cm)

PROCÉDÉS

- Dopage du silicium exposé à un nuage gazeux contenant du phosphore
- Dépôt d'une fine couche d'aluminium
- Gravure des fils de contact électrique (aluminium et argent)
- Films anti-reflets et traitements dans des bains acides ou alcalins

IMPACTS

- Utilisation de fours électriques et de nombreux composés chimiques irritants, corrosifs et toxiques

FLUX ENTRANTS

Pour produire 1 m² de cellules



Eau (en m³)



Électricité (en kWh)



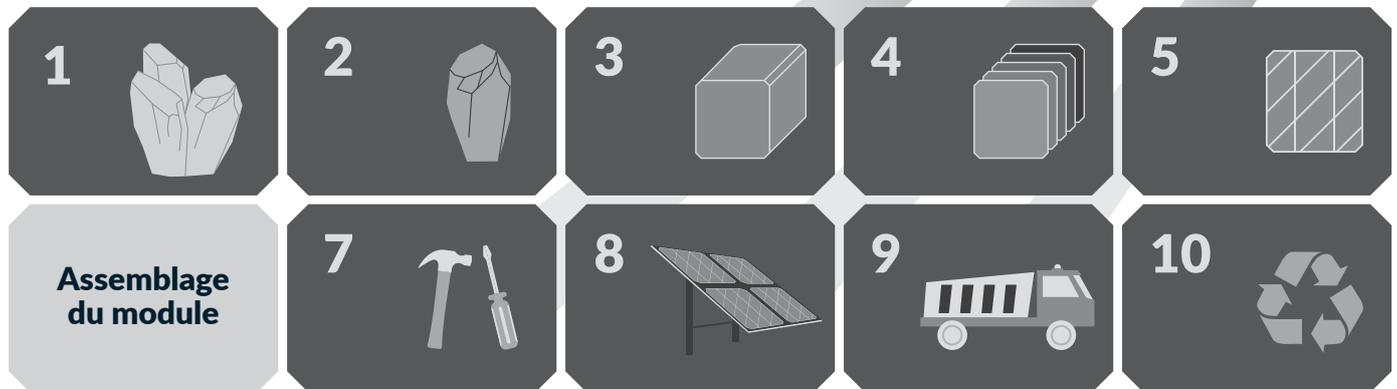
Divers éléments chimiques (en kg)

FLUX SORTANTS

73,6

Émissions CO₂ par watt (en g)

Les dix étapes du cycle de vie d'un panneau photovoltaïque



ÉTAPE 6 - ASSEMBLAGE DU MODULE

OBJECTIFS

- Protéger les cellules du milieu extérieur en les assemblant en modules de 60 à 72 cellules (1,7 m x 1 m, surface : 1,7 m²)

PROCÉDÉS

- Connexion des cellules
- Encapsulation dans une enveloppe EVA (éthylène-acétate de vinyle) qui, une fois chauffée, forme une couche de colle autour des cellules
- Protection par une vitre de verre solaire pur et une feuille de plastique rigide (backsheet)
- Pose d'un cadre aluminium
- Ajout d'un boîtier, de câbles et d'un onduleur (pour convertir le courant continu en courant alternatif)

IMPACTS

- Manipulation de nombreux composés chimiques nécessitant des mesures de sécurité et de prévention des rejets
- Production d'aluminium énergivore, émettant de l'hexafluorure de soufre (SF₆), un gaz à effet de serre à fort pouvoir réchauffant

FLUX ENTRANTS

Pour produire 1 m² de modules

0,005

Eau (en m³)

14

Électricité (en kWh)

17,62

Verre solaire (en kg)

2,13

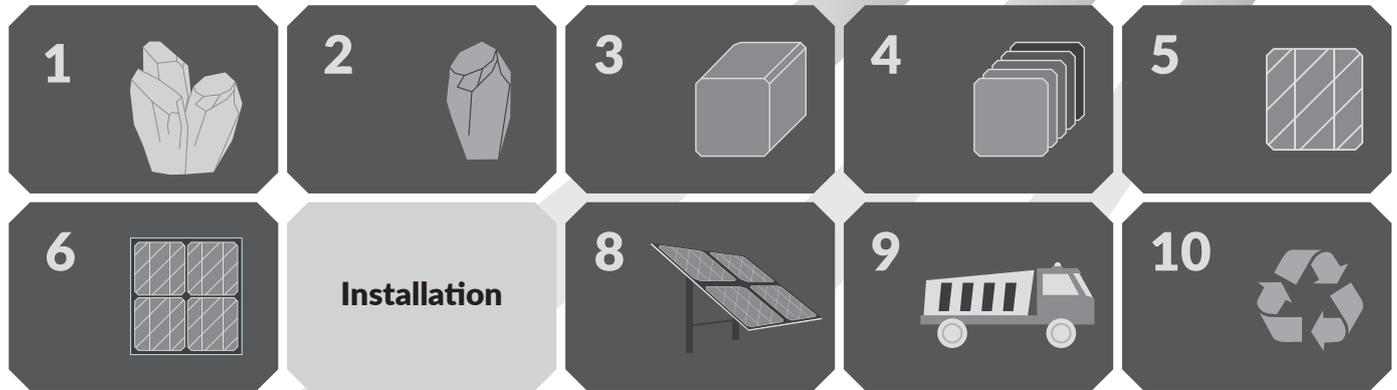
Aluminium (en kg)

FLUX SORTANTS

226

Émissions CO₂ par watt (en g)

Les dix étapes du cycle de vie d'un panneau photovoltaïque



ÉTAPE 7 - INSTALLATION

OBJECTIFS

- Transport des panneaux, préparation du site et installation au sol

PROCÉDÉS

- Transport par bateaux/camions, pose des structures du parc photovoltaïque

IMPACTS

- Empreinte carbone du transport
- Déboisement
- Perte d'habitats animaliers
- Acceptabilité sociale des grandes installations

FLUX ENTRANTS

- Manutention, matériaux de travaux publics et de construction

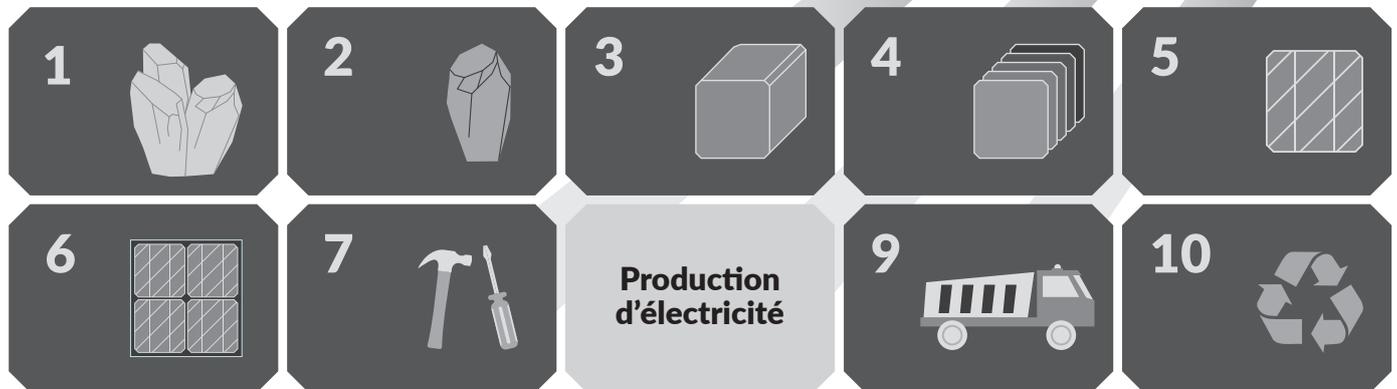


FLUX SORTANTS

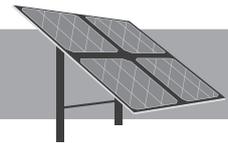
606

Émissions CO₂
par watt (en g)

Les dix étapes du cycle de vie d'un panneau photovoltaïque



ÉTAPE 8 - PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ



OBJECTIFS

- Assurer l'autoconsommation ou l'injection de l'électricité produite sur le réseau
- Durée de vie moyenne d'un panneau solaire : 30 ans

PROCÉDÉS

- Connexions électriques appropriées
- Maintenance des installations

IMPACTS

- Incidences **sous** les panneaux dans le cas d'agrivoltaïsme : réduction de la lumière mais meilleure rétention d'eau
- Incidences **sur** les panneaux : effet îlot de chaleur
- Perturbation des déplacements des grands mammifères

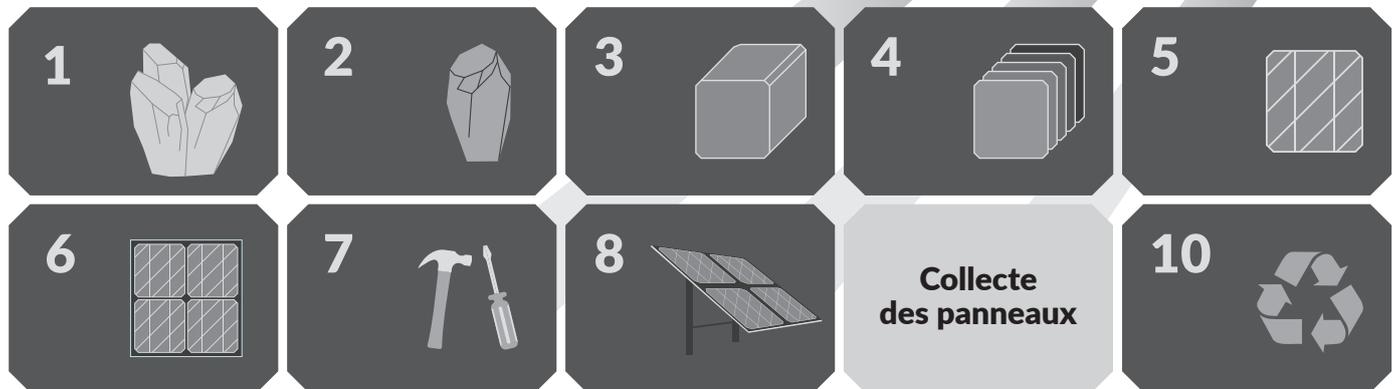
FLUX ENTRANTS

- Pratiquement aucune consommation d'énergie (excepté pour la maintenance)

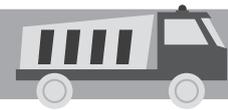
FLUX SORTANTS

- Pas d'émissions de CO₂

Les dix étapes du cycle de vie d'un panneau photovoltaïque



ÉTAPE 9 - COLLECTE DES PANNEAUX



OBJECTIFS

- Récupérer les panneaux en fin d'usage et les déposer dans des points de collecte

PROCÉDÉS

- Démontage et transport par camions en essayant de rationaliser au maximum les parcours

IMPACTS

- Risques de nombreux mouvements de camions avec empreinte carbone

FLUX SORTANTS

Émissions d'équivalent CO₂ par watt pour les deux dernières étapes 9 et 10 :

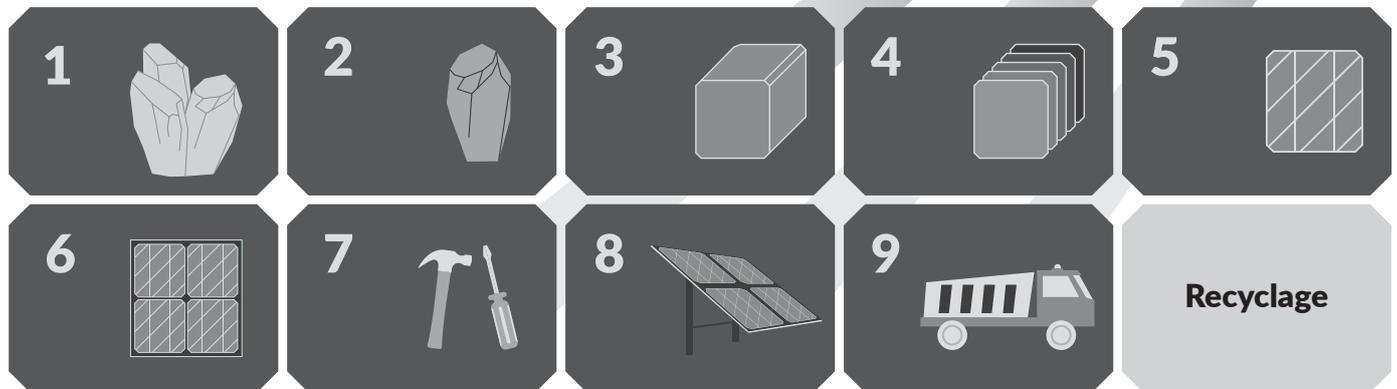
- Collecte et recyclage des panneaux usagés

382

Émissions CO₂
par watt (en g)

- Récupération de 94 % des matières permet de déduire du bilan final des émissions estimées à -124 gCO₂eq/W

Les dix étapes du cycle de vie d'un panneau photovoltaïque



ÉTAPE 10 - RECYCLAGE



OBJECTIFS

- Séparer les fractions qui composent un panneau : 68 % de verre, 12 % d'aluminium, 9 % de plastiques, 4 % de silicium, 1 % de cuivre étamé (recouvert d'étain), 1 % de cuivre, 6 % de rebuts
- Au total : 94 % d'un panneau peut être recyclé et valorisé

PROCÉDÉS

- Séparation des boîtiers, câblages et cadre d'aluminium envoyé en fonderie
- Broyage : tri par séparation aéraulique des particules récupérées (un jet d'air sépare le verre, le cuivre et les particules fines), flottaison (plastiques, traces d'argent), courant de Foucault (cuivre étamé, résidus d'aluminium)
- Délamination : séparation de la plaque de verre et des cellules photovoltaïques par une lame chaude (300 °C)

IMPACTS

- Consommation d'électricité et de gaz pour les machines et fours
- Rebut de matières

FLUX ENTRANTS



Électricité (en kWh)



Produits chimiques (en kg)

- Les quantités d'électricité et de produits chimiques n'ont pas été précisées, car très variables et ne concernent que 6 % du produit.

FLUX SORTANTS

Émissions d'équivalent CO₂ par watt pour les deux dernières étapes 9 et 10 :

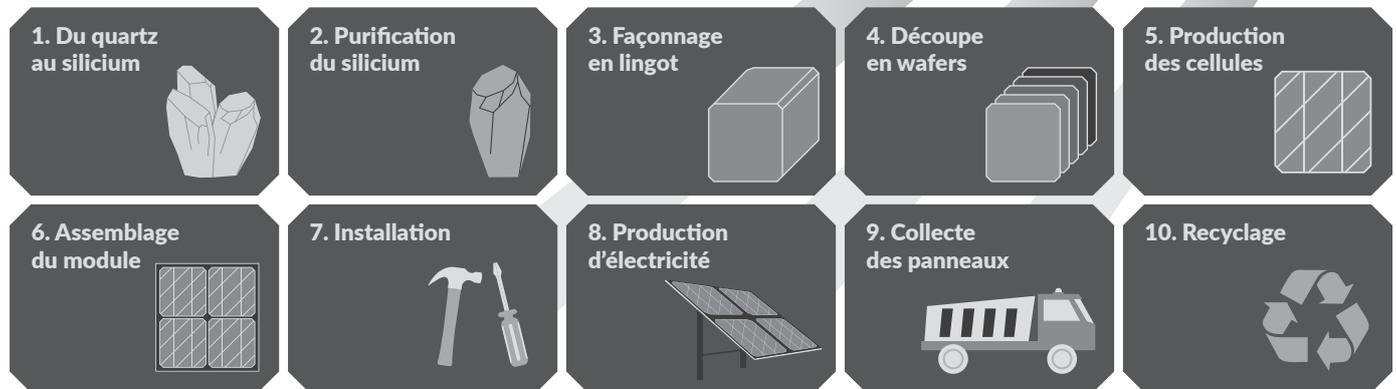
- Collecte et recyclage des panneaux usagés

382

Émissions CO₂ par watt (en g)

- Récupération de 94 % des matières permet de déduire du bilan final des émissions estimées à -124 gCO₂eq/W

Les dix étapes du cycle de vie d'un panneau photovoltaïque



BILAN ÉNERGÉTIQUE

1

Il met en évidence le « temps de retour énergétique », c'est-à-dire la durée nécessaire au système photovoltaïque pour produire autant d'énergie qu'il en a consommée tout au long de son cycle de vie.

2

Cette énergie consommée pendant la production du panneau, son transport, son installation et son recyclage est appelée « énergie grise ».

En moyenne, la fabrication des modules représente plus de 60 % de cette énergie grise. L'installation des onduleurs, câbles et structures représentent environ un tiers, tandis que la part du transport est faible. Le recyclage permet de réutiliser 94 % d'un module, ce qui réduit l'impact global.

3

La production d'électricité dépend du lieu : un panneau produit plus d'énergie au Sahara qu'en Scandinavie, il compense donc plus ou moins rapidement l'énergie grise qui a été consommée pour sa production.

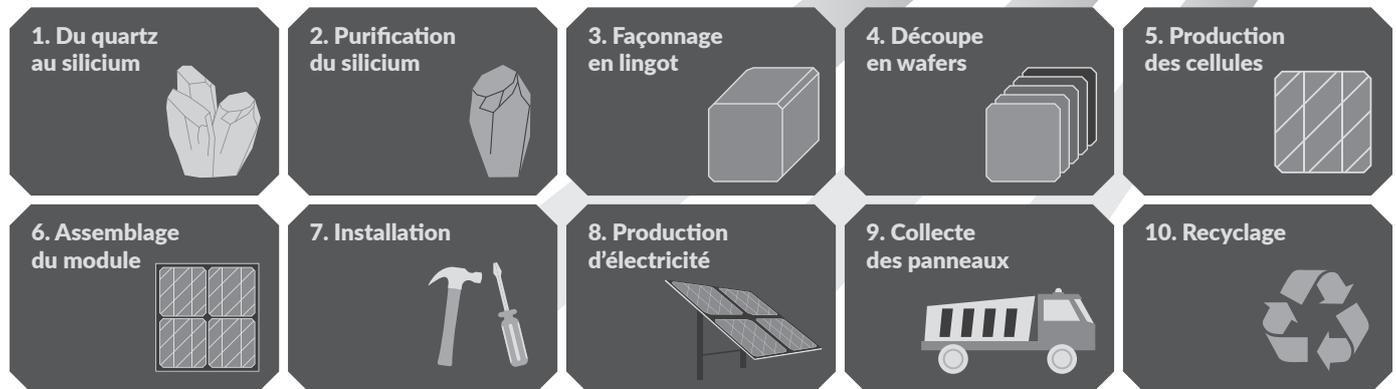
4

En France, le temps de retour est estimé entre 1 et 1,5 an, selon l'ensoleillement et les conditions d'installation (notamment l'orientation des panneaux). Sur toute sa durée de vie, un panneau peut produire entre 17 et 35 fois l'énergie grise qu'il a consommée.

5

En 30 ans, le temps de retour énergétique a été divisé par trois grâce aux progrès technologiques réalisés par la filière.

Les dix étapes du cycle de vie d'un panneau photovoltaïque



BILAN CARBONE

1

Le bilan carbone correspond à la quantité de gaz à effet de serre émise lors du cycle de vie d'un produit, exprimée en équivalent CO_2 (gCO_2eq).

2

En France, pour des systèmes équipés de panneaux photovoltaïques chinois, la valeur standard est de $43,9 \text{ gCO}_2\text{eq/kWh}$ produit. À titre de comparaison, une centrale à gaz émet près de $500 \text{ gCO}_2\text{eq/kWh}$. Ce chiffre descend à $32,3 \text{ gCO}_2\text{eq/kWh}$ pour des panneaux européens, et à $25,2 \text{ gCO}_2\text{eq/kWh}$ pour des panneaux fabriqués en France.

3

Cette différence s'explique par les mix électriques des pays : la production d'un panneau consomme beaucoup d'électricité. Un pays utilisant majoritairement du charbon aura un bilan carbone plus élevé qu'un pays qui produit son électricité à partir d'énergies renouvelables ou du nucléaire.

4

Enfin, le transport par porte-conteneurs depuis la Chine, bien que long, a une faible empreinte carbone par panneau, car il transporte de très grandes quantités à chaque voyage.