Le solaire photovoltaïque : état de l'art, cycle de vie, énergie grise

Depuis la convention cadre des nations unies sur les changements climatiques adoptée le 9 mai 1992 et le protocole de Kyoto conclu en 1997, les émissions de gaz à effet de serre (GES) sont clairement identifiées comme directement responsables du réchauffement climatique.

L'énergie solaire est, rappelons-le, inépuisable. Les panneaux solaires photovoltaïques, pendant leur phase d'utilisation, ne dégagent aucun GES (Gaz à Effet de Serre). Cependant, de l'énergie est nécessaire pour produire, installer et recycler les panneaux photovoltaïques. Cette énergie est appelée énergie grise.

Le but de cette publication est de faire le point sur les technologies (2019), sur les cycles de vie des panneaux solaires photovoltaïques utilisés dans les installations de production d'énergie électrique chez les particuliers ou dans les centrales privés, et enfin de présenter à travers des exemples chiffrés des temps de retour de dette CO2.

Table des matières

Du soleil au panneau photovoltaïque : principes et limites. 2
Les filières de production des panneaux photovoltaïques : principes, couts et implantation 3
Principaux mode d'installation des panneaux solaires photovoltaïques 4
Utilisation de l'énergie photovoltaïque 5
Cycle de vie des panneaux solaires photovoltaïques 6
- Fabrication du silicium 6
- Mise en lingot du silicium 7
- Bilan global 7

Dette carbone d'une installation photovoltaïque 7
Dégradation des panneaux solaires photovoltaïques 8
Recyclage des panneaux solaires photovoltaïques 9
Application : profil environnemental d'un panneau solaire photovoltaïque 10
- Résultats des calculs 11
- Bilan des économies de CO2 par la production d'énergie renouvelable du panneau photovoltaïque. 11

Bibliographie : 12

Du soleil au panneau photovoltaïque : principes et limites.

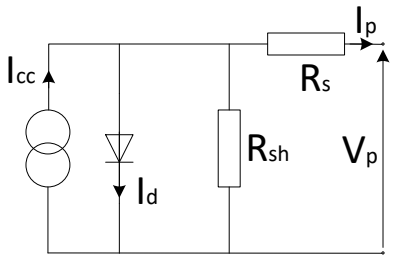
Le rayonnement solaire est une ressource gratuite, utilisable pour être transformé en chaleur ou en électricité.

Cette ressource est cependant inégalement répartie sur le territoire français. Pour le photovoltaïque, un écart de 50 à 60 % de production peut être attendu entre les Hauts de France et la région PACA.

Le rendement d'une installation étant lié à sa production, cet écart impactera le temps de retour sur investissement de l'installation.

La production d'électricité à partir du soleil utilise l'effet photovoltaïque. Cet effet est mis en œuvre par des semi-conducteurs à jonction PN, et se traduit par la mise en circulation d'électrons arrachés par des photons d'énergie suffisante.

Le schéma électrique simplifié d'une cellule est un générateur de courant en parallèle avec une diode. Rsh représente les pertes dues au courant de fuite de la jonction. Rs, les pertes de conduction.



$$I_P = I_{CC} - I_d\left[e^{\frac{V_P}{V_t}} - 1\right] - \frac{V + I_P \times R_S}{R_{sh}}$$

avec $V_t = \frac{kT}{q}$

I_d : courant de saturation de la diode
K : constante de Boltzmann
q : charge de l'électron
T : température de la diode

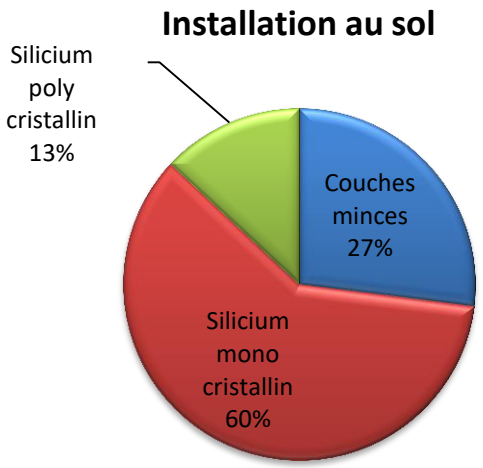
La tension produite par une cellule est de l'ordre de 0,6 V. Pour augmenter la tension disponible, il faut les associer en série. Le courant dans la branche sera alors limité par la cellule la plus faible. Un test des cellules est alors nécessaire pour associer des cellules ayant un rendement proche. En cas d'ombrage, une seule cellule insuffisamment éclairée suffit à faire chuter le rendement. La qualité de la connexion entre les cellules est déterminante pour le rendement de la chaîne.

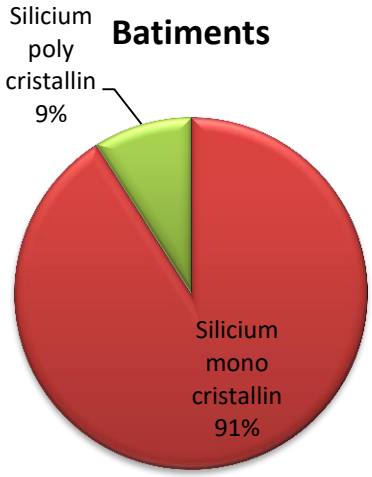
Pour augmenter le courant produit par le panneau photovoltaïque, les groupes de cellules sont associés en parallèle. Là aussi, l'association de cellules aux caractéristiques similaires est nécessaire. En cas d'ombrage partiel d'un panneau photovoltaïque, une branche pourra fonctionner en récepteur et se voir imposer une tension inverse destructrice. Pour éviter ce phénomène, il faut associer une diode by pass en série avec chaque branche.

Ainsi, un même panneau solaire photovoltaïque de 60 cellules peut, en fonction de la qualité des cellules associées, fournir une puissance crête s'étalant de 300 à 320 W. (1)

Enfin, le rendement de l'ensemble dépend de plusieurs facteurs (2):

- l'éclairement : le modèle ci-dessus n'est plus valable pour les éclairements inférieurs à 20 % de l'éclairement nominal. Le rendement s'écroule.
- les conditions de l'éclairement : selon les technologies, la réponse pour différents spectres lumineux diffère.
- l'incidence. Pour des panneaux photovoltaïques fixes, le rendement évolue avec l'incidence de l'éclairement (Très forte variation à partir de 60°)
- les températures élevées font baisser le rendement.



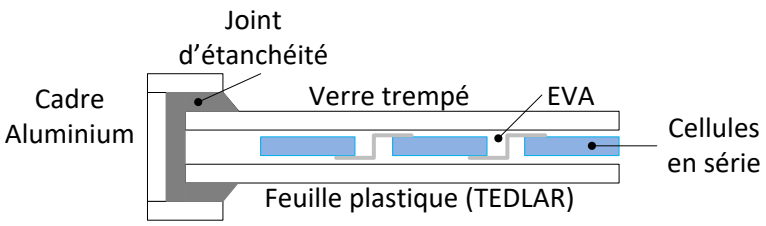


Part des différentes technologies pour le grand photovoltaïque en métropole (3)

Les filières de production des panneaux photovoltaïques : principes, couts et implantation

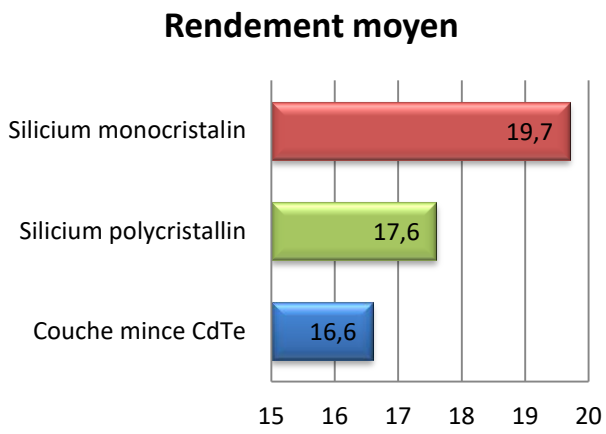
Deux grandes familles de modules sont actuellement utilisées (3):

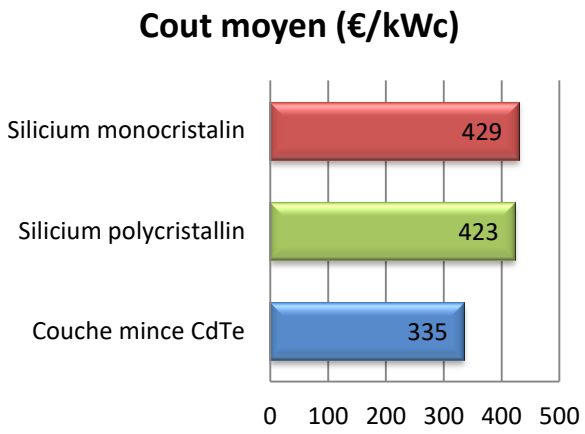
- Le silicium cristallin (photovoltaïque de 1ère génération) : les cellules sont constituées de fines plaques de silicium (Appelées wafer, environ 200 µm d'épaisseur), élément que l'on extrait de la silice contenu dans le quartz. Selon la méthode de cristallisation utilisée on obtient du silicium monocristallin (de meilleure qualité mais plus cher à produire) ou du silicium multi-cristallin (moins cher à produire mais offrant des rendements moins élevés).



Les wafers sont ensuite connectés entre eux, encapsulés dans de la résine transparente éthylène-vinyl-acétate (EVA), puis pris en sandwich entre une plaque plastique et un verre trempé assurant la protection mécanique.

Les constructeurs garantissent une perte maximale du rendement de 10 % sur 10 ans et de 20 % sur 25 ans.





Rendements et couts moyen du grand photovoltaïque en métropole (3)

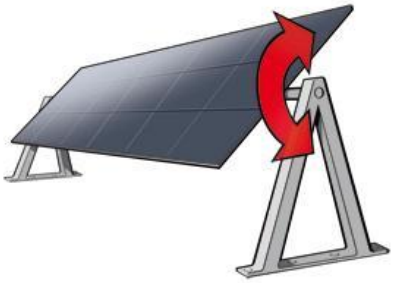
- Couches minces (photovoltaïque de 2e génération): ces cellules sont obtenues en déposant des couches de matériaux semi-conducteurs et photosensibles sur un support en verre, en plastique, en acier, etc. Différents matériaux peuvent être utilisés, le plus utilisé en production d'énergie électrique étant le tellure de cadmium. Celui-ci est déposé en couche mince (de l'ordre de 3 µm) entre 2 plaques de verre. Cette technologie permet de baisser les coûts de production mais les cellules ont un rendement moindre que dans le cas du silicium cristallin. De plus, le tellure de cadmium est toxique. Il faut gérer cette toxicité à la fabrication et au recyclage. Cette filière a connu un développement important ces dernières années.

En 2018, quatre pays concentrent plus des deux tiers de la puissance installée photovoltaïque : la Chine (35 %), les États-Unis (12 %), le Japon (11 %) et l'Allemagne (9 %). Le principal lieu de production des panneaux solaires photovoltaïques est la chine : 62 % de la production en 2018.

Principaux mode d'installation des panneaux solaires photovoltaïques

Installations au sol fixes

Installations suiveuses mono axiale



Installations suiveuses bi axiale

Les installations fixes sont orientées au sud. L'angle d'exposition peut varier de 25 à 30° et dépend du lieu d'installation.
Les installations mobiles (suiveurs ou trackers) permettent d'adapter l'angle d'exposition en fonction des saisons (installation à axe horizontale) ou de l'heure (installation biaxiale).
Elles permettent une amélioration de la production d'électricité de 30 à 40 %. Cependant, en raison des couts supplémentaires d'installation et d'entretien, les suiveurs sont très peu installés.
L'installation au sol, si elle est simple et peu onéreuse, implique des conflits d'usages (Agriculture, forêt, zone humide...). Au-delà de 250 kWc, une étude d'impact est systématiquement demandée.

Bâtiments : toiture classique

Bâtiments : toit plat

Bâtiments : façade ou brise soleil

Pour l'intégration des panneaux photovoltaïques à un bâtiment, l'orientation de la façade ou du toit si celui-ci n'est pas plat est le critère primordial d'un bon rendement. Hormis à proximité de site classé, il n'y a pas de conflit d'usage avec ce type d'installation. L'installation en toiture représente un gisement de 364 GWc. (5). Pour mémoire, en France, la capacité installée des unités de production électrique de plus de 1 MW est de 130 GWc (6).

Enfin, un gisement de 53 GWc (5) est à disposition en équipant les parkings d'ombrières photovoltaïques permettant de produire de l'énergie électrique et de protéger les véhicules. Là aussi, il y a peu de conflit d'usage.

D'autres solutions de montage existent : tuiles, bardages, routes... Ces différentes solutions sont en phase de développement ou commencent à montrer leur inefficacité énergétique et technique, comme le premier tronçon de la route solaire à Tourouvre, en Normandie, installée le 22 décembre 2016. (Le monde, 22 juillet 2019).

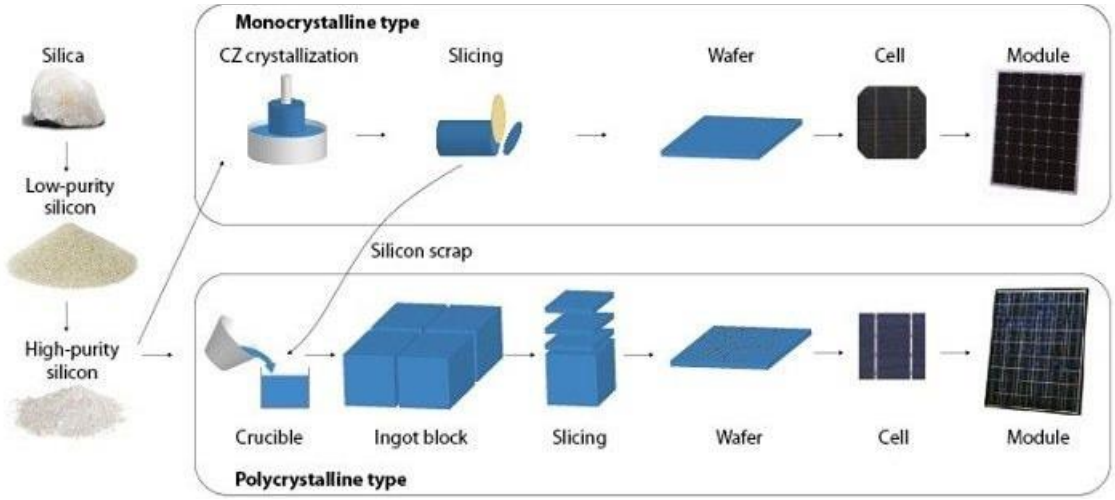
Utilisation de l'énergie photovoltaïque

Une installation photovoltaïque peut être autonome, c'est à dire isolée du réseau électrique. Ce mode de consommation est réservé aux sites dit isolés, c'est à dire éloignés du réseau électrique.

Si elle est connectée au réseau électrique, l'installation électrique injecte totalement ou partiellement l'énergie produite. Dans le premier cas, l'électricité est rachetée par le producteur d'électricité choisi par contrat. Cela implique une installation avec un compteur de production et un compteur de non consommation. Dans le deuxième cas, s'il y a un surplus d'énergie, celle-ci peut être revendue si la puissance de l'installation est supérieure à 3kWc. L'autoconsommation est possible depuis le 24 Février 2017.

Cycle de vie des panneaux solaires photovoltaïques

Fabrication du silicium



La première étape nécessaire pour fabriquer des panneaux solaires photovoltaïques à technologie mono ou polycristalline est l'obtention de silicium de qualité solaire ou électronique purifié à 99,999 9% par purification métallurgique ou à 99,999 999 9% par le procédé SIEMENS. Cette étape est extrêmement énergivore car un premier silicium (Pureté typique 98 %) est obtenu dans des fours à arc, puis purifié par gazéification (Procédé Siemens).

La purification métallurgique est au stade du développement et permettrait de réduire la facture énergétique.

Pays	**Chine**	**Japon**	**Corée du sud**	**Taïwan**	**USA**	**France**	**Allemagne**
kg CO2-eq/kg	141,023	75,104	85,555	124,480	93,149	23,117	87,724

ECS (Evaluation Carbone Simplifié) de la fabrication du silicium, 2016 (7)

La disparité des chiffres s'explique par :

- le bilan carbone de l'électricité utilisée pour la production du silicium polycristallin purifié.

Pays	***g CO2eq/kWh***
Germany	666
France	112
Japan	638
Taiwan	860
USA	736
South-Korea	629
China	1155

- le carbone utilisé pour la réduction du silicium métallurgique
- le cycle de vie du produit (extraction et transport des matières premières).

Mise en lingot du silicium

Le silicium monocristallin est tiré lentement avec un germe de silicium comportant une orientation cristallographique donnée depuis un bain en fusion de silicium purifié.

Le silicium polycristallin est obtenu par un refroidissement directionnel d'une quantité de silicium purifié dans un creuset en quartz. Le creuset utilisé étant carré, la découpe du lingot génère moins de pertes.

ECS (Evaluation Carbone Simplifié) 2016 (7)

	Pays	Chine	Japon	Corée du sud	Taïwan	USA	France	Allemagne
Mise en lingot mono	***kg CO2-eq/kg***	80,345	39,489	45,966	70,092	50,673	7,268	47,310
Mise en lingot poly	***kg CO2-eq/kg***	18,323	9,043	10,514	15,994	11,583	1,724	10,819

Là aussi, une grande quantité d'énergie électrique est nécessaire pour maintenir le silicium en fusion.

Bilan global

Chaque étape de la construction doit être prise en compte. Elles sont :

- la mise en plaque (Wafer). Les lingots sont découpés par une scie à fil. Les pertes peuvent monter jusqu'à 50 % de la matière première. Le bilan carbone est là aussi très variable, d'un pays à l'autre, d'une technologie à l'autre : de 0,349 à 1,064 kg CO2-eq/wafer.
- la transformation des wafers en cellule photovoltaïque nécessite de multiples opérations (Polissage, dopage, gravure,...). Comme pour la mise en wafer, les bilans carbones ont une grande fourchette : de 0,145 à 0,577 kg CO2-eq/cell en fonction du pays de production.
- enfin, il faut prendre en compte les matériaux protégeant les cellules (EVA, Verre trempé, cadre...) et le procédé d'assemblage des panneaux solaires photovoltaïques.

Dette carbone d'une installation photovoltaïque

L'agence internationale de l'énergie, l'IEA, dans son rapport de 2014, rappelle que les panneaux photovoltaïques éclairés par le soleil du sud de l'Europe mettent de 0,7 à 2,5 année à rembourser leurs dettes carbones, en fonction de leurs technologies et du mix électrique du pays constructeur. (Voir calcul en exemple)

Le bilan carbone doit prendre en compte les coûts environnementaux liés à la fabrication, à la pose, à la mise en œuvre de ceux-ci, ainsi qu'à leur démantèlement.

Si les installations sur les bâtiments ou sur les parkings ne font qu'augmenter légèrement le bilan carbone de ceux-ci, les installations au sol nécessitent une grande vigilance. En effet, une installation au sol peut

grever la balance du bilan carbone, par exemple à cause d'un défrichement d'une lande ou d'une forêt. On parle alors de dette carbone de l'installation. L'INRA propose une matrice de calcul qui permet de tenir compte de la non captation du CO2 par la biomasse remplacée par l'installation solaire et de la masse de carbone provoqué par le défrichage. Par exemple, sur une installation de 71 ha dans les landes, le déboisement et le non stockage du CO2 sur une période de 25 ans est estimé à 47 119 tonnes de C02. (8)

Cependant, comme le montre le résultat de l'étude portant sur cette installation permettant de produire 55 131 MWh (soit l'équivalent de la consommation de 27 400 habitants), le bilan carbone reste positif.

Bilan des EMISSIONS de CO_2 par le projet		
Phase	**Emissions en t Eq-CO_2 / MWc**	**Emissions en t Eq-CO_2 pour le projet Rion-Nabout de 48.15 MWc**
Fabrication des modules	431,5	20 776,73
Fabrication des autres composants	575	27 686,25
Transport	24	1 155,60
Chantier	94	4 526,10
Défrichement hors masse non stockée	572	27 547,00
Entretien et maintenance	2,145	2 582,04
Démantèlement	47	2 263,05
Recyclage des matériaux	-240	-11 556,00
Bilan des émissions de CO_2 du projet sur 25 ans en t Eq-CO_2	1 505,75	74 980,77

Bilan des ECONOMIES de CO2 par la production d'énergie renouvelable		
Puissance cumulées des 3 tranches	48,15	MWc
Simulation de productible	1145	kWh / kWc
Production solaire	55 131,8	MWh/an
Emissions de GES par kWh produit en France	85	g EqCO_2 /kWh
Emissions de GES par kWh produit en Europe	306	g EqCO_2 /kWh
GES émis (en kg) par le projet rapporté à la production sur 25 ans	0,054	kg EqCO_2 /kWh
GES émis (en g) par le projet rapporté à la production sur 25 ans	54,40	g EqCO_2 /kWh
Economie de CO2 par an par kWh (par rapport au mix énergetique Français)	30,60	g EqCO_2 /kWh
Economie de CO2 par an par kWh (par rapport au mix énergetique Européen)	251,60	g EqCO_2 /kWh
Economie de CO2 par an totale (par rapport au mix énergetique Français)	1 686,97	**Tonnes EqCO_2**
Economie de CO2 par an totale (par rapport au mix énergetique Européen)	13 871,08	**Tonnes EqCO_2**
Economie de CO_2 sur 25 ans (par rapport au mix énergetique Français)	42 174,20	Tonnes EqCO_2
Economie de CO_2 sur 25 ans (par rapport au mix énergetique Européen)	346 777,12	Tonnes EqCO_2

Dégradation des panneaux solaires photovoltaïques

Les constructeurs de panneaux solaires photovoltaïques annoncent généralement une dégradation de 20 % sur 25 ans de la performance de leurs modules. Les sources de dégradations et de pannes sont (9):

- décoloration du sandwich EVA qui encapsule les cellules photovoltaïques.
- dégradations des soudures reliant les cellules. Des points chauds peuvent alors être créés, entraînant une accentuation de la décoloration de l'EVA ou une rupture des soudures.

- le sandwich EVA, soumis à de fortes différences de températures, peut se délaminer. Cela peut entraîner une mauvaise réception de l'éclairement, la pénétration de l'humidité, etc...
- enfin, une cellule peut se fissurer. Là aussi, ce phénomène est la cause de point chaud qui accélère la détérioration du fonctionnement.

Recyclage des panneaux solaires photovoltaïques

https://www.pvcycle.fr/

Le recyclage des panneaux solaires photovoltaïques est prévu par la directive 2002/96/CE relative aux déchets d'équipement électriques et électroniques. En France, c'est PV Cycle, un éco-organisme à but non lucratif fondé en 2014 par et pour la filière photovoltaïque qui gère la collecte. Les fondateurs sont EDF ENR Solaire, EDF ENR PWT, Urbasolar, PV CYCLE Association, Sillia VL et le Syndicat des Energies Renouvelables. Cette association met à disposition de tous les acteurs des points de collecte gratuits (200 en France actuellement) afin de transporter les déchets vers des usines spécialisées de recyclage. Le modèle économique de PV Cycle repose en partie sur l'éco-participation.

Le premier site français et même mondial dédié au traitement des panneaux photovoltaïques de typologie silicium cristallins a été inauguré en juillet 2018 à Rousset, dans les Bouches du Rhône.

Ce site, d'une capacité initiale de 4000 tonnes par an, a vocation à traiter les panneaux photovoltaïques de type « silicium cristallin » en fin de vie; Tous les matériaux sont séparés et isolés par un traitement mécanique

- manuel : enlèvement du cadre aluminium si besoin, du boîtier et des câbles de connexion
- automatique : un découpage puis un broyage permet de séparer le verre, les matériaux plastiques, les métaux et le silicium.

Une fois valorisés, les matériaux sont redirigés vers diverses filières industrielles : le verre, transformé aux 2/3 en calcin propre, est utilisé dans le secteur verrier, le cadre est envoyé en affinerie d'aluminium et le plastique est utilisé comme combustible de récupération dans les cimenteries. Le silicium s'en va dans les filières de métaux précieux alors que les câbles et connecteurs sont broyés et vendus sous forme de grenaille de cuivre. Au total, les panneaux photovoltaïques sont recyclés à plus de 95%.

Table 2
Mass composition of 1000 kg of PV waste as input to the recycling process.

Component	Quantity	Unit	Percentage (%)
Glass, containing antimony (0.01–1%/kg of glass)	700	kg	70
PV frame, made of aluminium	180	kg	18
Polymer-based adhesive (EVA) encapsulation layer	51	kg	5.1
Solar cell, containing silicon metal	36.5	kg	3.65
Back-sheet layer (based on Polyvinyl Fluoride)	15	kg	1.5
Cables (containing copper and polymers)	10	kg	1
Internal conductor, aluminium	5.3	kg	0.53
Internal conductor, copper	1.14	kg	0.11
Silver	0.53	kg	0.053
Other metals (tin, lead)	0.53	kg	0.053
Total	**1000**	**kg**	**100**

Parmi les 3340 tonnes collectées par PV CYCLE France en 2018, 1532 tonnes de technologie silicium cristallin ont été livrées sur ce centre de traitement afin d'être traitées. 1449 tonnes de technologie CdTe ont été collectés et traitées en Allemagne.

Application : profil environnemental d'un panneau solaire photovoltaïque

Cycle de vie simplifié de la fabrication d'un panneau solaire mono cristallin 60 cellules, 300 Wc, soit un module de 1.619 m² de surface. 18,64 kg (Hors emballage)

- scénario 1 : fabrication en Chine, 20 000 km en bateau, 1000 km en camion (Livraison sur site).
- scénario 2 : fabrication en France, 1000 km en camion (Livraison sur site).

Ces 2 scénarios représentent les extrêmes du point de vue du bilan carbone, la Chine ayant l'une des productions d'énergie électrique la plus carbonée au monde, et la France l'une des moins carbonée.

Pour le calcul du temps de retour de la dette CO2, 2 situations seront prises en compte : un calcul dans le cadre d'un mix électrique français peu carboné, et un calcul dans le cadre du mix électrique européen moyennement carboné.

Matières premières nécessaires à la fabrication du panneau solaire photovoltaïques.

60 cellules	6,61E-01	kg
Verre solaire	1,23E+01	kg
Aluminium cadre	2,57E+00	kg
EVA	1,32E+00	kg
Backsheet	9,78E-01	kg
Flux de soudure	5,35E-03	kg
Étain à souder	1,98E-05	kg
Silicone	2,62E-01	kg
Junction Box	2,45E-01	kg
Labels	2,07E-02	kg

Données nécessaires aux calculs (7) (10):

Process step / Material	**Unit**	**China**	**France**
PolySi, Siemens process	kg CO2-eq/kg	141,023	23,117
Ingot processing, mono	kg CO2-eq/kg	80,345	7,268
Ingot processing, multi	kg CO2-eq/kg	18,323	1,724
Wafers processing,mono, 156 mm x 156 mm	kg CO2-eq/wafer	1,064	0,394
Wafers processing, multi, 156 mm x 156 mm	kg CO2-eq/wafer	0,891	0,349
Cell processing, mono,156 mm x 156 mm	kg CO2-eq/cell	0,520	0,145
Cells processing, multi,156 mm x 156 mm	kg CO2-eq/cell	0,577	0,202
Glass	kg CO2-eq/kg	1,164	1,045
Glass tempering	kg CO2-eq/kg	0,243	0,228
EVA foil	kg CO2-eq/kg	2,915	2,551
PET granulate	kg CO2-eq/kg	2,821	2,613
PVF film	kg CO2-eq/kg	25,892	17,248
Modules processing mono or multi	kg CO2-eq/m2 module	11,446	7,448
Aluminium	kg CO2-eq/Tonne	16 400	7 803
Transport terrestre par camion	kg CO2-eq/Tonne.km	0,344	0,344
Transport maritime par conteneur	kg CO2-eq/Tonne.km	0,0331	

Le coefficient de perte des étapes de fabrication ne sera pas pris en compte.

Des exemples complets sont disponibles sur http://www.pep-ecopassport.org/

Résultats des calculs

Matières, Composants, ou étapes de fabrication	Quantité	Unité	GES Chine/unité	GES France/unité	GES Chine	GES France
Cellules photovoltaïques	0,661	kg	141,023	23,117	93,216203	15,280337
	0,661	kg	80,345	7,268	53,108045	4,804148
	60	Wafer	1,064	0,394	63,84	23,64
	60	Wafer	0,52	0,145	31,2	8,7
Verre solaire	12,3	kg	1,164	1,045	14,3172	12,8535
	12,3	kg	0,243	0,228	2,9889	2,8044
EVA	1,32	kg	2,915	2,551	3,8478	3,36732
Tedlar (PVF)	0,978	kg	25,892	17,248	25,322376	16,868544
Aluminium	2,57	kg	16,4	7,803	42,148	20,05371
Assemblage	1	Module	11,446	7,448	11,446	7,448
Transport camion	16,84	Tonne.km	0,344	0,344	5,79296	5,79296
Transport maritime	16,84	Tonne.km	0,0331	0	0,557404	0
				TOTAL GES par module (kg CO2-eq)	347,784888	121,612919

Ce bilan simplifié ne prend pas en compte ni le coût C02 du recyclage ni celui des emballages. L'impact du recyclage sera surtout celui du transport et représentera environ 5% supplémentaire de GES.

Bilan des économies de CO2 par la production d'énergie renouvelable du panneau photovoltaïque.

Les données de production utilisées dans la partie suivante ont été calculées de façon approchée avec les données disponibles en ligne sur le site : https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/fr/tools.html

La production d'un kWh électrique en France produit 85 g eqCO2/kWh. C'est 306 g EqCO2/kWh pour l'Europe. Pour le même kWh, le panneau photovoltaïque, lui, n'en émet aucun.

Pour 1 module fabriqué et installé en France, on a donc :

	Energie produite kWh/an	Economie en kg eqC02/kWh France	Economie en kg eqC02/kWh Europe	Economie en kg eqC02/an France	Economie kg eqC02/an Europe	GES production d'un module	Temps de retour de la dette en C02 / France en année	Temps de retour de la dette en C02 / Europe en année
Marseille	535	0,085	0,306	45,475	163,71	121,61	2,67	0,74
Bordeaux	452	0,085	0,306	38,42	138,312	121,61	3,16	0,88
Lille	356	0,085	0,306	30,26	108,936	121,61	4	1,11

Pour 1 module fabriqué en chine et installé en France, on a donc :

	Energie produite kWh/an	Economie en kg eqC02/kWh France	Economie en kg eqC02/kWh Europe	Economie en kg eqC02/an France	Economie kg eqC02/an Europe	GES production d'un module	Temps de retour de la dette en C02 / France en année	Temps de retour de la dette en C02 / Europe en année
Marseille	535	0,085	0,306	45,475	163,71	347,78	7,64	2,12
Bordeaux	452	0,085	0,306	38,42	138,312	347,78	9	2,5
Lille	356	0,085	0,306	30,26	108,936	347,78	11,5	3,2

On retrouve dans ces calculs l'ordre de grandeur des temps de retour minimaux cités par l'agence internationale de l'énergie, à savoir 0,7 à 2,5 années pour le sud de l'Europe.

Mais la situation particulière du mix électrique français, très peu carboné grâce à la production majoritairement d'origine nucléaire, allonge les délais de remboursement de la dette carbone due à la production et au transport des panneaux photovoltaïques.

Cependant, même le scénario le plus défavorable (Fabrication en Chine, Installation à Lille, 11.5 années) reste positif en termes de rejet de C02 car les panneaux photovoltaïques sont utilisés sur des durées de fonctionnement supérieur à 20 ans.

Bibliographie :

(1) Module monocristallin PERC série JAM60S01 300-320/PR
(2) Thomas Mambrini. Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies. Université Paris Sud - Paris XI, 2014.
(3) CRE : Coûts et rentabilités du grand photovoltaïque en métropole continentale février 2019
(4) Installations photovoltaïques au sol. Guide de l'étude d'impact. Ministère de l'écologie
(5) ADEME, Transénergie. Mars 2019. Évaluation du gisement relatif aux zones délaissées et artificialisées propices à l'implantation de centrales photovoltaïques
(6) RTE 2019
(7) ECS : Mariska de Wild-Scholten, SmartGreenScans, mars 2016
(8) Bilan énergétique et carbone UrbaSolar 2016
(9) PV degradation curves: non-linearities and failure modes Dirk C. Jordan 2016
(10) Bilans-ges.ademe.fr