

Systemes photovoltaïques : fabrication et impact environnemental



Synthèse réalisée par Cécile Miquel
sous la direction de Bruno Gaidon

Juillet 2009



Table des matières

Résumé	3
Liste des abréviations	4
Introduction	5
Partie 1 : Processus de fabrication des systèmes photovoltaïques	7
1 Etape 1 : Raffinage du silicium	8
1.1. De la silice au silicium métallurgique	8
1.2. Du silicium métallurgique au silicium solaire.....	10
2 Fabrication des plaques, cellules et modules photovoltaïques	12
2.1. Etape 2 : Cristallisation du silicium et mise en forme des plaques	13
2.2. Etape 3 : Fabrication des cellules.....	15
2.3. Etape 4 : Assemblage des modules.....	17
Partie 2 : Impact environnemental des systèmes photovoltaïques	18
1 Contexte et périmètre des études	18
2 Données d'inventaire du cycle de vie	20
2.1. Tableau synthétique	20
2.2. Energie et matériaux.....	21
2.3. Produits chimiques et rejets.....	23
3 Résultats de l'analyse du cycle de vie.....	24
3.1. Demande cumulée en énergie primaire	25
3.2. Temps de retour énergétique.....	25
3.3. Effet de serre	27
4 Voies de réduction et bonnes pratiques.....	28
Conclusion	29
Références.....	30
Annexe 1 : Démarche bibliographique.....	32
Annexe 2 : Pureté du silicium	33
Annexe 3 : Principe d'une analyse du cycle de vie	34



Résumé

Ce document est une synthèse portant sur la fabrication des modules photovoltaïques au silicium cristallin et l'impact environnemental des systèmes raccordés au réseau. Les résultats sont tirés d'études scientifiques dont des analyses du cycle de vie [19], [20].

Les procédés de fabrication décrits sont la réduction carbothermique de la silice dans un four à arc, le raffinage du silicium solaire par procédé Siemens (voie gazeuse chlorée), la cristallisation du silicium en lingots et la découpe des plaques, la fabrication des cellules photovoltaïques par dopage, polarisation et traitement anti-reflet, l'assemblage des modules par encapsulation dans un feuilleté verre/EVA/Tedlar®, et enfin l'installation du système comprenant câblage et onduleurs.

Les analyses du cycle de vie vont de l'extraction du quartz à la production d'électricité 30 ans durant, hors fin de vie des systèmes, avec un remplacement d'onduleurs. Le mix énergétique de la fabrication est de type UCTE région Europe de l'Ouest.

La fabrication nous révèle une consommation de silicium de 10 à 15 g/Wc, des éléments toxiques présents à l'état de traces (Pb, Br, B, P), l'utilisation de métal aux ressources limitées (Ag), et une dépense énergétique conséquente due à l'aluminium et au silicium (40%). Elle occasionne la génération de rejets chlorés, de boues chargées en silicium et de gaz et d'effluents provenant de l'utilisation de produits chimiques.

Les résultats de l'analyse du cycle de vie sont que l'énergie est l'impact majeur, avec environ 30000 MJ d'énergie primaire par kWc, soit 2500 kWh d'énergie finale. Pour caractériser les effets sur l'environnement d'un système photovoltaïque, les indicateurs pertinents sont le temps de retour énergétique, qui est d'environ 3 ans, et l'effet de serre, qui est d'environ 70 g de CO₂-eq/kWh, ceci pour la France.

Les avancées technologiques identifiées qui permettent de réduire ces impacts concernent la production de silicium solaire avec l'utilisation d'un réacteur à lit fluidisé au lieu d'un réacteur Siemens ou la voie métallurgique (Elkem Solar). Les recommandations de mise en œuvre sont de privilégier des modules sans cadre aluminium et d'installer les systèmes dans les règles de l'art afin d'optimiser leur production (orientation, inclinaison, ombrages, ventilation, onduleur performant, suivi de la production etc...). L'étape suivante sera la mise en place d'une filière de recyclage.



Liste des abréviations

- ACV** : Analyse du Cycle de Vie
- a-Si** : silicium amorphe
- CdTe** : Tellure de Cadmium
- CIGS** : Cuivre Indium Gallium Sélénium
- c-Si** : cristalline Silicon (silicium cristallin massif, par opposition à silicium amorphe).
- EF** : Energie Finale
- EP** : Energie Primaire
- EPDM** : Terpolymère d'éthylène-propylène
- EVA** : Ethylène-Vinyl Acétate
- KWc** : kilowatt-crête, unité pour caractériser la puissance délivrée par un module PV sous un ensoleillement standard de 1 kW/m², (kilowatt-peak ou kWp en anglais).
- mc-Si** : multicristalline siliconi (silicium multicristallin)
- MG-Si** : Metallurgical-Grade Silicon (silicium de grade métallurgique)
obtenu à partir de la silice par des procédés métallurgiques.
pureté de 98 à 99%, soit un taux d'impuretés d'environ 15000 ppm.
- PET** : PolyEthylène Téréphtalate
- Poly-Si**: PolySilicon (polysilicium ou silicium polycristallin)
obtenu à partir de MG-Si par des procédés chimiques (typiquement Siemens). Utilisé pour la cristallisation des lingots.
Pureté de 99,9999%, soit un taux d'impuretés d'environ 1 ppm.
Appellation abusivement utilisée pour désigner le silicium multicristallin.
- PV** : photovoltaïque
- PVF** : PolyFluorure de vinyle
- sc-Si** : Single Crystalline Silicon (silicium monocristallin)
- SoG-Si** : Solar-Grade Silicon (silicium de grade solaire)
Nom du Poly-Si spécifique à la filière solaire (par opposition à la filière électronique).
obtenu à partir de MG-Si par des procédés chimiques ou métallurgiques, ou directement à partir de silice très propre, ou de UMG-Si. Utilisé pour la cristallisation des lingots.
Pureté de 99,9999%, soit un taux d'impuretés d'environ 1 ppm. De qualité moindre que le Poly-Si destiné à la filière électronique.
- TPE** : ThermoPlastique Elastomère
- UMG-Si**: Upgraded Metallurgical-Grade Silicon (silicium de grade métallurgique amélioré)
obtenu à partir de la silice par des procédés métallurgiques successifs. Est utilisé à la place du Poly-Si ou en mélange avec celui-ci.
Pureté supérieure à celle du MG-Si et inférieure à celle du poly-Si. Présente des niveaux de dopants élevés.



Introduction

Alors que la production d'électricité à base de systèmes photovoltaïques connaît une nette progression en France suite à la mise en place de tarifs d'achat de l'énergie photovoltaïque, il est légitime de se poser la question du caractère «écologique» de ce mode production d'électricité. L'électricité produite par les systèmes photovoltaïques est elle aussi propre qu'on pourrait le penser ? Derrière ce matériel aux allures high-tech, n'y a t'il pas une industrie polluante et gourmande en énergie, à l'instar de l'industrie électronique ? Cette synthèse a pour objectif de faire le point sur ces questions.

Les travaux de recherche sur ce sujet sont peu nombreux, mais suffisamment documentés pour apporter les éléments de réponse attendus. Ce document est une synthèse de différentes publications, dont les auteurs ont été identifiés lors de la démarche bibliographique présentée en annexe. Il s'agit d'Erik Alsema de l'université d'Utrecht (NL), Mariska de Wild-Scholten de l'Energy Research Center of the Netherlands (NL), Niels Jungbluth d'ESU-services (CH) et Vasilis Fthenakis du Brookhaven National Laboratory (US).

Les résultats présentés concernent les systèmes photovoltaïques à base de silicium cristallin, de l'extraction du sable à la génération d'électricité, et raccordés au réseau. Sont exclus de cette étude la fin de vie et le recyclage des systèmes ainsi que les technologies en couches minces (Si amorphe, CdTe, CIS, triple jonction etc...).

Afin de bien comprendre les impacts sur l'environnement qu'occasionnent les systèmes photovoltaïques, il était nécessaire de présenter leur processus de fabrication: c'est l'objet de la partie 1. On y retrouve les étapes suivantes:

- Etape 1** Elaboration du silicium de grade solaire à partir du silicium métallurgique, lui-même obtenu à partir de quartz.
- Etape 2** Cristallisation de ce silicium solaire pour former des plaques.
- Etape 3** Transformation de ce silicium cristallisé en composant actif pour devenir une cellule photovoltaïque.
- Etape 4** Assemblage des cellules photovoltaïques en module photovoltaïque.
- Etape 5** Groupement de plusieurs modules pour réaliser un système photovoltaïque intégré en toiture comprenant également une structure porteuse, des composants électroniques et électriques.

L'étape 6 serait logiquement la fin de vie du système, mais elle n'est pas traitée dans cette étude.



La figure 1 présente l'enchaînement de ces étapes, de même qu'elle pose les limites du système étudié dans l'analyse du cycle de vie.

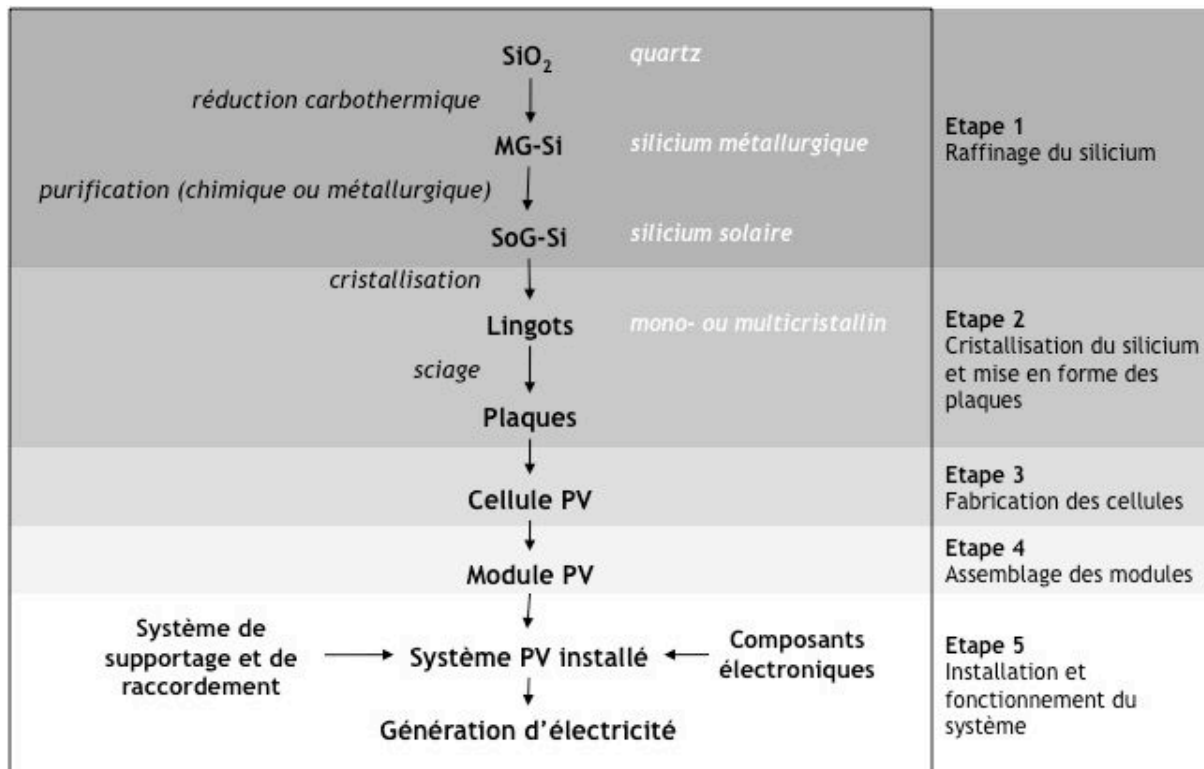


Figure1 : Limites du système pour l'analyse du cycle de vie

La partie 2 traite de l'impact environnemental associé à ces systèmes photovoltaïques, et s'appuie en grande partie sur les analyses du cycle de vie réalisées par Erik A. Alsema et Mariska J. de Wild-Scholten. Après un bref rappel de la méthodologie de l'ACV sont précisées les hypothèses des différents travaux référencés. Les données d'inventaire sont ensuite détaillées afin de mettre en lumière l'origine des impacts. Enfin sont présentés les indicateurs chiffrés résultant des ACV.

En annexe sont présentés la démarche bibliographique, les notions de pureté et de qualité du silicium et le principe d'une analyse du cycle de vie.

Partie 1 : Processus de fabrication des systèmes photovoltaïques

Etant donné que le fonctionnement d'un capteur photovoltaïque ne génère pas de nuisance particulière, les impacts environnementaux se situent nécessairement en amont de la chaîne, au moment de la fabrication, et en fin de vie lors du démontage. Il est donc utile de connaître les techniques de fabrication afin de bien identifier d'où proviennent et comment sont utilisés les différents flux de matières et d'énergie mis en jeu. Cette partie déroule les étapes de fabrication d'un processus standard, c'est-à-dire le plus établi, chaque industriel développant bien entendu ses propres variantes.

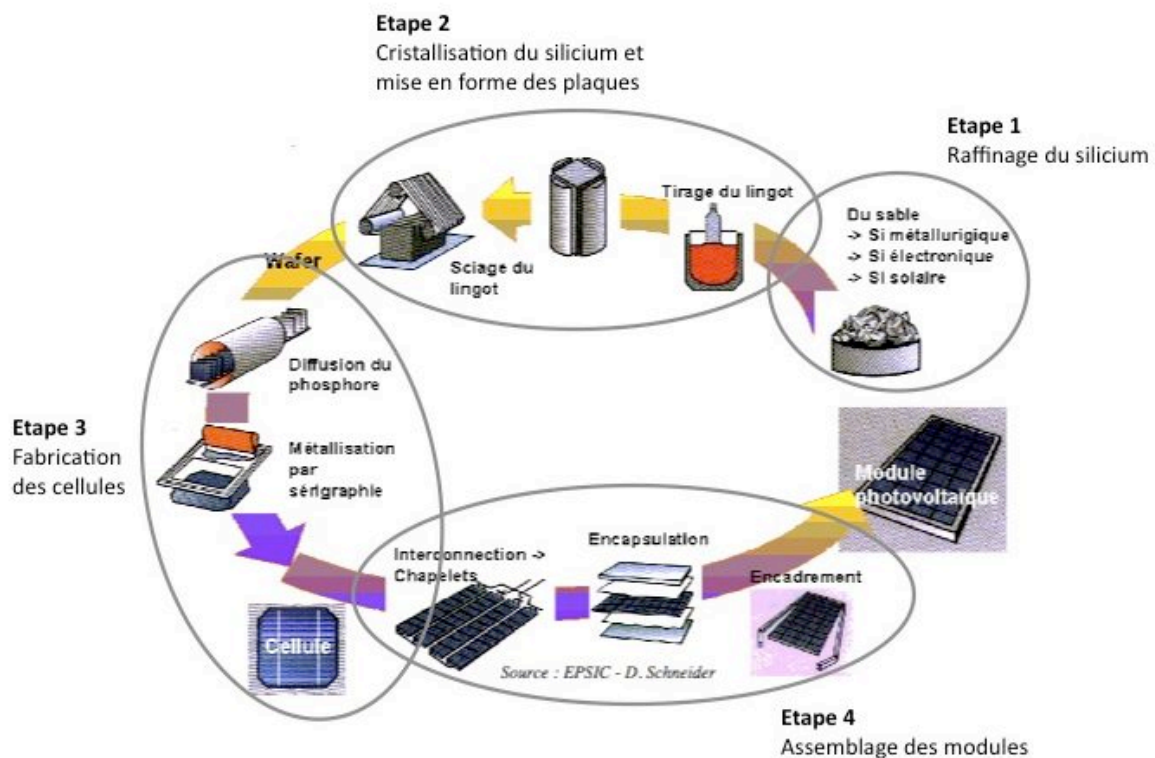


Figure 2 : Enchaînement des étapes de fabrication d'un module photovoltaïque au silicium cristallin

Comme on le voit sur la figure 2, un certain nombre d'étapes est nécessaire pour passer du quartz au module photovoltaïque fini. Le raffinage du silicium se fait en deux phases : tout d'abord l'extraction du silicium du minerai de quartz, puis la purification de ce silicium par diverses techniques. Une fois purifié, il sera mis sous forme de plaques et rendu actif par une succession de traitements spécifiques. Les cellules photovoltaïques seront alors assemblées et montées dans des modules.



1 Etape 1 : Raffinage du silicium

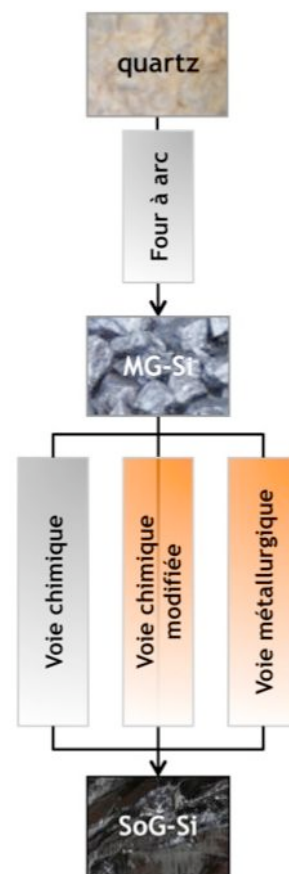
En 2006, 93% du marché photovoltaïque était encore basé sur les technologies silicium (multicristallin, monocristallin et ruban).

Sur la base d'un besoin de 15t/MW, l'industrie photovoltaïque consommerait chaque année environ 40000 tonnes de silicium pour produire 5GW de panneaux photovoltaïques dont 90% à base de silicium. D'après l'US Geographical Survey, la production de silicium au niveau mondial a été d'environ 5 millions de tonnes en 2007 : la part de l'industrie photovoltaïque représente donc un peu moins de 1% de la production mondiale.

L'obtention de ce matériau arrive en fin d'un processus de raffinage que l'on peut séparer en deux grandes étapes [1].

La transformation du quartz en silicium de grade métallurgique ou MG-Si est réalisée dans un four à arc, outil typique de l'industrie métallurgique. La pureté du MG-Si est de l'ordre de 98 à 99%.

La deuxième transformation est une purification du silicium métal en silicium de grade solaire ou SoG-Si, d'une pureté de 99,9999%. La route traditionnelle, héritée de l'électronique, utilise des réacteurs chimiques pour synthétiser le silicium polycristallin ou poly-Si. De toute la chaîne de production des modules photovoltaïques, c'est l'étape la plus consommatrice en énergie. En raison du coût de cette étape et du fait qu'une pureté moindre peut-être tolérée, des techniques pour produire le silicium solaire à partir de nouveaux procédés chimiques mais aussi métallurgiques sont explorées.

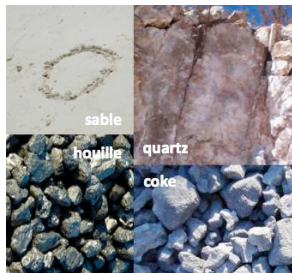


1.1. De la silice au silicium métallurgique

Le silicium, deuxième élément de la croûte terrestre, est obtenu à partir de silice ou oxyde de silicium SiO_2 contenu dans le quartz ou le sable, dont les réserves planétaires sont abondantes.

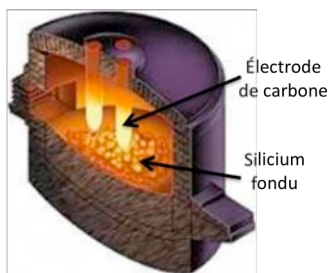
Le silicium métal, environ 20% de la production mondiale de silicium, est utilisé principalement par l'industrie chimique et celle de l'aluminium pour les silicones et les alliages métalliques. Pour la filière solaire, il servira à la fabrication du silicium de qualité solaire. Les principaux fabricants sont Grupo Ferroatlantica SL, Globe Specialty Metals Inc., Elkem AS, Dow Corning Corp. et AMG Advanced Metallurgical Group NV [2].

- **Elaboration du silicium métallurgique**



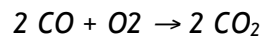
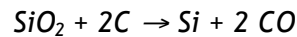
Matières premières

Le silicium métallurgique (MG-Si) résulte de la transformation de la silice dont on a extrait l'oxygène. Cette réaction, appelée réduction carbothermique, consiste à porter à des températures très élevées un mélange de quartz et d'espèces carbonées (réducteurs du type coke, houille et bois), qui vont se combiner avec l'oxygène du quartz pour donner du monoxyde puis du dioxyde de carbone. Le bois permet aussi d'espacer les matériaux.



Four à arc

Réduction de la silice par le carbone à 1700 °C



L'énergie nécessaire à la réaction est apportée sous forme d'arc électrique par des électrodes en graphite, à l'intérieur de fours métallurgiques dits fours à arc.



Silicium métal en fusion

Le silicium en fusion ainsi obtenu est récupéré dans des « poches », oxygéné par insufflation d'air pour former des oxydes de calcium et d'aluminium qui vont être extraits par séparation du laitier (phase contenant des oxydes métalliques, silicates, aluminates et chaux, formés lors de la fusion). Le silicium est ensuite mis en forme par refroidissement et moulage en lingotières. Plusieurs étapes de concassage et de broyage permettent ensuite d'obtenir des billes de MG-Si de 2-3 mm de diamètre. Un autre procédé est la granulation à l'eau.



Silicium métallurgique

La pureté finale du silicium de qualité métallurgique est de 98 à 99%, soit un taux d'impuretés d'environ 15000 ppm (Fe, Ca, Mg, Al, C, O, V, Cr, Mn...), avec comme contrainte des teneurs en bore et phosphore de l'ordre de 20 à 500 ppm.

Ce procédé est très énergivore, puisqu'il faut environ 14 kWh électriques pour produire 1 kg de MG-Si. Les émissions de CO₂ sont elles aussi très élevées : il faut compter un peu plus de 3.14 tonnes de CO₂ rejetés pour 1 tonne de MG-Si produit, hors CO₂ équivalent provenant de la consommation électrique. La mise en place, dans le futur, de quotas d'émissions de CO₂ pourra donc être une contrainte importante pour ce procédé.

D'autres procédés de production du silicium métallurgique ont été développés. Il existe notamment la réduction aluminothermique, qui consiste à extraire l'oxygène de la silice avec de l'aluminium. Elle présente l'avantage d'une faible consommation d'énergie car elle est fortement exothermique.

1.2. Du silicium métallurgique au silicium solaire

Le silicium solaire (SoG-Si), ou silicium polycristallin (poly-Si) plus connu dans la filière électronique, est obtenu par la purification du silicium métallurgique et servira à la confection des lingots de silicium.

Il existe différents procédés de production de silicium de qualité solaire que l'on peut classer en deux grandes familles : la voie chimique et la voie métallurgique. Actuellement, la voie chimique occupe la quasi-totalité du marché avec deux procédés majoritaires à partir de trichlorosilane (75%) et de monosilane (25%). Elle nécessite une plus grande consommation d'énergie que la voie métallurgique, et présente l'inconvénient de la dangerosité liée à l'utilisation de produits chlorés. Elle permet d'obtenir un matériau d'une plus grande pureté, un des objectifs de la filière électronique pour laquelle elle a historiquement été développée.

- **Voie chimique : procédé Siemens**

Cette famille de procédés est basée sur la forte attraction de l'atome de silicium Si pour les ions chlorures Cl⁻. Ils consistent à synthétiser des composés gazeux contenant du silicium, généralement des chlorosilanes, à les purifier par distillation puis à déposer le silicium polycristallin par décomposition thermique. Les principales variantes sont les routes trichlorosilane, monosilane et tétrachlorosilane [3].

Cette voie génère d'importants volumes de déchets chlorés et nécessite d'opérer sur des sites à grande capacité industrielle soumis à des exigences réglementaires sévères (sites Seveso en UE). Plusieurs types de recyclage peuvent être mis en place, ils concernent les produits chimiques chlorés, l'hydrogène et la chaleur.

Détail du procédé Siemens

Le procédé Siemens s'opère en trois étapes et génère un dégagement gazeux de trichlorosilane SiHCl₃. Son rendement est de 25%, pour une consommation énergétique d'environ 150 KWh EF/kg. C'est le procédé utilisé historiquement pour l'industrie électronique.

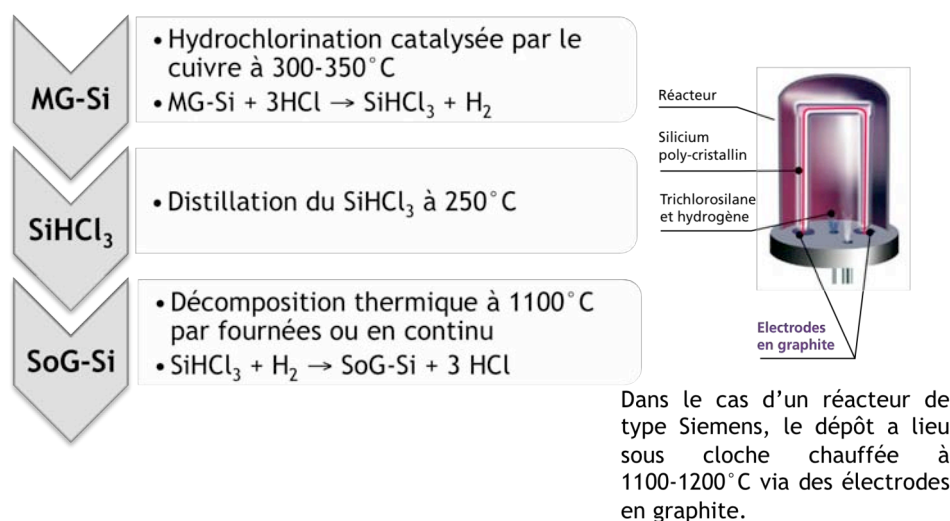


Figure 3 : Procédé Siemens [25]



HESPUL



Dans le procédé Siemens modifié, le dépôt est réalisé en continu dans un réacteur à lit fluidisé. Les grains de silicium sont formés sur des particules de silicium précurseur en suspension dans un mélange gazeux silane/hydrogène à 600-800°C, et sont récupérés par gravité en bas du réacteur. Cette dernière option présente l'avantage d'une consommation énergétique et d'un temps de dépôt réduits. Cette technique, initialement exclusive au monosilane, a été appliquée aux dépôts de silicium à base de trichlorosilane.

Autres procédés chimiques

Il existe d'autres procédés de purification par voie chimique utilisant le chlore et qui diffèrent par quelques variantes [4]. Dans tous les cas, la première étape consiste à séparer le Si des impuretés métalliques en faisant réagir le MG-Si broyé avec du chlore Cl_2 ou du chlorure d'hydrogène HCl . A partir de cette interaction se forment des chlorosilanes de type $SiHCl_3$ ou $SiCl_4$ et des complexes chloro-métalliques comme $FeCl_3$, $AlCl_3$, BCl_3 faciles à éliminer. Les étapes suivantes permettent d'obtenir du Si pur à partir des silanes chlorés par des méthodes de distillation, d'échange d'ions en sels fondus ou de pyrolyse selon les procédés. La route silane, la deuxième la plus répandue, met en œuvre la distillation triple du trichlorosilane pour synthétiser du monosilane SiH_4 dont le silicium est ensuite déposé par décomposition thermique. On peut citer aussi les procédés Wacker, Sundermayer, Chisso Corp. ou Bayer. Les sociétés qui cherchent actuellement à modifier la traditionnelle route chimique pour adapter le produit à la demande travaillent sur le réacteur de dépôt de silicium (dernière étape du process). C'est le cas pour les sociétés Wacker, REC Silicon, MEMC, Solar Grade Silicon et Hemlock qui basculent sur la technologie à lit fluidisé en remplacement du réacteur Siemens. D'autres types de réacteurs sont aussi en cours de test, notamment le réacteur à espace libre de Joint Solar Silicon et le réacteur à filament modifié de Tokuyama.

- **Voie métallurgique : procédé Elkem**

Tout l'enjeu de la voie métallurgique est de diminuer les coûts de production tout en garantissant une qualité suffisante pour les applications solaires. Plusieurs industriels et centres de recherche développent actuellement des procédés qui permettent de s'affranchir du passage par les composés gazeux, dans le but de réaliser une économie d'énergie. Les procédés métallurgiques consistent traditionnellement en une série de fusion et solidification successives permettant d'éliminer progressivement les impuretés. Selon les cas, des techniques particulières peuvent être employées.

Entre autres exemples, le projet européen SolSilc a réuni des laboratoires de recherche et des industriels de Suède, Norvège et des Pays-Bas autour de l'amélioration du procédé de réduction carbothermique à partir de matériaux très propres (quartz de haute pureté et noir de carbone) : le silicium solaire est cette fois obtenu directement à partir de quartz.

Le projet PhotoSil, porté par la société française Apollon Solar, rassemble les compétences du CEA-Liten, du CNRS et de FerroPem. Le procédé consiste à réaliser une première fusion-solidification permettant de faire ségréger les impuretés métalliques beaucoup moins solubles dans le solide que dans le liquide ; les impuretés restantes (en particulier le bore) sont extraites ensuite par traitement du liquide avec un plasma réactif conduisant à la formation de composés volatils. Le développement a été validé début 2008 sur des lots de plus de 50 kg, et les rendements sur cellules ont été mesurés à 15% fin 2008.

D'autres sociétés travaillent sur l'approche métallurgique: Kawasaki Steel , Dow Corning...



Détail du procédé Elkem

La société la plus avancée est Elkem Solar (Norvège), qui a développé un procédé actuellement en cours d'industrialisation [7], [10]. Le démarrage de l'usine est prévu pour 2010. Il consiste [5] en un traitement du silicium métallurgique par un laitier de silicate de calcium à haute température suivi d'un lessivage chimique à basse température. Les impuretés résiduelles sont collectées sur le dessus du lingot obtenu après une solidification directionnelle. Les blocs éliminés sont ensuite réintroduits en amont dans le procédé. Les premières études montrent que la qualité du silicium solaire obtenu est similaire à celle du silicium polycristallin commercialisé provenant de la voie traditionnelle Siemens [6]. Le rendement sur cellules est lui aussi dans les spécifications, autour de 15-16% [9].



Figure 4 : Procédé Elkem

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 [8].

- **Autres voies**

Il existe encore d'autres voies de production du silicium solaire en cours de développement. On peut citer la fusion dans un faisceau électronique, le lessivage après réduction aluminothermique, l'électro-transport dans un champ magnétique, la voie électrochimique... et quelques initiatives comme la dissociation de nitrure de silicium dans un four solaire ou l'utilisation de paille de riz comme source de silice.

2 Fabrication des plaques, cellules et modules photovoltaïques

A ce stade de la fabrication sont mis en jeu des savoir-faire propres à l'industrie photovoltaïque [26].



Le silicium solaire ou polycristallin va être encore une fois fondu et resolidifié en lingots ou ruban dans lesquels seront découpés les plaques de silicium. Ces plaques subiront quant à elles des transformations qui leur permettront de convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique. Puis elles seront reliées entre elles et protégées des intempéries dans un module photovoltaïque. La fabrication des autres composants d'un système, à savoir le matériel électrique comme les câbles et les onduleurs, ne sera pas détaillée.

2.1. Etape 2 : Cristallisation du silicium et mise en forme des plaques

Ce sont les dernières étapes de transformation du silicium avant la fabrication de la cellule photovoltaïque proprement dite. Le silicium va être purifié encore une fois, dopé uniformément et découpé en plaques une fois refroidi. La technique de cristallisation consiste à solidifier progressivement le silicium polycristallin fondu de manière contrôlée. C'est dans la charge de silicium en fusion que sera ajouté l'élément dopant, généralement du bore qui donne un dopage de type p. Le matériau présente au final un réseau cristallin, qui est un arrangement ordonné des atomes de silicium.

Note : le silicium multicristallin, résultant de la cristallisation contrôlée du silicium polycristallin, est souvent nommé polycristallin lorsqu'il s'agit de modules.

L'élimination des impuretés se fait par ségrégation. Plus solubles en phase liquide que solide, les impuretés vont migrer vers les zones se solidifiant en dernier. Dans le cas d'un refroidissement pas le bas, elles vont se concentrer sur le haut du lingot.

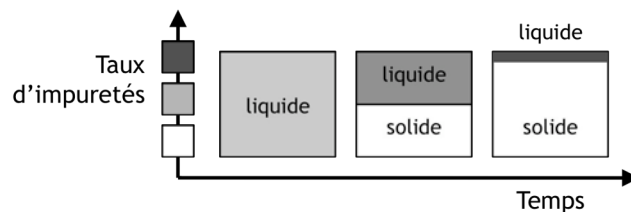


Figure 5 : Mécanisme de ségrégation des impuretés lors de la cristallisation

En termes d'impuretés, on peut en distinguer:
 les métaux : Fe, Cr et Mn pour les plus gênants
 les dopants : B, Ga, Al, As et P
 l'oxygène O, le carbone C et l'azote N.

Toutes dégradent à leur manière les performances de la cellule, généralement en formant des complexes qui réduisent la conductivité du matériau.

Pour la cristallisation, trois grandes voies sont possibles selon le choix technologique fait par le fabricant [13]. Le tirage Czochralski donne des lingots cylindriques de silicium monocristallin ou sc-Si, la solidification directionnelle donne des briques de silicium multicristallin ou mc-Si et les techniques de tirage de ruban donne du silicium multicristallin en ruban.

- Silicium monocristallin (sc-Si)

Ce matériau est constitué d'un seul cristal, sa couleur est unie, grise. Il est obtenu par croissance ou étirage d'un lingot cylindrique à partir d'un monocristal « souche » selon le procédé Czochralski ou CZ. Les cellules finales ont un des meilleurs rendements, autour de 15%, la contrepartie est une plus grande dépense énergétique pour sa mise en forme.

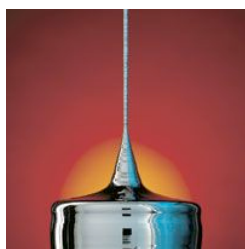
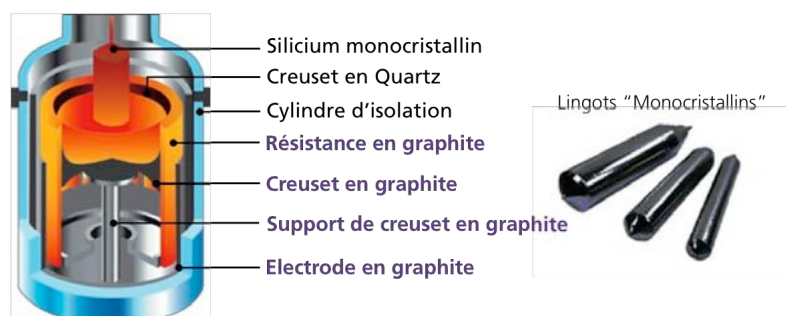


Figure 6 : Tirage des lingots





- **Silicium multicristallin (mc-Si)**

Ce matériau de couleur grise est constitué d'une mosaïque de cristaux monocristallins de silicium, d'orientation et de tailles différentes. Il est obtenu par coulage en lingotière dans laquelle s'opère un refroidissement lent, de l'ordre de quelques dizaines d'heures. Sa mise au point est moins énergivore, et le rendement final des cellules est d'environ 12%.

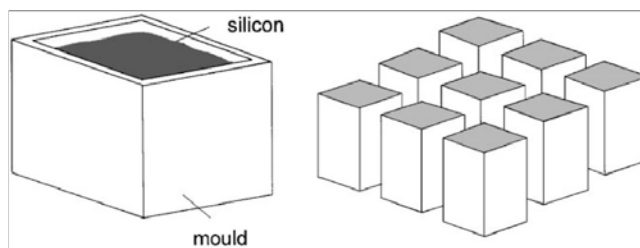


Figure 7 : Mise en forme des lingots de silicium multicristallin [11]

Sciage des plaques



Les lingots monocristallins et les briques multicristallines sont ensuite découpés en tranches par une scie à fil, à une épaisseur d'environ 250 μm . L'opération est réalisée en présence de slurry, une solution organique contenant des abrasifs en suspension. Il faut souligner une perte importante de matériau lors du sciage (30 à 40% non recyclé).

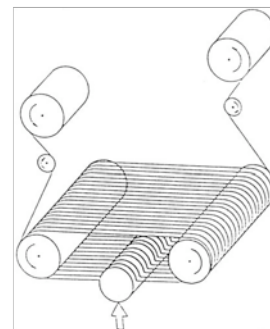


Figure 8 : Plaques de silicium cristallin et scie à fil [12], [26]

- **Silicium multicristallin en ruban**

Cette dernière option technologique combine les étapes de cristallisation et de mise en forme du silicium, et présente l'avantage de minimiser la perte matière. Il est obtenu par entraînement d'un ruban de silicium sur un support plan ou tubulaire à partir d'un bain de silicium fondu.

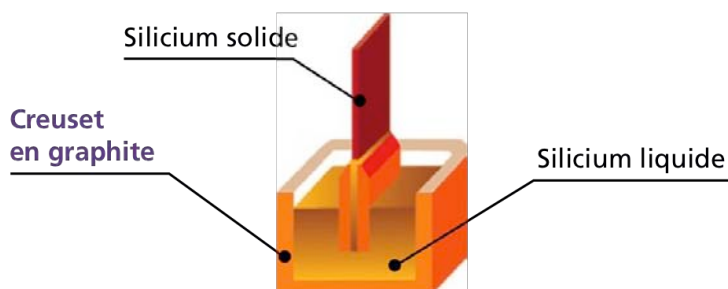


Figure 9 : Etirage d'un ruban de silicium [25]

2.2. Etape 3 : Fabrication des cellules

La particularité des cellules au silicium réside dans le fait que le substrat et l'élément actif sont un seul et même matériau, ceci grâce au coût raisonnable du silicium par rapport aux autres matériaux semiconducteurs. Une fois les plaques découpées vient la fabrication des cellules, qui va permettre d'exploiter les propriétés de semiconducteur du silicium et de transformer l'énergie lumineuse captée en énergie électrique.

- Principe de fonctionnement d'une cellule au silicium cristallin

Un matériau semiconducteur est isolant dans des conditions normales, et devient conducteur électrique lorsqu'on lui apporte de l'énergie. Cette énergie permet aux électrons de se détacher des noyaux des atomes et de se déplacer librement dans la structure du matériau. Lorsque cette énergie est apportée sous forme lumineuse, ce sont des « grains » de lumière appelés photons qui cèdent leur énergie aux électrons. On parle alors d'effet photoélectrique. Le principe d'une cellule photovoltaïque est d'exploiter ce déplacement d'électrons pour le convertir en un courant électrique utilisable. Pour cela, on attire les électrons hors du matériau via une électrode de collecte reliée à un circuit électrique extérieur.

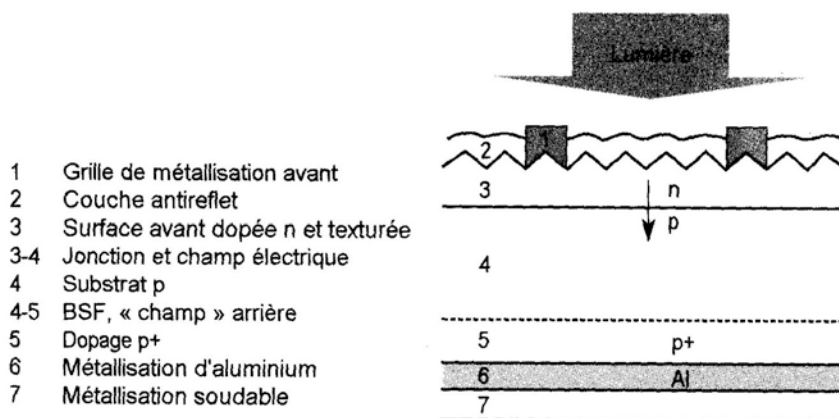


Figure 10 : Empilement des couches d'une cellule photovoltaïque au silicium cristallin [14]

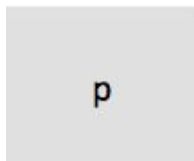
Toute l'astuce réside dans le fait de forcer les électrons à s'écouler dans l'électrode plutôt que de se recombiner avec des atomes chargés positivement au sein du matériau. Cela nécessite la présence d'un champ électrique permanent interne au matériau. Pour cela, on crée deux zones : une zone p chargée positivement et une zone n chargée négativement, qui vont former une jonction p-n. Cette jonction assure la fonction de diode en ne permettant le passage du courant que dans un sens, et oriente de ce fait le déplacement des électrons.

- Enchaînement des étapes de fabrication

Chaque fabricant développe sa propre chaîne de production, qui dépend de ses choix technologiques et économiques. L'enchaînement des étapes ci-dessous représente un procédé industriel standard auquel il faudra ajouter les sous-étapes de transport, nettoyage et mesure [5], [7], [11], [15], [16], [17].



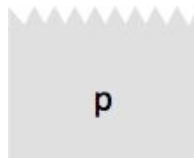
Décapage



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 CH_3COOH et d'acide nitrique HNO_3

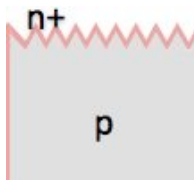
Texturation



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. On parle aussi de confinement optique.

- Gravure sélective par un bain alcalin de soude NaOH ou de potasse KOH avec des additifs organiques du type alcool isopropylique IPA

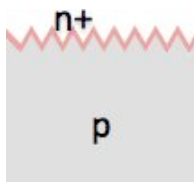
Dopage



La zone dopée n est formée par diffusion de phosphore: couche n+ en surface et n à la jonction.

- Diffusion thermique de phosphore P 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
- Retrait de la couche résiduelle de silicate de phosphore dans un bain d'acide fluorhydrique HF

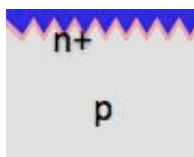
Bords de plaque



La couche n+ est retirée des bords de plaque (sur la tranche) pour séparer l'émetteur de la face arrière.

- Gravure plasma avec un mélange gazeux tétrafluorométhane CF_4 et oxygène O_2 soumis à un champ de radiofréquences

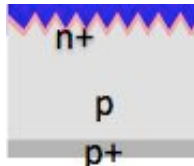
Anti-reflet



Une couche anti-reflet à base d'oxydes ou de niture 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.

- Dépôt chimique 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

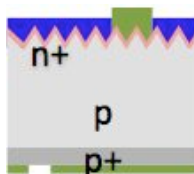
Champ face arrière



La face arrière est dopée p+ par diffusion d'aluminium. Cette couche joue aussi un rôle de conducteur ohmique avec l'électrode arrière.

- Diffusion thermique d'aluminium Al 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 +)

- Sérigraphie d'argent en face avant et d'aluminium en face arrière par frittage de pâtes métalliques

Test et tri

Les cellules sont mesurées électriquement puis triées selon leur caractéristique afin d'optimiser leur association ultérieure.

Il existe bien entendu de nombreuses variantes pour chacune de ces étapes, qui dépendent fortement des équipements de production sélectionnés par le fabricant. Certains bains chimiques peuvent aussi être remplacés par des gaz fluorés lorsqu'il s'agit de graver la matière (texturation, retrait d'une couche, nettoyage des parois d'un réacteur...). On trouve aussi des procédés laser pour l'isolation des bords de plaques. Dans tous les cas, la tendance actuelle est à l'augmentation du nombre d'étapes.

2.3. Etape 4 : Assemblage des modules

La fonction des modules est de protéger les cellules du milieu extérieur et de faciliter leur mise en œuvre, tout en limitant le plus possible les pertes optiques et les baisses de rendement dues à l'échauffement des cellules en fonctionnement.



Figure 11 : Assemblage des modules photovoltaïques



Partie 2 : Impact environnemental des systèmes photovoltaïques

Autant la production d'électricité photovoltaïque n'occasionne pas de pollution particulière, autant la fabrication des modules est un processus industriel qui n'est pas neutre vis-à-vis de l'environnement. La prise en compte de ces impacts à tous les stades de la vie d'un produit peut être effectuée à l'aide d'une analyse du cycle de vie. Cette méthode présente en outre l'avantage d'être normée et de pouvoir comparer des produits à fonctionnalité équivalente (cf annexe 3).

Dans cette partie seront précisés le type de systèmes étudiés ainsi que les hypothèses de travail. On y retrouvera aussi le détail des quantités de matières et d'énergie utilisés pour la fabrication dans la partie inventaire. Enfin seront présentés les résultats formels de l'ACV et les conclusions qui en découlent.

Sachant qu'en 2008, la part de marché du silicium cristallin se maintenait à plus de 89% (source : « Solar Generation V », EPIA/Greenpeace) et que la croissance annuelle du marché mondial de silicium solaire est de 30 à 35%, on peut considérer que ces résultats sont représentatifs de la filière de production des systèmes photovoltaïques.

1 Contexte et périmètre des études

Les résultats d'ACV présentés ici proviennent en grande partie des travaux d'Erik A. Alsema, Mariska J. de Wild-Scholten et Niels Jungbluth. Ces chercheurs ont réalisé les études les plus complètes sur le silicium cristallin pour l'Europe et la Suisse, mettant à jour la base de données Ecoinvent avec des valeurs provenant directement des lignes de fabrication [21]. Les ordres de grandeur sont cohérents avec la littérature publiée sur le sujet.

Le centre de recherche sur l'énergie des Pays-Bas (ECN : Energy Research Center of the Netherlands) soutient des travaux de recherche sur l'impact environnemental de l'énergie photovoltaïque qui se concrétisent par des analyses de cycle de vie. Les chercheurs Erik A. Alsema et Mariska J. de Wild-Scholten ont entrepris l'inventaire de cycle de vie des systèmes photovoltaïques au silicium cristallin, dont trois versions sont disponibles : deux pour le statut 2004 (modules PV) et une pour le statut 2005/2006 (structures et équipements électriques). Une grande part de cet inventaire a été financée par le projet européen CrystalClear, réalisé en partenariat avec 11 industriels et centres de recherche d'Europe et des Etats-Unis. Les mises à jour ultérieures ont été financées par l'ECN. A partir de ces données ont été élaborées des analyses de cycle de vie, la plus récente ayant été publiée par Niels Jungbluth en 2008 [18] dans le cadre de la mise à jour de la base de données Ecoinvent v2.0, cofinancée par le l'Office Fédéral Suisse de l'Energie et l'Association Européenne de l'Industrie Photovoltaïque (EPIA). Son étude intègre aussi des données d'autres provenances. Des aspects particuliers ont aussi été abordés par l'ECN, comme l'utilisation de gaz à effet de serre pour la fabrication des cellules ou le procédé de raffinage du silicium métallurgique développé par Elkem Solar (M.J. de Wild-Scholten).

Les résultats présentés sont restreints aux modules à base de silicium multicristallin. L'analyse du cycle de vie utilise la base de données Ecoinvent v2.1 et le statut 2005/2006 de l'inventaire du cycle de vie de l'ECN [19], [20].

- Système chaîne de production de systèmes photovoltaïques à base de silicium cristallin
- Limites du système du sable à la production d'électricité (exclu : fin de vie)
- Fonction produire de l'électricité
- Unité fonctionnelle 1 kWc ou 1 kWh
- Flux de référence 1 m² de surface de module
- Installation PV type modules de 60 cellules (mc-Si, 285 μm, 156x156 mm²), rendement 13.2%, feuilleté verre/EVA/tehdar, intégré en toiture, orienté sud, durée de vie 30 ans, 1 remplacement d'onduleur, connexion réseau, PR 0.75
- Mix électrique UCTE sauf pour silicium polycristallin (65% hydro et 45% gaz naturel à cycle combiné)
- Irradiation 1000 et 1700 kWh/m²

Selon l'unité fonctionnelle choisie, les résultats seront exprimés par kWc ou par kWh produit. Dans ce dernier cas, cela fait entrer les notions de durée de vie et de productivité du panneau fonction de la technologie employée et de l'installation (irradiation, orientation, inclinaison, ombrages...).

Note :

le démontage de tous les composants en fin de vie n'a pas été pris en compte, faute de données suffisantes.

2 Données d'inventaire du cycle de vie

2.1. Tableau synthétique

Dans ce tableau sont résumées les quantités d'énergie et de matière utilisées pour la fabrication d'un module photovoltaïque, ainsi que le type de rejets générés. Les ordres de grandeur sont cohérents avec la littérature publiée sur le sujet.

Et.	Energie finale		Matériaux	Consommables	Rejets
	#	kWhe			
1	Raffinage du silicium				
	pour 1 kg de MG-Si (équival. 95 Wc)				
	14		sable : ± 3 kg	Charbon, houille, coke, bois : 2,6 kg Graphite	poussières fines
	pour 1 kg de poly-Si procédé Siemens (équival. 108 Wc)				
Poly-Si	100	51	MG-Si : 1,13 kg	Produits chimiques : 2 kg	produits chlorés
	2 Cristallisation du silicium et mise en forme des plaques				
Plaques	pour 1 m ² de mc-Si à 240 um (équival. 140 Wc)				
	30	1	poly-Si : 1,3 kg	Eau : 65 L Produits chimiques et gaz : 3,7 kg Creuset quartz : 0,4 kg Câble acier, abrasif SiC : 4,1 kg	silicium, slurry, câble, creuset
3	Fabrication des cellules				
	pour 156x156 mm à 285 um (équival. 3,6 Wc)				
Cellules	0,74	0	mc-Si : 1,06 plaque	Eau : 27 L Produits chimiques et gaz : 0,06 kg Polystyrène (emballage) : 10.10 ⁻⁶ kg	gaz à effet de serre, solvants organiques, émissions fluorées, effluents acides et basiques, cellules pv
	4 Assemblage des modules				
Modules	pour 60 cellules (équival. 220 Wc)				
	10,7		61,2 cellules pv Al, boîte jonction, verre, EVA, tedlar, Cu, silicone	Eau : 34 L Solvants organiques : 0,035 kg Carton (emballage) : 1,75 kg	cellules pv, EVA, tedlar

Tableau 1 : Inventaire du cycle de vie simplifié pour des modules au silicium multicristallin

L'eau est utilisée à raison de 1,5 m³/kWc, volume auquel il faut ajouter 6,5 m³ d'eau de refroidissement en boucle.

C'est l'étape de production de poly-Si qui alourdit le bilan énergétique, et notamment le procédé de distillation des chlorosilanes.

Sont intégrés le recyclage interne du silicium provenant des découpes de lingots et des plaques cassées, ainsi que le recyclage du slurry à 80%.

2.2. Energie et matériaux

La figure 12 présente l'inventaire des matériaux présents dans le produit fini et les valeurs d'énergie primaire, qui cumulent l'énergie physiquement dépensée lors des étapes de fabrication ainsi que l'énergie grise des différents matériaux. Les valeurs sont données pour un système de **1 kWc**, qui correspondrait dans le cas présent à 7,6 m² de modules. La centrale de référence ayant servi à établir les valeurs par kWc compte 52 modules de 220 Wc intégrés en toiture, deux onduleurs de 4,6 kW et une structure de montage [19]. Celle-ci permettrait de s'affranchir du cadre du module, mais il est compté ici car son énergie grise n'est pas négligeable et les modules sont généralement commercialisés avec cadre.

Remarque

- ✓ Les valeurs concernant les éléments périphériques au module (structure, câbles et onduleur) sont moins représentatives que les données concernant le silicium. En effet, ces dernières s'appuient sur une moyenne [20] alors que pour le système, elles sont basées sur un type de matériel uniquement.
- ✓ Les connecteurs ne sont pas inclus.

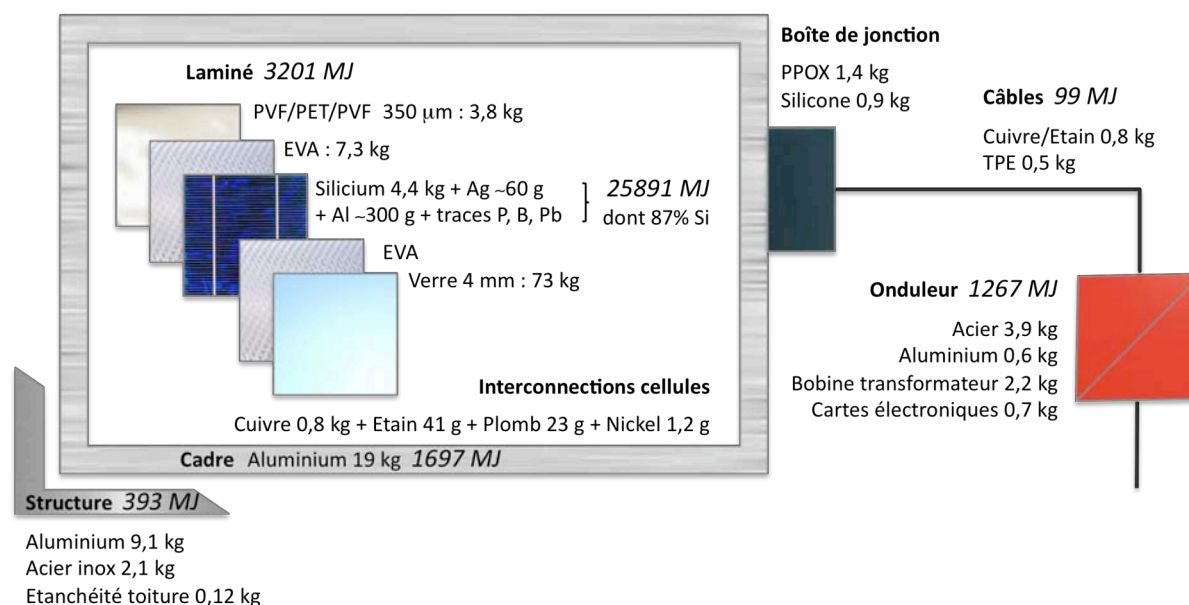


Figure 12 : Energie primaire en MJ et masse des différents constituants d'un système PV de 1 kWc

Les choix du mode d'intégration et d'architecture du système font varier le total.

Note

- ✓ L'énergie primaire est présente dans la nature avant toute transformation, alors que l'énergie finale est l'énergie mesurée au compteur. Pour l'électricité, le rapport utilisé ici pour la conversion entre l'énergie primaire et finale est de 31%, correspondant à la région Europe de l'ouest de l'UCTE (Union pour la Coordination et le Transport de l'Electricité). Cependant, le mix électrique utilisé pour la purification du silicium polycristallin provenait dans ce cas à 65% de centrales hydroélectriques et à 45% de centrales au gaz naturel à cycle combiné. Le facteur de conversion entre énergie finale et primaire est alors de 1 pour l'hydroélectricité et de 0,55 pour l'électricité produite à partir de centrales au gaz naturel à cycle combiné.

Les effets sur l'environnement de la consommation d'énergie sont la diminution des ressources de combustibles fossiles et les émissions atmosphériques provoquant effet de serre et pluies acides.



- **Onduleurs**

Les impacts dus aux onduleurs proviennent en grande partie de l'électronique qu'ils contiennent ainsi que des métaux utilisés pour les boîtiers. Entre 2 et 200 kW, on peut compter en moyenne 10 kg/kW de matériel. Dans le cas présent, les données sont estimées à partir d'un seul modèle relativement ancien comprenant un transformateur à bobine (cuivre). Un modèle plus récent sans transformateur aurait certainement un impact plus important car il contiendrait plus d'électronique.

Ce qui n'apparaît pas directement est la durée de vie de l'onduleur, qui est estimée à 15 ans, soit la moitié de celle du système. Des progrès dans la longévité des équipements électroniques permettraient donc d'améliorer le bilan énergétique.

- **Energie grise**

Parmi ces matériaux, ceux qui nécessitent le plus d'énergie pour leur élaboration sont le silicium et l'aluminium.

Silicium

Le silicium polycristallin est actuellement un enjeu important de réduction de la consommation énergétique avec la multiplication des procédés de production du silicium solaire. A titre comparatif, il faut 60 fois plus d'énergie pour produire du silicium solaire (~1 GJ EP/kg) que du verre (~16 MJ EP/kg).

Aluminium

L'aluminium est présent en petite quantité comme contact arrière des cellules photovoltaïques et en masse dans le cadre, la structure de montage et l'onduleur. La production d'aluminium est très consommatrice en énergie et génère des émissions d'hexafluorure de soufre ou SF₆, gaz à effet de serre à très haut pouvoir réchauffant (coefficient de 22 200 contre 1 pour le CO₂).

- **Substances dangereuses**

On trouve dans le système la présence d'éléments toxiques comme le plomb et le brome.

Plomb

Utilisé comme additif dans les fibres de verre contenues dans les pâtes métalliques servant à former les contacts électriques des cellules et comme additif également dans l'alliage à l'étain utilisé pour les soudures d'interconnexion des cellules. Sa toxicité est à l'origine du saturnisme, maladie qui atteint le système nerveux.

Brome

Présent comme retardateur de flamme dans les matières plastiques de l'onduleur.

- **Autres matériaux**

Enfin, certains matériaux ne présentant pas de toxicité particulière ne sont pas valorisables en fin de vie : plastiques (PVF, PET, PPOX, TPE), silicone, EVA, cartes électroniques, ou présentent des ressources limitées.

EVA (Ethylène Vinyl Acétate)

L'EVA, relativement inerte, rend le démontage des modules particulièrement délicat. Il nécessite un traitement thermique, ce qui occasionne une dépense énergétique et des émissions d'acide acétique.



Tedlar®

Le tedlar est le nom commercial du laminé PVF/PET/PVF développé par Dupont. Le PVF est un polymère fluoré tandis que le PET est un plastique (celui utilisé pour les bouteilles d'eau minérale). Utilisé en sous-face des modules, sa fabrication est plus polluante que celle du verre (317 MJ EP/kg pour le tedlar contre pour le verre) et génère des émissions fluorées lors du recyclage des modules.

Argent

L'argent est le métal qui sert de contact sur la face avant de la cellule photovoltaïque. Il est aussi utilisé pour la métallisation de la face arrière, mais en plus faible quantité car il a été remplacé en quasi-totalité par l'aluminium. Les ressources mondiales en Ag sont limitées et c'est le premier facteur limitant dans la production de panneaux photovoltaïques à grande échelle.

2.3. Produits chimiques et rejets

Le tableau ci-dessous reprend les principaux composés chimiques utilisés lors de la fabrication du silicium polycristallin et des cellules photovoltaïques [22].

La colonne « Dangers » indique le type de risques associés à l'utilisation de ces produits : cette information est uniquement qualitative dans le sens où la concentration des produits n'est pas précisée. L'exposition à ces produits concerne en premier lieu les travailleurs, et leur utilisation requiert le respect des normes de sécurité : ventilation et extraction des vapeurs toxiques ou explosives, gants, lunettes et masques de protection respiratoire, détection de fuites, systèmes détection et d'extinction incendie etc... Pour plus d'information à ce sujet, voir les fiches toxicologiques sur site de l'INRS [27].

	Composés	Dangers	Protection des personnes	Polluants de l'air	Polluants de l'eau	Traitement des rejets
Étape 1. Raffinage du silicium						
silice	SiO ₂	irritant	masque	poussières fines		filtres
acide chlorhydrique	HCl	toxique	extraction, équipements personnels	SiH ₄ , SiHCl ₃ , SiH ₂ Cl ₂	HCl	lavage des gaz, neutralisation des effluents liquides
hydrogène	H ₂	explosif				
trichlorosilane	SiHCl ₃	toxique				
Étape 2. Mise en forme des plaques						
slurry	PEG, SiC	--	--	--	PEG, SiC,	Sté spécialisée
Étape 3. Fabrication des cellules						
acide fluorhydrique	HF	toxique	extraction, équipements personnels de protection	HF	HF	lavage des gaz, neutralisation des effluents liquides
acide acétique	CH ₃ COOH	corrosif		H ⁺	CH ₃ COOH	
acide nitrique	HNO ₃	corrosif		NO _x	HNO ₃	
soude	NaOH	corrosif		NaOH	NaOH	
alcool isopropylique	IPA	irritant		COV	--	
trichlorure de phosphore	POCl ₃	toxique		HCl	--	
tétrafluorure de méthane	CF ₄	effet de serre		HF, SiF ₄ , COF ₂ , CO, F ₂	--	
silane	SiH ₄	pyrophorique		SiO ₂	--	
ammoniac	NH ₃	toxique		NH ₃	--	
fibres de verre	Pb	toxique		Pb	--	
aluminium	Al		Al	--		
argent	Ag		Ag	--		
liant des pâtes métalliques	Solvants org.	irritant		COV	--	condensation et combustion

Tableau 2 : Principaux produits chimiques utilisés pour la fabrication des cellules au silicium cristallin



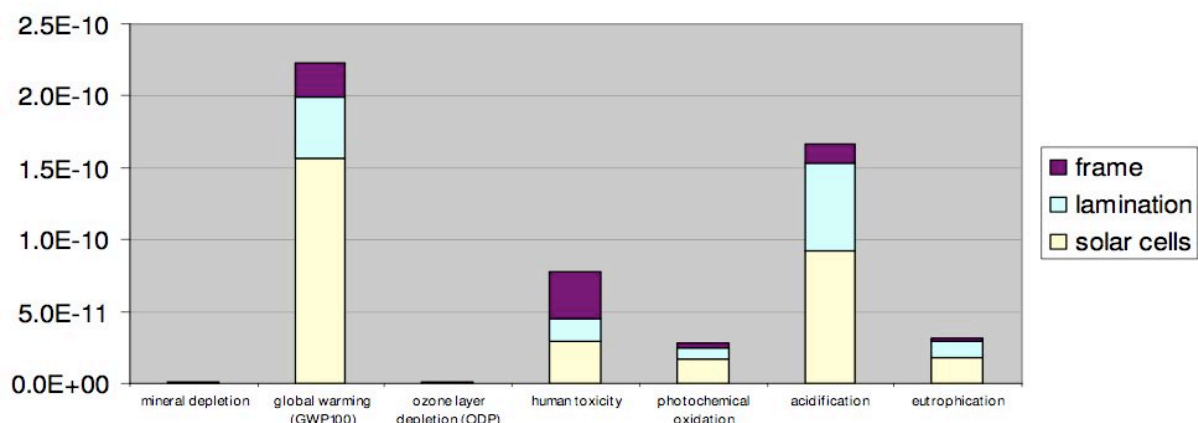
Les deux dernières colonnes listent les principaux polluants présents dans les effluents, liquides ou gazeux.

- ✓ Les acides et bases inorganiques tels HF, HNO₃, HCl, NH₃ et NaOH sont traités par lavage des gaz : les polluants sont absorbés dans de l'eau ajustée en pH lors du passage des vapeurs dans des tours de lavage. S'ensuit un traitement de l'eau classique.
- ✓ Les vapeurs de solvants sont condensées puis brûlées.
- ✓ Les gaz à effet de serre du type CF₄ sont craqués à haute température (>1100° C) afin de les décomposer en éléments qui peuvent être traités dans une tour de lavage. Le traitement de ce type de gaz (non réglementé) commence à se généraliser dans l'industrie photovoltaïque, son taux est estimé à 70%.
- ✓ Le fluide de coupe des plaques, appelé slurry, est un mélange de solvant organique PEG et d'abrasif sous forme de microbilles de carbure de silicium SiC, dont la fabrication est énergivore (~10 MJ EP/kg). Lors du sciage, il se charge de particules de silicium et de fer (provenant de l'acier du câble). La séparation du solvant et des particules est possible à environ 80%, le taux de réutilisation estimé est supérieur à 80%.

3 Résultats de l'analyse du cycle de vie

Une fois que l'inventaire est réalisé, les flux entrants et sortants du système sont agrégés suivant des méthodes standardisées. Leurs effets sont comptabilisés par des points et un score est attribué à chaque impact. Ceux-ci sont définis par la méthode choisie.

La méthode CML 2000 donne par exemple les facteurs normalisés suivants: épuisement des ressources minérales, effet de serre, réduction de la couche d'ozone, toxicité pour l'être humain, oxydation photochimique, acidification et eutrophisation. L'épuisement des ressources fossiles n'apparaît pas sur le schéma pour des raisons d'échelle, mais fait partie



de la méthode.

Figure 13 : Impacts environnementaux de modules au silicium multicristallin normalisés à 1 kWc [23]

L'analyse des impacts amène à la première conclusion que **la consommation d'énergie est l'impact majoritaire** dans le cycle de vie des systèmes photovoltaïques.



L'utilisation de combustibles fossiles est en effet à l'origine de nombreux désordres environnementaux et de dommages sur la santé humaine tels:

- ✓ l'épuisement des ressources fossiles,
- ✓ l'effet de serre,
- ✓ l'émission d'oxydes de soufre et d'azote, résidus de la combustion du charbon et du fioul, provoquant les pluies acides,
- ✓ les dommages respiratoires dus aux émissions de particules et d'oxydes d'azote.

Cette consommation est due au très énergivore procédé de production de silicium. Les modules photovoltaïques étant eux-mêmes des générateurs d'électricité, on peut cependant aisément imaginer un cercle vertueux. Tout dépend en fait du mix énergétique du lieu de production du silicium et des étapes de fabrication ultérieures.

Les résultats peuvent aussi être exprimés sous forme d'indicateurs. Les plus pertinents dans le cas présent sont la demande cumulée en énergie primaire (en MJ/kWc), qui sert à établir le temps de retour énergétique (en années), et l'effet de serre (en kg CO₂/kWh).

3.1. Demande cumulée en énergie primaire

La demande cumulée en énergie primaire est la somme de toutes les dépenses énergétiques affectées au système. Le fait de l'exprimer en énergie primaire permet de prendre en compte les pertes inhérentes au mode de production d'énergie utilisée.

En énergie primaire, la part revenant au raffinage du silicium est de 40%, de 28% pour la cristallisation et la mise en forme des plaques, de 10% pour la fabrication des cellules et de 20% pour le reste (15% module et 6% périphériques). En ordre de grandeur, il faut compter **30 à 35 000 MJ par kWc** pour un système photovoltaïque installé. Exprimé autrement, on comptera environ 2500 kWh d'énergie finale par kWc installé.

La demande cumulée en énergie du silicium de grade solaire obtenu par le procédé Elkem est deux fois plus faible que par la voie conventionnelle chimique. Il en résulte une réduction d'au moins 10% sur un système PV complet.

3.2. Temps de retour énergétique

Le temps de retour énergétique est la durée nécessaire au système photovoltaïque pour produire autant d'énergie qu'il en a fallu pour le construire (calcul en énergie primaire). On peut retenir la valeur de **3 ans** pour une irradiation moyenne en France.

Les différentes études donnent des durées de cet ordre-là.

- Pour 1000 kWh/m²/an et le procédé Siemens traditionnel : 3,3 ans
- Pour 1117 kWh/m² /an (Suisse) et le procédé Siemens modifié : 2,9 ans
- Pour 1000 kWh/m²/an et le procédé Elkem métallurgique : 1.9 ans (avec le mix énergétique norvégien 100% hydraulique).

Les facteurs qui allongent le temps de retour sont, par ordre d'importance : le type d'installation (façade, toiture plate, toiture inclinée), le type de cellules (sc-Si, a-Si, mc-Si, CIS, CdTe, Si ruban), et le type de panneaux (avec ou sans cadre).

- Irradiation

La région d'implantation des systèmes fait beaucoup varier ce résultat. Une simulation a permis de mettre en évidence ce phénomène : des temps de retour inférieurs à 2 ans sont atteignables dans le sud de l'Espagne, en Italie, en Turquie et en Afrique du Nord, tandis que ceux de l'Europe du Nord peuvent être 2 à 3 fois plus longs.



Figure 14 : Temps de retour énergétique de systèmes PV à 90% de silicium cristallin en Europe [18]

La carte ci-dessus illustre la pertinence environnementale d'installer un système PV par rapport au temps de retour énergétique : les régions les plus ensoleillées sont les plus favorables. Cependant, d'autres facteurs entrent en ligne de compte, notamment le mode de production d'électricité auquel le photovoltaïque se substitue.

Si l'on considère l'émission de gaz à effet de serre, le PV sera plus approprié dans les régions où l'électricité est fortement carbonée. On peut exprimer le potentiel de réduction des émissions de CO₂ en tCO₂/kWc. Il indique la quantité de CO₂ qu'aurait émis le parc énergétique national pour produire la même quantité d'électricité pendant la durée de vie du système photovoltaïque, corrigé de la quantité de CO₂ émise pour la fabrication du système. Les pays qui présentent les gisements les plus intéressants sont la Pologne, l'Espagne, l'Italie et la Grèce. Cette dernière pourrait économiser jusqu'à 35 tCO₂/kWc de photovoltaïque installé, contre 2 pour la France.

Si l'on considère la production de déchets radioactifs, le PV sera plus approprié dans les régions où l'électricité est d'origine nucléaire. L'indicateur utilisé est le potentiel de réduction de déchets nucléaires en cm³ de déchets hautement toxiques/kWc. Les pays les plus stratégiques dans ce dernier cas sont la France, la Suisse et la Bulgarie, avec une valeur de plus de 210 cm³ de déchets hautement toxiques/kWc installé pour la France.

- Autres technologies de cellules

Si l'on compare les technologies au silicium cristallin, on remarque que les impacts sont plus importants pour le silicium monocristallin que pour le silicium multicristallin et enfin que pour le silicium ruban. Là encore, c'est bien le facteur énergie qui joue, à cause du tirage CZ pour le monocristallin et grâce à l'absence de sciage (et donc de perte de silicium) pour la technologie ruban.



Dans le tableau 3 sont donnés à titre indicatif les temps de retour énergétique pour différents types de technologies couche mince.

	Rendement	Temps de retour énergétique
mc-Si	13,2 %	3,3 ans
a-Si	5,5 %	1,2 ans
CdTe	9 %	1,1 an
CiGS	11,5 %	1,3 ans

Tableau 3 : Temps de retour énergétique pour différentes technologies de cellules pour 1700 kWh/m²/an [20]

On voit qu'ils sont généralement inférieurs à celui du silicium cristallin.

3.3. Effet de serre

L'effet de serre est le piégeage du rayonnement infrarouge (IR) ou chaleur dans la couche atmosphérique. Les rayons IR émis par la terre, elle-même chauffée par le soleil, sont absorbés et réémis par les molécules qui vibrent à ces longueurs d'onde : les gouttelettes d'eau en suspension, le dioxyde de carbone CO₂, et certains gaz fluorés comme le CF₄, le C₂F₆, le SF₆ ou le NF₃, utilisés dans la fabrication des cellules au silicium. Ces gaz ont un pouvoir réchauffant bien plus élevé que le CO₂ que l'on traduit par un coefficient : le Potentiel de Réchauffement Global (PRG). Par exemple, 1 molécule avec un PRG de 100 a l'effet qu'auraient 100 molécules de CO₂ dont le PRG est fixé à 1.

L'effet de serre a été traduit à l'aide d'un indicateur en kg CO₂-équivalent par kWh produit, correspondant à la quantité de gaz à effet de serre émis lors de la fabrication du système sur sa production électrique pendant 30 ans. Lorsqu'on exprime les résultats par kWh, la productivité du système fortement liée à l'irradiation du lieu est évidemment un critère qui va jouer sur la performance de l'ensemble.

Pour une irradiation du type Sud Europe, soit 1700 kWh/m²/an, il est de :

- 35 g CO₂-eq/kWh pour la fourniture électrique de la région Europe de l'UCTE (à 0.48 kg de CO₂-eq/kWh)
- 23 g CO₂-eq/kWh pour le procédé Elkem et la fourniture électrique norvégienne.

Pour comparaison, les valeurs pour la production d'électricité à partir de charbon, de technologie nucléaire et d'éolien sont respectivement de 1000, 6 et 11 g CO₂-eq/kWh.

Il est intéressant de noter que la configuration réelle ne correspond pas forcément à ce modèle. Par exemple, on trouve 73 g CO₂-eq/kWh en moyenne sur le parc photovoltaïque suisse, composé à 95% de silicium cristallin (dont 50% mc-Si), installé à 75% sur toiture inclinée pour une irradiation de 1040 kWh/m²/an. Encore une fois, le type et le lieu d'installation a une forte influence sur le résultat.

- **Éléments du système**

La contribution à l'effet de serre des équipements électriques, cadres et structures de montage est d'environ 10-15%. Cette part pourrait augmenter avec une meilleure documentation sur les onduleurs et la diminution de l'empreinte du module. L'impact du cadre est souvent aussi important que celui de la structure de montage.



4 Voies de réduction et bonnes pratiques

Le travail d'inventaire de cycle de vie a permis d'identifier les étapes sur lesquelles des économies de flux pourraient être réalisées [23], [24].

• Fabrication

Une première approche consiste à réduire l'énergie grise des matériaux lors de leur fabrication :

<u>Silicium solaire</u>	utilisation de réacteurs à lits fluidisés (-50% d'énergie) ou production par voie métallurgique (-70% d'énergie)
<u>Silicium</u>	réduction de l'épaisseur des plaques (ex : Sliver® cell d'Origin Energy < 70 µm et 1.7 g Si/Wc) réutilisation des chutes de silicium, notamment pertes du sciage
<u>Slurry</u>	recyclage systématique du slurry (réutilisation PEG et SiC)
<u>Gaz à effet de serre</u>	traitement systématique (70% actuellement)
<u>Eau</u>	réduction de la consommation d'eau et réutilisation
<u>Plomb</u>	utilisation de pâtes métalliques sans plomb, d'alliages métalliques pour la soudure sans plomb (ex : RWE Schott Solar) ou de colles électriquement conductrices (ex : Mitsubishi).
<u>EVA</u>	repenser le démontage du laminé en intégrant l'éco-design dès la conception du module (ex : NICE technology)
<u>Aluminium</u>	utilisation de laminés (modules sans cadre), ou a défaut, de cadres en aluminium recyclé
<u>Onduleurs</u>	augmentation de la durée de vie des onduleurs
<u>Câbles</u>	utilisation des structures de montage pour assurer le transport de l'électricité (ex : www.pv-wirefree.nl)
<u>Fin de vie</u>	recyclage des modules en fin de vie

• Productivité

Une deuxième approche est d'optimiser la productivité des systèmes PV, afin de réduire leur temps de retour énergétique.

<u>Cellules</u>	augmentation du rendement des cellules
<u>Système</u>	implantation dans les règles de l'art (sud, pas d'ombrage, bonne ventilation, câblage limitant les pertes)

Conclusion

Les résultats d'analyse du cycle de vie nous confirment que la production d'électricité photovoltaïque présente un bilan environnemental favorable. Ces résultats sont cependant restreints à la filière du silicium cristallin (90% du marché) existante actuellement en Europe, hors recyclage en fin de vie.

L'impact majeur est la dépense énergétique pendant la phase de fabrication, provenant à plus de 40% du raffinage du silicium. Etant donné qu'un système photovoltaïque est un générateur d'électricité, cet effet est plus que compensé par son utilisation.

Le temps de retour énergétique moyen pour la France est de 3 ans : le système va donc rembourser 10 fois sa dette énergétique pour une durée de vie de 30 ans.

La contribution à l'effet de serre pour la France est d'environ 70 g CO₂-eq/kWh. A titre comparatif, le kWh électrique en France se situe entre 40 et 180 g CO₂-eq/kWh selon l'usage (source Ademe 2005).

Les améliorations futures de la filière de production concernent tout d'abord le silicium solaire. Les réacteurs à lit fluidisés pour la voie chimique ou la voie métallurgique permettent une économie de 10% à 20% de la dépense énergétique totale. Ensuite, la diminution de l'épaisseur des plaques de silicium permet une économie de matériau. De la même manière, la pose de modules sans cadre réduit l'énergie grise du système. L'augmentation du rendement des cellules va elle aussi peser favorablement dans la balance. Enfin la mise en œuvre permettant une productibilité optimale des systèmes permet de limiter leur impact environnemental.

Pour aller plus loin, la conception des systèmes doit intégrer leur fin de vie, et plus particulièrement leur démontage. A ce propos, l'association européenne PV Cycle, regroupant des fabricants de modules photovoltaïques, a vu le jour en 2007. Une de ses tâches est de rendre possible le recyclage des modules.



Références

- [1] Jacques Amouroux, Daniel Morvan, “Le silicium photovoltaïque: enjeux techniques et financiers”, Colloque National Electricité Solaire Photovoltaïque, Aix-les-Bains, 20-22 mars 2007
- [2] Photon International, “A highly coveted raw material”, Jan. 2009, pp.136-141
- [3] A. Braga, S. Moreira, P. Zampieri, J. Bacchin, et P. Mei, “New processes for the production of solar-grade polycrystalline silicon: A review”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 92, Apr. 2008, pp. 418-424
- [4] J. O. Odden, G. Halvorsen, H. Rong, R. Glockner, “Comparison of the energy consumption in different production processes for solar grade silicon”, *Silicon for the Chemical and Solar Industry IX*, Oslo, Norway, June 23-26, 2008
- [5] A. Kränzl, M. Käs, K. Peter, E. Enebakk, “Future Cell Concepts for mc Solar Grade Silicon Feedstock Material”, 21th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Dresden, Germany, 4-8 September 2006
- [6] K. Friestad, C. Zahedi, E. Enebakk, M.G. Dolmen, J. Heide, K. Engvoll, T. Buset, R. Tronstad, C. Dethloff, K. Peter, R. Kopecek, I. Melnyk, “Solar Grade Silicon from Metallurgical Route”, 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 7-11 June 2004, Paris, France
- [7] K. Peter, E. Enebakk, K. Friestad, R. Tronstad, C. Dethloff, “Investigation of Multicrystalline Silicon Solar Cells from Solar Grade Silicon Feedstock”, 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 6-10 June 2005, Barcelona, Spain
- [8] R. Gløckner, J.-O. Odden, G. Halvorsen, R. Tronstad, M.J. de Wild-Scholten, “Environmental life cycle assessment of the Elkem Solar metallurgical process route to solar grade silicon with focus on energy consumption and greenhouse gas emissions”, *Silicon for the Chemical and Solar Industry IX*, Oslo, Norway, June 23-26, 2008
- [9] Ryningen B., Lohne O., Kondo M., “Characterisation of Solar Grade (SoG) Multicrystalline Silicon Wafers Made from Metallurgically Refined Material”, 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference, 3-7 September 2007, Milan, Italy
- [10] E. Øvrelid, B. Geerligs, A. Wærnes, O. Raaness, I. Solheim, R. Jensen, K. Tang, S. Santeen, B. Wiersma, “Solar Grade Silicon by a Direct Metallurgical Process”, *Silicon for the Chemical Industry VIII*, Trondheim, Norway, June 12-16, 2006
- [11] M.A. Green, “Photovoltaics: technology overview”, *Energy Policy*, vol. 28, Nov. 2000, pp. 989-998.
- [12] A. Goetzberger et C. Hebling, “Photovoltaic materials, past, present, future”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 62, Avr. 2000, pp. 1-19.
- [13] André Claverie, “*Electricité solaire photovoltaïque - Etat de l’art - Principes, applications, développements et programmes de promotion*”, Ademe, Session Photon Réseau, Novembre 2007
- [14] A.Labouret, M.Villoz, “Energie solaire photovoltaïque”, Dunod, 2006
- [15] A.Ricaud, “Photopiles solaires,” Presses polytechniques et universitaires romandes, 1997



- [16] C. del Cañizo, A. Luque, J. Bullón, A. Miranda, J.M. Míguez, H. Riemann, N. Abrosimov, “Integral Procedure for the Fabrication of Solar Cells on Solar Silicon”, 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 6-10 June 2005, Barcelona, Spain
- [17] R. Preu, D. Biro, J. Rentsch, “The status of silicon solar cell production technology development at Fraunhofer ISE”.
- [18] N. Jungbluth, M. Tuchschnid, M. de Wild-Scholten, “Life Cycle Assessment of Photovoltaics: Update ofecoinvent data v2.0”, ESU-services Ltd., 2008
- [19] M.J. de Wild-Scholten, E.A. Alsema, E.W. ter Horst, M. Bächler, V.M. Fthenakis, “A cost and environmental impact comparison of grid-connected rooftop and ground-based PV systems”, 21th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Dresden, Germany, 4-8 September 2006
- [20] E.A. Alsema, M.J. de Wild-Scholten, V.M. Fthenakis, “Environmental Impacts of PV Electricity Generation - A Critical Comparison of Energy Supply Options”, 21th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Dresden, Germany, 4-8 September 2006
- [21] E.A. Alsema, M.J. de Wild - Scholten, “Environmental impacts of crystalline silicon photovoltaic module production”, Materials Research Society Fall 2005 Meeting, Boston, USA, 28 November, 2005-2 December, 2005.
- [22] B. Lenkeit, R. Russel, et M.J. de Wild-Scholten, “Evaluation of High-Efficiency mc-Si Cell Processing Technologies Regarding Environmental Impact and Industrial Applicability”, 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference, 4-8 September 2006, Dresden, Germany
- [23] Alsema E.A. et de Wild-Scholten M.J., “Reduction of the Environmental Impacts in Crystalline Silicon Module Manufacturing”, 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference 2007, Milan, Italy
- [24] Mariska de Wild-Scholten, Erik Alsema, “Towards cleaner solar PV: Environmental and health impacts of crystalline silicon photovoltaics”, Refocus, Sept.-Oct. 2004, vol. 5, pp.46-49
- [25] www.carbonelorraine.com
- [26] www.photowatt.com
- [27] www.inrs.fr



Annexe 1 : Démarche bibliographique

La démarche bibliographique qui a été utilisée pour réunir l'information nécessaire s'est faite en 3 étapes : recherche aléatoire, puis en largeur et enfin en profondeur. La recherche aléatoire consiste en la collecte d'information par divers biais : lecture de quelques articles, de cours, recherche sur le web, brainstorming sur le sujet. Elle permet d'établir une première liste de mots-clés, qui seront utilisés lors des étapes ultérieures. Ces mots-clés sont ensuite entrés systématiquement dans des bases de données à la recherche de publications : le résultat va restreindre le champ de recherche à une liste d'auteurs et de journaux. Une autre recherche est alors lancée par auteurs et journaux ciblés, avant l'étape de lecture.

Dans le cadre de cette étude, les mots-clés qui ont été utilisés sont *environmental impact*, *life cycle*, *payback*, *emission*, *silicon feedstock*, *solar-grade*, *SoG-Si*, *metallurgical grade* associés à *photovoltaic*. Les bases de données qui ont été balayées sur la période 1999-2009 sont :

- <http://www.sciencedirect.co>
- <http://www.springerlink.com/journals/>
- <http://citeseer.ist.psu.edu/>
- <http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/7582>
- proceedings des « European Photovoltaic Solar Energy Conference » des sessions 2001, 2002, 2004 à 2007.

Suite à cette recherche, les auteurs identifiés sont :

- Erik Alsema, Utrecht University (NL)
- Mariska de Wild-Scholten, Energy Research Center of the Netherlands (NL)
- Vasilis Fthenakis, Brookhaven National Lab. (US)
- Marco Raugei, University of Siena (IT)
- Niels Jungbluth, ESU-services (CH)



Annexe 2 : Pureté du silicium

Le silicium réagit avec tous les métaux pour former des complexes. Il n'est jamais parfaitement pur, c'est-à-dire qu'il contient des éléments autres que l'atome de silicium. Ces impuretés peuvent être des atomes ou des molécules, et sont présentes à l'état de traces dans le bloc de silicium. Pour le silicium métallurgique, elles proviennent du lieu d'extraction et sont contenues dans le quartz. Dans le cas du silicium polycristallin, le chlore provient du processus de purification. Pour le silicium multicristallin, les impuretés proviennent des matériaux avec lesquels il est en contact lors de la cristallisation, à savoir les parois et le revêtement du creuset dans lequel la charge de silicium reste fondue relativement longtemps.

De manière générale, elles dégradent le rendement électrique du matériau. C'est tout l'enjeu du processus de purification que de rendre le matériau utilisable à une application photovoltaïque.

Le taux d'impuretés s'exprime en:

parties par millions : 1 ppm massique \Leftrightarrow 1g par tonne

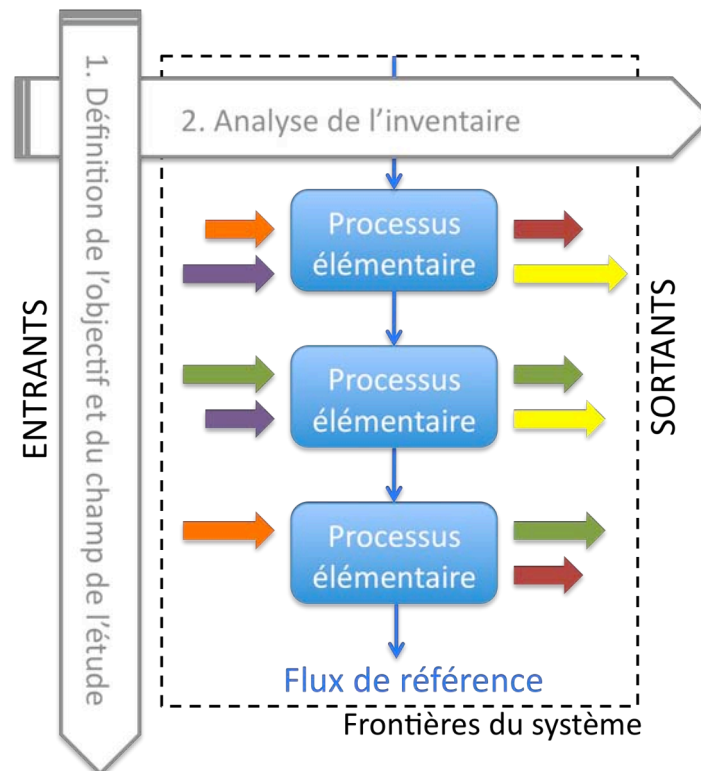
pourcentage : 1 ppm d'impuretés \Leftrightarrow $1 - 1/1000000=0,999999$ soit 99,9999% de silicium ou 6N (qualité électronique)

nombre d'atomes par centimètre cube (une partie par milliard ou 1 ppb \approx environ $0,5 \cdot 10^{13}$ atomes/cm³)

Contrairement au silicium polycristallin utilisé dans la filière électronique, le silicium de qualité solaire ne requiert pas un niveau de pureté de 99,9999% mais peut tolérer pour certaines espèces comme le Cu, le Ni ou l'Al des taux d'impuretés supérieurs au ppm. Il n'existe pas encore de standard sur les niveaux d'impuretés acceptables pour le silicium solaire.

Annexe 3 : Principe d'une analyse du cycle de vie

L'analyse du cycle de vie d'un produit permet d'analyser et de quantifier ses impacts sur l'environnement du berceau à la tombe. Cette méthode est généralement utilisée pour comparer différents produits, procédés ou services qui remplissent la même fonction. Les normes ISO-14040-44(2006) en définissent les principes.



Principe d'une analyse de cycle de vie

La démarche consiste à faire l'inventaire des ressources utilisées et des rejets (entrants et sortants), puis de classer les effets sur l'environnement qui en découlent à l'aide d'une analyse d'impact. Elle comprend formellement quatre étapes :

- 1 La **définition de l'objectif et du champ de l'étude** est la première étape. Il s'agit de déterminer les raisons pour lesquelles cette analyse est menée et à qui sont destinés les résultats. Elle établit les frontières du système et l'unité fonctionnelle sur lesquelles seront basées les comparaisons des différentes alternatives. Le flux de référence désigne la quantité du produit analysé et de consommables utilisés par ce produit nécessaires pour satisfaire les besoins de l'unité fonctionnelle.
- 2 Les flux élémentaires (consommation de ressources naturelles et polluants sortant du système) sont établis lors de l'**analyse de l'inventaire** : tout ce qui entre et qui sort du système est quantifié pour chaque étape ou processus élémentaire. Ils sont ensuite agrégés pour chaque émission ou consommation de ressource.



- 3 Les flux entrants et sortants sont combinés dans des catégories d'impacts durant *l'évaluation de l'impact*. Ces résultats clairement identifiables sont autant d'indicateurs en termes de dommage environnemental. Le choix des catégories dépend de la méthode utilisée comme du produit ou service étudié, on y retrouve généralement les axes suivants :
 - ✓ utilisation de ressources non renouvelables,
 - ✓ effet de serre,
 - ✓ santé humaine,
 - ✓ écosystèmes.
- 4 Enfin *l'interprétation* permet de valider les conclusions qui résultent des trois étapes ci-dessus.