

Université Libre de Bruxelles
Institut de Gestion de l'Environnement et d'Aménagement du Territoire
Faculté des Sciences
Master en Sciences et Gestion de l'Environnement

**" Prise en compte de l'écoconception pour les systèmes photovoltaïques
via la création d'un éco-label "**

Mémoire de Fin d'Etudes présenté par JULIEN Marion

en vue de l'obtention du grade académique de

Master en Sciences et Gestion de l'Environnement

Finalité Gestion de l'Environnement

M-ENVIG / ENVI4 /

Année Académique : 2018-2019

Directeur : Michel HUART

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Monsieur Michel Huart pour la confiance qu'il m'a témoignée et pour ses conseils lors de l'élaboration de ce mémoire.

J'aimerais également remercier les différents acteurs du secteur photovoltaïque, qui m'ont consacré leur temps pour répondre à mes questions et qui ont accepté de fournir des informations spécifiques, essentielles à l'élaboration d'un label écologique. Il s'agit de Monsieur Bertrand Lempkowicz, Monsieur Philippe Macé, Monsieur Sergio Vicini, Monsieur Sébastien La Fontaine et Monsieur Laurent Noirhomme.

Je désire enfin remercier ma famille pour leur soutien et leurs conseils qui ont permis de pousser ma réflexion.

Résumé

L'énergie solaire présente désormais un potentiel considérable pour lutter contre le changement climatique. Cependant, les systèmes photovoltaïques présentent certains impacts environnementaux tout au long des étapes du cycle de vie. La question de recherche de ce travail était la suivante :

« Pourquoi est-ce important et comment peut-on introduire un éco-label qui certifie l'écoconception des systèmes photovoltaïques au silicium cristallin ? »

Ce mémoire a d'abord effectué un état de l'art de la littérature actuelle en passant en revue les nombreux rapports, analyses de cycle de vie, initiatives et projets existants. Des entretiens ont été réalisés avec des acteurs du secteur photovoltaïque. Ils ont permis de récolter des informations spécifiques aux acteurs/entreprises/marché, de confronter la faisabilité des critères d'écoconception précédemment identifiés et de déterminer dans quelle mesure ils pourraient être intégrés à un label écologique à trois niveaux, construit par la suite.

Les raisons motivant le plus l'introduction d'un label écologique sont de réduire au maximum de l'impact environnemental des systèmes photovoltaïques, en considérant toutes les étapes du cycle de vie ; de permettre au secteur de soutenir la croissance à venir sans compromettre l'environnement, en fournissant un cadre qui accompagne les professionnels pour aller plus loin dans leur engagement envers une transition énergétique ; d'aider les consommateurs à distinguer les fournisseurs plus engagés dans l'écoconception ; d'inciter le secteur à considérer la qualité du produit au même niveau d'importance que le prix/coût.

Pour atteindre ces objectifs, Il est crucial d'avoir des actions coordonnées et une collaboration entre acteurs publics et privés pour favoriser une adoption généralisée du label écologique. De plus, il faut établir un cahier des charges précis, désigner un organisme certificateur indépendant et impartial et effectuer un suivi et des contrôles rigoureux.

Certaines barrières de taille subsistent et freinent le déploiement de l'écoconception. Citons particulièrement le manque de contrôle des fournisseurs/revendeurs/installateurs sur certaines étapes de la chaîne d'approvisionnement (extraction, production et recyclage), la recherche de minimisation des coûts à court terme des entreprises et le pouvoir d'influence des lobbies de l'industrie solaire sur les décideurs politiques qui freinent la révision profonde de la conception des systèmes photovoltaïques.

Table des matières

Résumé.....	
Table des figures	
Table des tableaux	
Acronymes	
Table des annexes	
Introduction.....	1
Chapitre 1. Les systèmes photovoltaïques actuels	5
1.1. <i>Principe de fonctionnement d'un système photovoltaïque</i>	5
1.2. <i>Composition et types de technologies des cellules photovoltaïques.....</i>	7
1.2.1. Composants principaux.....	9
1.2.2. Matières premières critiques et rares	12
1.3. <i>Systèmes auxiliaires : onduleur et câblage.....</i>	16
Chapitre 2. Impact environnemental d'un panneau et des systèmes auxiliaires photovoltaïques tout au long de leur cycle de vie.....	19
2.1. <i>Extraction de ressources et risques associés</i>	20
2.2. <i>Production et installation</i>	22
2.3. <i>Traitement en fin de vie.....</i>	25
2.3.1. Législation européenne relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques	31
Chapitre 3. Eco-conception	33
3.1. <i>En quoi consiste l'éco-conception ?</i>	34
3.2. <i>Critères d'écoconception.....</i>	36
3.3. <i>Initiatives existantes</i>	38
Chapitre 4. Développement et création d'un éco-label	48
4.1. <i>Caractéristiques générales d'un éco-label.....</i>	49
4.2. <i>Processus de création d'un éco-label appliqué aux modules photovoltaïques</i>	51
4.3. <i>Certifications et eco-labels existants pour le photovoltaïque : éléments pris en compte</i>	54
4.4. <i>Critères de l'éco-label appliqué aux systèmes photovoltaïques</i>	57
4.5. <i>Limites d'un éco-label : SWOT</i>	61
Conclusions et discussions	65
Bibliographie.....	69
Annexes	75

Table des figures

Figure 1 : Evolution de la capacité annuelle installée dans le monde (GW).....	1
Figure 2 : Fonctionnement d'un panneau photovoltaïque	6
Figure 3 : Composition d'un panneau solaire	10
Figure 4 : Composants des modules au silicium (multi)cristallin (en pondération du poids total)	10
Figure 5 : Positionnement de la criticité des matériaux pour l'UE.....	14
Figure 6 : Quantité d'argent dans les cellules photovoltaïques (grammes/cellule)	15
Figure 7 : Composition d'un onduleur 2500 W-ac (poids des matériaux en kg).....	17
Figure 8 : Composition d'un onduleur 500 W-ac (poids des matériaux en grammes, sauf pour le circuit imprimé exprimé en cm ²)	18
Figure 9 : Résultats d'ACV de l'Eco-Indicateur'99 pour différents types de systèmes PV résidentiels de 3 kWc	21
Figure 10 : Scores de l'ACV caractérisés en pourcentages relatifs	23
Figure 11 : Profils environnementaux du système solaire PV monocristallin	25
Figure 12 : Projections de la quantité de déchets photovoltaïques, 2016 - 20150	26
Figure 13 : La contribution potentielle de l'impact de chaque phase du traitement des déchets photovoltaïques	29
Figure 14 : Comparaison des impacts dûs à la production et au traitement des panneaux pv et des bénéfices potentiels dus à la production de matériaux secondaires.....	30
Figure 15 : Récapitulatif des impacts environnementaux générés par un système photovoltaïque au silicium cristallin	32
Figure 16 : Critères de l'Ecolabel européen pour les imprimantes tout au long du cycle de vie ..	50
Figure 17 : Idée/ suggestion de logo pour l'éco-label photovoltaïque	57
Figure 18 : SWOT d'un éco-label photovoltaïque	61

Table des tableaux

Tableau 1 : Types de technologies photovoltaïques largement répandues	8
Tableau 2 : Liste des matières premières critiques pour l'UE : le silicium métal.....	13
Tableau 3 : Critères d'écoconception pour un système photovoltaïque	36
Tableau 4 : Evaluation de la faisabilité pratique à large échelle des critères d'écoconception et de l'état d'avancement en Belgique.....	45
Tableau 5 : Caractéristiques et distinction entre un norme, certification, qualification et label de qualité.....	51

Acronymes

ACV : Analyse du cycle de vie

AQPV : Alliance Qualité Photovoltaïque

BCCA : Belgian Construction Certification Association

CLP : Classification, Labelling, Packaging

EROEI : Energy returned on energy invested

IEA (PVPS) : International Energy Agency (Photovoltaic Power Systems Programme)

IRENA : International Renewable Energy Agency

LCOE : Levelized Cost Of Electricity

R&D : Recherche et Développement

REACH : Registration, Evaluation, Authorization and restriction of CHemicals

SVTC : Silicon Valley Toxics Coalition

Table des annexes

Annexe 1 : Chaîne de valeur intégrée du projet Eco-Solar avec les objectifs cibles

Annexe 2 : Tableau synthétique des prix de revient et proportion d'éléments fabriqués en

France pour l'onduleur Trio Sun de Cefem Solar

Annexe 3 : Questions générales posées lors des différents entretiens

Annexe 4 : Levelized Cost of Electricity entre 2010 et 2017

Annexe 5 : Evolution des prix des modules photovoltaïques solaires au silicium cristallin de 2010 à 2015

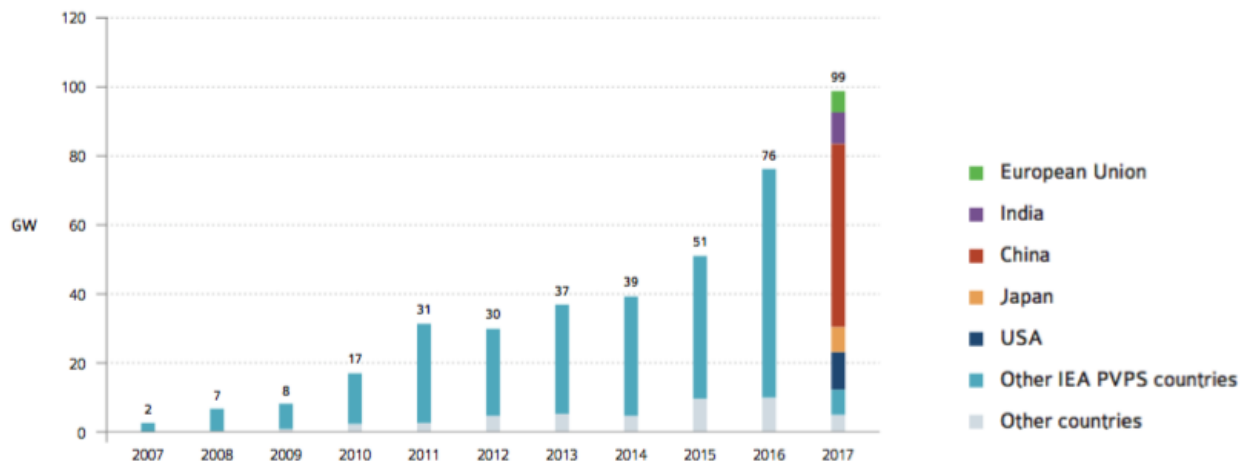
Annexe 6 : Nombre d'emploi dans le secteur des énergies renouvelables dans le monde, par pays et par technologie

Introduction

Contexte

L'énergie solaire connaît depuis peu un essor sans précédent : les équipements sont plus performants, moins onéreux (Levelized Cost Of Electricity, Energy Payback Time, Energy returned on energy invested), faciles à installer, silencieux ; ils se modulent aux besoins et caractéristiques de chaque projet, et permettent une réduction des émissions de CO2 par rapport à la production d'électricité par le biais d'énergies fossiles. Toutes ces raisons favorisent l'investissement croissant dans cette source d'énergie, qui présente désormais un potentiel considérable pour lutter contre le changement climatique. Cette croissance est visible dans le graphique ci-dessous. Rien qu'en 2017, 99 GigaWatts ont été installés dans le monde. La Belgique, en termes de Watt par personne pour cette même année, arrive en troisième position, avec 341 Watts par habitant de capacité solaire installée, derrière la Chine et les USA.

Figure 1 : Evolution de la capacité annuelle installée dans le monde (GW)



Source : International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme. « Trends 2018 in Photovoltaic Applications », 2018, 88.

Par ailleurs, le coût de production d'électricité photovoltaïque (LCOE : Levelized Cost Of Electricity) a continué à baisser à des niveaux proches, voire inférieurs au prix de détail de

l'électricité dans certains pays, atteignant ainsi la « parité réseau¹ ».

Cependant, bien que les systèmes photovoltaïques ne génèrent aucune émission lors de leur utilisation pour la production d'électricité, ils présentent certains impacts environnementaux tout au long des autres étapes du cycle de vie : depuis l'extraction des matières premières jusqu'au recyclage. Des critiques ont ainsi émergé, remettant en question la pertinence du rôle des énergies renouvelables, en ce compris le photovoltaïque, dans la transition énergétique.

Certaines questions se posent dès lors : quelles sont les problématiques environnementales liées aux systèmes photovoltaïques actuels et leur degré d'importance associé ? Des éléments critiques sont-ils utilisés pour la production de ces systèmes ? L'écoconception² est-elle un frein au développement du photovoltaïque ? Quels sont les éléments à prendre en compte dans l'analyse de l'éco-produit ? Peut-on élaborer un label écologique pour les systèmes photovoltaïques ? A quels critères doit répondre un label pour être fiable ?

En d'autres mots, toutes ces questions ont pour objectif d'apporter des éléments de réponse à la question de recherche principale :

« Pourquoi est-ce important et comment peut-on introduire un éco-label qui certifie l'écoconception des systèmes photovoltaïques au silicium cristallin ? »

Ce mémoire a pour but d'approfondir la réflexion sur l'écoconception et sur la faisabilité d'un label écologique qui certifierait la prise en compte de l'écoconception dans le cycle de vie des systèmes photovoltaïques.

¹ La parité réseau désigne le moment où le photovoltaïque peut produire de l'électricité à un prix inférieur au prix de l'électricité consommée sur le réseau.

² L'écoconception est l'intégration des aspects environnementaux dans le développement de la conception d'un produit dans le but de réduire les impacts environnementaux négatifs tout au long de son cycle de vie.

Structure et méthodologie

A cette fin, le travail commencera par aborder le fonctionnement général d'un système photovoltaïque et les différentes technologies qui existent actuellement. Ce mémoire étant axé sur les systèmes dits de première génération, c'est-à-dire les modules au silicium cristallin, une description de la composition des modules sera effectuée. Il faut tout d'abord comprendre comment les systèmes fonctionnent, quelles sont les matières premières qui les composent et en quoi elles sont indispensables ou non, pour parler plus tard d'écoconception et identifier des critères d'amélioration.

Le deuxième chapitre abordera l'impact environnemental des systèmes photovoltaïques pour chaque étape du cycle de vie par un état de l'art de nombreuses études d'analyses de cycle de vie (ACV). L'objectif est d'identifier les points critiques (hotspots) et les étapes les plus impactantes d'un point de vue environnemental, qui feront l'objet de formulation de critères d'écoconception par la suite.

Une fois l'analyse des impacts environnementaux effectuée, une réflexion en amont de la chaîne de valeur sera opérée pour identifier les possibilités d'améliorations et d'innovations réalisables pour les acteurs du secteur. En se basant sur la littérature scientifique, les projets de Recherche et Développement existants sur le sujet et sur plusieurs entretiens³ réalisés avec des acteurs du secteur photovoltaïque, le troisième chapitre explorera toutes les solutions d'écoconception qui pourraient minimiser davantage les impacts environnementaux. Plus spécifiquement, les entretiens sur le terrain ont permis de récolter des informations spécifiques

³ Des entretiens ont été réalisés entre le 27 mars et le 16 avril 2019 avec Monsieur Bertrand Lempkowicz, Manager des relations publiques, de la communication et du marketing pour l'organisme de collecte PV Cycle (traitement en fin de vie), Monsieur Philippe Macé, Senior Analyst pour l'Institut Becquerel (experts du marché photovoltaïque mondial), Monsieur Sergio Vicini, Responsable commercial de l'entreprise Evocells (fabricant belge de panneaux solaires), Monsieur Sébastien La Fontaine, Project, production et process Manager de l'entreprise ISSOL (fabricant belge de panneaux solaires) et Monsieur Laurent Noirhomme, consultant pour des projets d'énergies renouvelable pour l'entreprise Sonck (fournisseurs et installateurs de systèmes photovoltaïques en Belgique). La liste des questions générales posées lors des entretiens se trouve en Annexe 3.

aux acteurs/entreprises/marché, de confronter la faisabilité des critères d'écoconception considérés et d'identifier dans quelle mesure ils pourraient être intégrés à un label écologique.

A partir des éléments analysés, ce chapitre parcourra les procédures d'élaboration de labels, les certifications et labels existants pour le secteur photovoltaïque. Nous tenterons d'identifier une liste de critères pertinents d'écoconception permettant d'élaborer un label écologique qui s'adresserait aux fournisseurs de systèmes photovoltaïques en Belgique. Nous analyserons également les avantages, opportunités, inconvénients et menaces qui découlent de la création de ce label.

Chapitre 1. Les systèmes photovoltaïques actuels

Avant toutes choses, il est important de comprendre les principes de fonctionnement des systèmes photovoltaïques actuels et de connaître leurs composants. Plusieurs types d'applications et de technologies photovoltaïques existent. Dans le cadre de ce mémoire, nous nous concentrerons sur les systèmes raccordés au réseau. Ces systèmes sont les plus communément répandus et sont installés pour fournir de l'électricité directement au réseau électrique ou à un client raccordé au réseau. Ensuite, seule la technologie des cellules au silicium cristallin (première génération) sera développée par la suite car elle représente plus de 97% de la production totale des cellules actuellement sur le marché (IEA, 2018).

1.1. Principe de fonctionnement d'un système photovoltaïque

Un système photovoltaïque classique se compose de trois éléments principaux : un **module** photovoltaïque relié à des **câbles** et un **onduleur**. A titre accessoire, il peut également y avoir un système de stockage (régulateur et batterie) pour les installations qui se veulent autonomes et un système de monitoring pour une gestion plus efficace de la production d'électricité générée par le système photovoltaïque. De plus, chaque module possède une boîte de jonction/connexion. Dans le cadre de ce mémoire, nous nous limiterons à l'analyse des trois composants principaux (module, câbles et onduleur) sans intégrer d'autres éléments, afin de garder une recherche ciblée et de qualité.

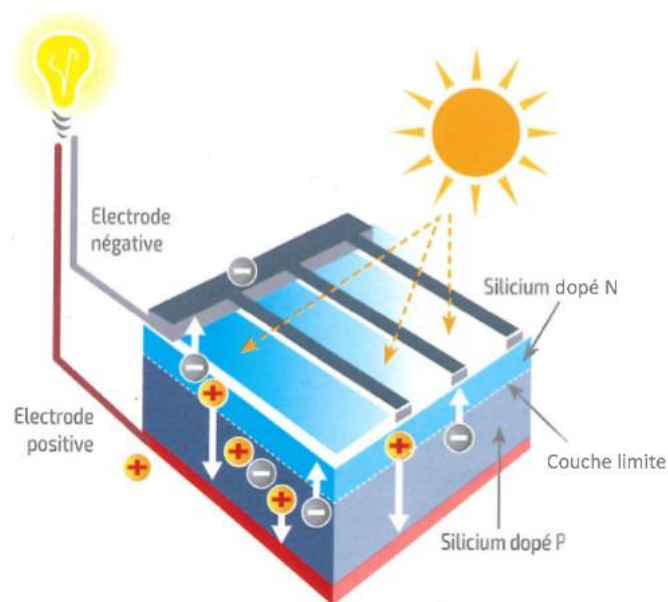
Le fonctionnement d'un système photovoltaïque est intuitif : le module, constitué de cellules photovoltaïques, capte la lumière du soleil qu'il transforme en courant électrique continu. Ce courant est acheminé par les câbles et l'onduleur qui le convertit en courant alternatif pour permettre aux différents appareils électriques d'utiliser cette électricité ou de directement l'injecter dans le réseau (Brigand, 2011).

La particularité du module photovoltaïque réside dans la propriété de certains de ses matériaux semi-conducteurs comme le silicium, le tellure de cadmium, l'arséniure de gallium, ou encore l'indium, de comporter une partie présentant un excès d'électrons et une autre partie comportant un déficit en électrons (Brigand, 2011).

En présence de lumière solaire (photons), les électrons de silicium s'agitent. Si ces électrons s'agitent d'une borne négative vers une borne positive, un courant électrique est obtenu. Pour assurer cette circulation précise, des atomes tels que le phosphore sont placés sur la couche supérieure du panneau. Cette borne est négative car l'atome de phosphore possède davantage d'électrons que l'atome de silicium (5 électrons sur la dernière couche contre 4 pour l'atome de silicium en conditions stables), les électrons de charge négative sont ainsi excédentaires et l'on parle de dopage de type n. Inversement, des atomes comme le bore sont placés sur la couche inférieure et comportent seulement 3 électrons sur leur dernière couche (borne positive avec dopage de type p) (Krauter, 2006; Moine, 2016). Une cellule solaire est obtenue par jonction des deux bornes de type opposé.

Ces bornes seront ensuite reliées par un fil conducteur, lui-même relié à l'onduleur.

Figure 2 : Fonctionnement d'un panneau photovoltaïque



Source : Gérard Moine. *L'électrification solaire photovoltaïque*. Observ'ER., 2016.

De cette manière, grâce à l'énergie des photons, les électrons circulent et créent un courant électrique.

1.2. Composition et types de technologies des cellules photovoltaïques

Deux grandes catégories de technologies peuvent actuellement être distinguées :

- 1) Les panneaux fabriqués à base de **silicium cristallin (c-Si)**, dits de première génération. On y distingue le silicium multicristallin ou polycristallin, du monocristallin.

Les cellules en **silicium monocristallin (sc-Si)** présentent actuellement un très bon rendement de conversion⁴ commercial compris entre 16% et 25% (IEA, 2018). La cellule est constituée d'un seul cristal élaboré à partir d'un bloc de silicium d'une grande pureté, contrairement à la cellule au silicium multicristallin qui est constitué de plusieurs monocristaux juxtaposés dans différentes orientations (Brigand, 2011).

Les cellules au **silicium multicristallin (mc-Si)** ont un coût de production moins élevé que les monocristallines mais possèdent également un rendement de conversion commerciale plus faible, de l'ordre de 14% à 18% (IEA, 2018). Par contre, ces cellules captent plus facilement la lumière ambiante ou un rayonnement indirect.

- 2) Les panneaux à **couche mince** généralement fabriqués à base de silicium amorphe (a-Si), tellurure de cadmium (CdTe) ou de cuivre-indium-sélénium (CIS ou CIGS), dits de seconde génération.

Ces panneaux sont plus souples et très fins. Les cellules sont formées en déposant des couches extrêmement minces de matériaux semi-conducteurs sur un support en verre, en

⁴ Pour rappel, le rendement de conversion est le rapport entre l'énergie électrique fournie par les cellules et l'énergie solaire reçue sur l'ensemble de la surface (Moine, 2016).

acier inoxydable ou en plastique. Le rendement des cellules à couche mince est légèrement inférieur à celui des siliciums cristallins, mais ils bénéficient cependant de coûts de production plus faibles (Mambrini, 2014).

Une des particularités de cette technologie réside dans la capacité de convertir différentes parties du spectre solaire, ce qui conduit à une bonne adaptation aux rayonnements plus faibles et diffus et une faible altération par les obstacles (Brigand, 2011).

Toutefois, la toxicité de tellure de cadmium et la criticité de l'indium, du germanium et du gallium posent un problème environnemental pour l'expansion de la production de ce type de panneaux (Latunussa et al, 2016).

D'autres technologies existent. Néanmoins, elles ne sont commercialisées qu'à petite échelle et à des fins très spécifiques ou sont encore en cours d'expérimentation.

Le tableau 1 rassemble les différents types de technologies photovoltaïques commercialisées à large échelle et leurs caractéristiques principales.

Tableau 1 : Types de technologies photovoltaïques largement répandues

Technologies	Rendement des cellules	Caractéristiques principales
Silicium monocristallin (sc-Si)	16 à 25%	Mono cristal Rendement élevé
Silicium multicristallin (mc-Si)	14 à 18%	Plusieurs monocristaux juxtaposés Coût plus faible
Couche mince : silicium amorphe (a-Si)	10,5%	Couches minces de silicium amorphe hydrogéné Rendement et coût faible
Couche mince : tellure de cadmium (CdTe)	14,4%	Couches de sulfure et tellure de cadmium Utilisation d'oxyde d'indium comme couche conductrice Coût faible
Couche mince : cuivre-indium-gallium-sélénium (CIGS)	17,3%	Couches de cuivre-indium-sélénium alliée avec du gallium Utilisation de Germanium pour capter la partie rouge du spectre visible non absorbée par le silicium

Sources : IEA, 2018; Moine, 2016; Brigand, 2011.

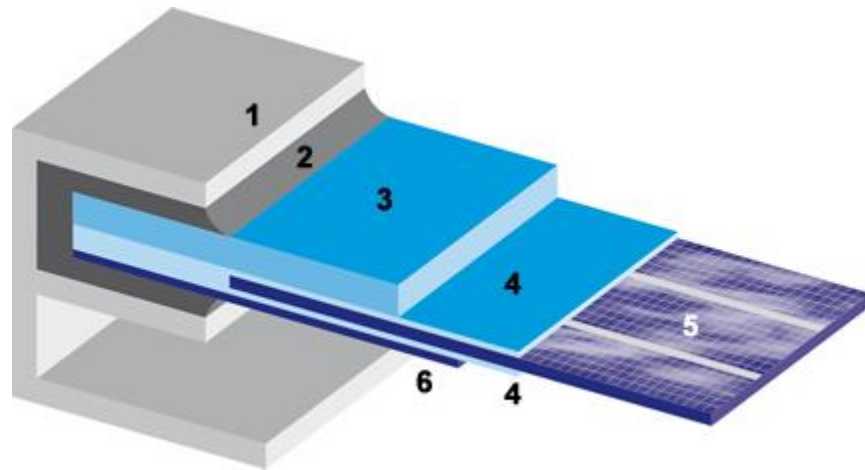
1.2.1. Composants principaux

Le **silicium (Si)**, qui constitue un matériau essentiel pour la production de cellules photovoltaïques, est le second élément le plus abondant à la surface terrestre après l'oxygène. Il est naturellement présent sous la forme de silice et de silicates (Universalis, consulté le 13 février 2018). Cet élément ne se trouve pas à l'état de corps simple dans la nature, il doit subir une série de traitements (raffinage, purification chimique et réprécipitation) avant d'être incorporé dans les modules photovoltaïques.

En ce qui concerne la composition usuelle d'un module au silicium cristallin, celui-ci se compose de trois éléments principaux : un laminé, un cadre et des connexions (Moine, 2016). Le laminé comprend un panneau regroupant plusieurs cellules reliées entre elles grâce à un contact de surface à base d'**argent** et de **cuivre** pour assurer les connexions entre cellules. Ces cellules sont assemblées en série ou en parallèle et encapsulées par mise en sandwich entre différentes plaques, comprenant entre autres du **verre**, de l'éthylène-acétate de vinyle (**EVA**) et du polyfluorure de vinyle (**tedlar**) (voir figure 3). Ces couches laminées permettent notamment de protéger les cellules contre la température, l'humidité, les chocs mécaniques et la corrosion. En outre, de l'**antimoine** est utilisé dans le verre en très faibles quantités car les panneaux sont exposés aux rayons UV et au soleil (Latunussa et al., 2016).

Enfin, un cadre de fixation en **aluminium** doit être ajouté, ainsi qu'une boîte de jonction pour le raccordement électrique des différents modules (elle permet de faire les jonctions entre câbles et de loger les diodes) et un **joint en silicone** (Brigand, 2011; Moine, 2016).

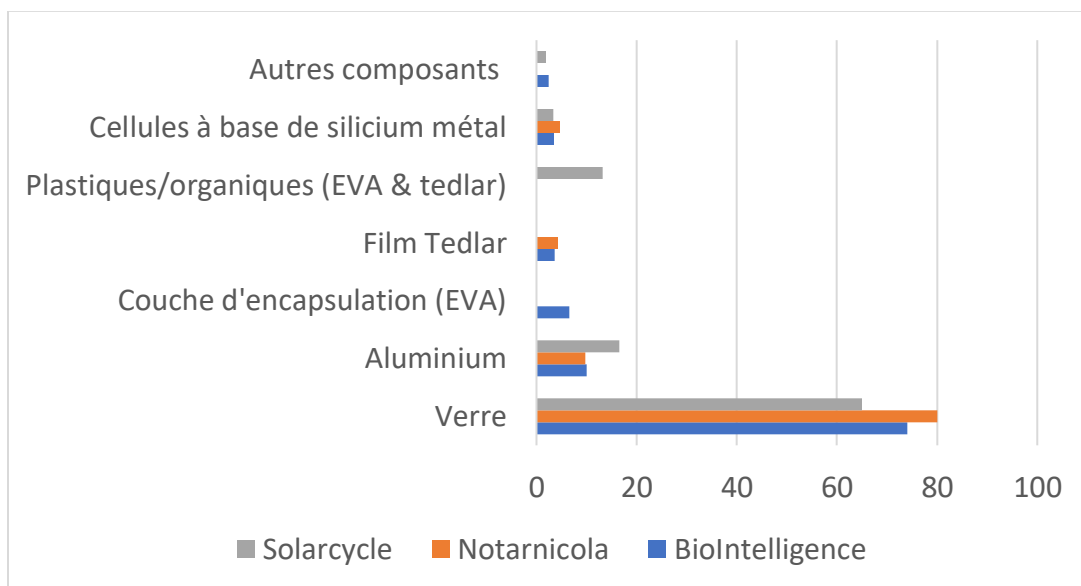
Figure 3 : Composition d'un panneau solaire



1. Cadre en aluminium – 2. Joint d'étanchéité – 3. Verre - 4. Protection par EVA - 5. Cellules – 6. Film Tedlar
Source : Energie+

Le graphique ci-dessous détaille plus précisément la part (pourcentage du poids total) de chaque matériau dans la composition d'un module au silicium multicristallin pour Bio Intelligence et Notarnicola, et plus globalement d'un panneau de première génération au silicium cristallin pour Solarcycle.

Figure 4 : Composants des modules au silicium (multi)cristallin (en pondération du poids total)



Source des données : Bio Intelligence, 2011 ; Latunussa et al, 2016 ; Louise Gonda, 2017.
A noter : la part d'EVA et des autres composants n'est pas spécifiée par Notarnicola. La catégorie plastiques/organiques de Solarcycle comprend l'EVA, le tedlar, la colle et le silicone.

Il peut être observé que le verre et l'aluminium combinés représentent entre 85% et 90% de la composition totale du module. Ces matériaux à eux seuls peuvent permettre aux entreprises de recyclage d'atteindre leur quota de recyclage d'un panneau. C'est donc un élément à garder à l'esprit lorsque l'on parle de recyclage pratiquement complet des modules, puisque cela n'implique pas forcément un recyclage des matières rares et critiques, qui ne représentent qu'une partie infime du produit.

Enfin, une dernière clarification paraît importante à préciser. Contrairement aux idées reçues, les panneaux au silicium qui représentent plus de 97% de la production totale sur le marché photovoltaïque **ne contiennent pas de terres rares**. En effet, c'est une critique régulière exprimée lorsque l'on parle des technologies renouvelables et qui fustige l'utilisation de ces métaux dont l'extraction et le raffinage sont fort polluants (entretien avec PV Cycle, 27 mars 2019; entretien avec l'Institut Becquerel, 4 avril 2019, Greenpeace, 2018). Seuls certains panneaux solaires de deuxième ou troisième génération utilisent des terres rares. Par exemple, les panneaux à base de semi-conducteurs organiques présentent un potentiel d'augmentation du rendement de conversion par l'utilisation d'ions d'Erbium ou d'Ytterbium (deux éléments faisant partie du groupe des terres rares) dans le processus de dopage du phosphore. Cependant, cette utilisation est toujours à l'étude, l'amélioration d'efficacité étant assez limitée dans la pratique (Wang et al., 2011). Les terres rares sont présentes dans la majorité des technologies numériques high tech sous forme d'aimants et d'alliages performants, mais ne sont pas présentes dans les panneaux solaires de première génération. Ces arguments n'ont donc pas lieu d'être utilisés pour remettre en cause la transition énergétique par le biais du développement de l'énergie solaire. Les terres rares sont en revanche utilisées dans certains aimants d'éoliennes et dans les batteries. Les terres rares ne sont donc pas à confondre avec les métaux considérés comme rares ou les métaux critiques utilisés dans les applications photovoltaïques, abordés à la section suivante.

1.2.2. Matières premières critiques et rares

Certaines matières premières sont devenues stratégiques pour de nombreux pays et industries européennes car elles sont essentielles pour la croissance et la compétitivité.

Ces dernières années, l'augmentation mondiale de la demande combinée à des réserves limitées, la volatilité des prix et les restrictions imposées à ces ressources ont poussé les Etats à déterminer quelles substances sont critiques et à essayer de sécuriser leurs approvisionnements.

La Commission européenne a ainsi établi une liste des matières premières critiques selon deux paramètres principaux : le **risque de pénurie d'approvisionnement** de la substance et son **importance économique**. Ces paramètres sont complétés par différentes variables telles que le taux de dépendance à l'égard des importations (calculé par le ratio entre les importations nettes de l'UE et la somme des importations nettes de l'UE et de la production intérieure de l'UE), les restrictions à l'exportation et la substitution comme facteur de correction (Commission européenne, 2017).

Ce rapport fournit dès lors une indication quant à la disponibilité de la substance, aux risques pesant sur les approvisionnements, la dépendance de l'UE aux importations et permet aux acteurs économiques de prendre des dispositions en fonction des différents paramètres de criticité.

Parmi les 27 matières jugées critiques, on retrouve le silicium métal, essentiel à tout panneau photovoltaïque, ainsi que l'antimoine que l'on retrouve dans le verre. A cela s'ajoutent le gallium, germanium et indium, présents en très faibles quantités dans les technologies à couche mince (seconde génération, qui ne fait pas partie des limites de recherche de ce mémoire).

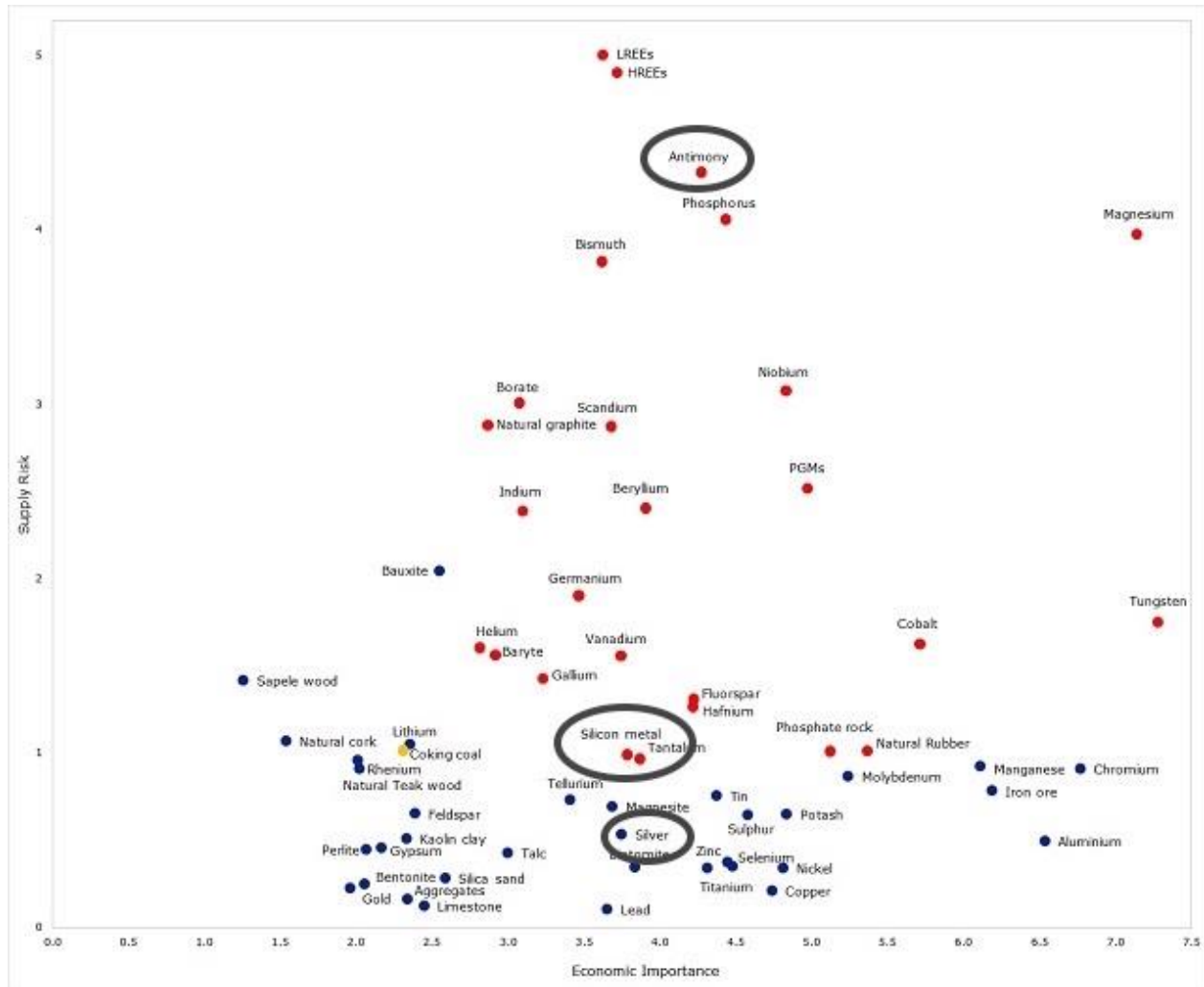
Tableau 2 : Liste des matières premières critiques pour l'UE : le silicium métal

Matières premières	Principaux producteurs mondiaux (moyenne 2010- 2014)	Principaux importateurs dans l'UE (moyenne 2010-2014)	Sources de l'approvisionnement de l'UE (moyenne 2010-2014)	Taux de dépendance à l'égard des importations*	Indices de substitution EI/SR	Taux de recyclage des matières en fin de vie
Silicium métal	Chine (61 %) Brésil (9 %) Norvège (7 %) États-Unis (6 %) France (5 %)	Norvège (35 %) Brésil (18 %) Chine (18 %)	Norvège (23 %) France (19 %) Brésil (12 %) Chine (12 %) Espagne (9 %) Allemagne (5 %)	64 %	0,99/0,99	0%
Antimoine	Chine (87 %) Viêt Nam (11 %)	Chine (90 %) Viêt Nam (4 %)	Chine (90 %) Viêt Nam (4 %)	100%	0,91/0,93	28%

Source : Commission européenne. « Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au Comité des Régions relative à la liste 2017 des matières premières critiques pour l'UE », 13 septembre 2017.

Le **silicium** et l'**antimoine** nous intéressent particulièrement car ce sont les deux seules matières premières critiques présentes dans les panneaux de première génération. Ce n'est pas tant le caractère rare du silicium qui le rend critique pour l'Europe, car l'élément est abondamment présent sur terre, mais plutôt le taux de dépendance aux importations et plus particulièrement la difficulté à le substituer (1 correspondant à la substituabilité la plus faible) et le taux de recyclage inexistant. L'**antimoine**, présent en quantités infimes, met en évidence la dépendance européenne vis-à-vis de la Chine qui en détient le monopole mondial de production. Néanmoins, l'utilisation de l'antimoine dans le verre pour améliorer la performance du module lors de son exposition au soleil ne constitue que 5% de son usage total en Europe, selon le rapport du Joint Research Center (Latunussa et al., 2016) et le BRGM (2015). Son usage principal reste lié aux retardateurs de flamme.

Figure 5 : Positionnement de la criticité des matériaux pour l'UE

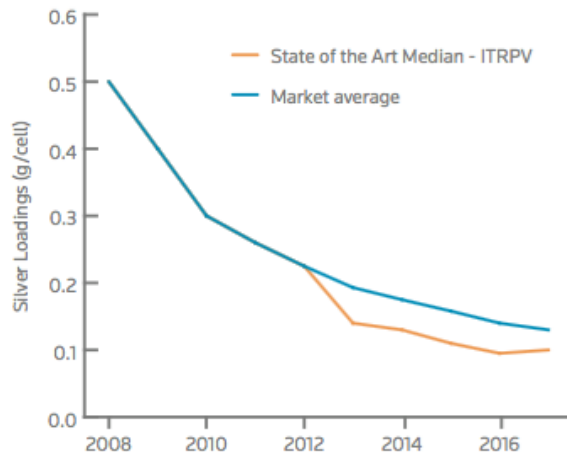


Source : European Commission « Critical Raw Materials », 5 juillet 2016. http://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical_en.

En outre, l'**argent** est souvent mentionné comme métal rare présent dans les systèmes photovoltaïques. Il n'est pas considéré comme critique car le risque d'approvisionnement n'est pas aussi alarmant que les matières premières citées précédemment. De plus, dans beaucoup de pays, l'argent ne semble plus faire partie des réserves stratégiques car certains d'entre eux ont revendu il y a quelques années la moitié, voire la totalité de leurs avoirs gouvernementaux en argent (The Silver Institute, 2018). Cependant, les réserves disponibles ne sont pas aussi abondantes que le silicium, et si le marché se voyait confronté à une augmentation exponentielle de la demande, son utilisation pourrait devenir critique. 9% de la demande totale dans le monde

est dédiée au photovoltaïque (The Silver Institute, 2018) : ce matériau est en effet utilisé dans les modules pour sa conductivité électrique (il est utilisé sous forme de pâte sur le contact avant et arrière d'une cellule solaire). Des efforts continus sont entrepris pour réduire la quantité d'argent déposée dans les connexions des cellules, c'est ce qui peut être observé dans la figure 6.

Figure 6 : Quantité d'argent dans les cellules photovoltaïques (grammes/cellule)



Source : Thomson Reuters. « 2018 World Silver Survey ». The Silver Institute, avril 2018.
<https://www.silverinstitute.org/wp-content/uploads/2018/04/2018WorldSilverSurvey.pdf>.

A ce jour, aucun substitut n'a encore été trouvé pour le domaine photovoltaïque.

En ce qui concerne le recyclage, d'après le PNUE, le taux de recyclage d'argent sous toutes ses formes en 2011 était estimé entre 30% et 50%. Cela inclut toutes les utilisations de l'argent, la partie attribuable au photovoltaïque étant impossible à isoler. L'argent n'est généralement pas recyclé par les systèmes de gestion de fin de vie de systèmes photovoltaïques en raison du coût lié à la récupération de quantités infimes de matière (CU-PV). La Belgique n'échappe pas à cette tendance : le composant se retrouve au recyclage dans les fractions du silicium, duquel il n'est pas séparé (entretien avec PV Cycle, 27 mars 2019).

Ces informations seront utiles pour définir les critères à prendre en compte pour l'écoconception et la mise en place d'un éco-label.

1.3. Systèmes auxiliaires : onduleur et câblage

Comme mentionné précédemment, un onduleur doit être installé pour convertir le courant continu généré par le panneau en courant alternatif et ainsi permettre l'injection de l'électricité dans le réseau. Il règle également le point de puissance maximale (Maximum Power Point) comme point de fonctionnement par rapport à l'intensité et à la tension générée par les modules, enregistre les valeurs caractéristiques du fonctionnement nécessaire à la maintenance et au contrôle de l'installation. Il peut offrir des fonctions supplémentaires comme une protection différentielle, une protection contre la surtension, une protection en température élevée ou une interface de communication pour permettre un suivi de production du générateur photovoltaïque (Moine, 2016; Energie +, consulté le 11 mars 2019; Volta, 2015). Au niveau de sa composition, l'onduleur comprend notamment un ensemble de circuits imprimés, d'interrupteurs électroniques, de capacités, d'inductances et de transformateurs.

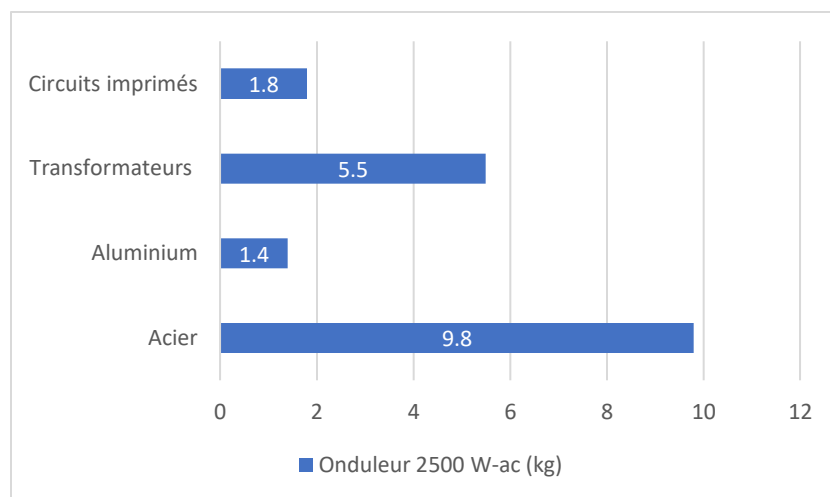
Il existe une panoplie d'onduleurs différents, suivant l'usage, les types de technologie des panneaux, l'agencement de ceux-ci, la taille de l'installation photovoltaïque et son exposition, la nature du réseau de distribution, etc. Ils peuvent être monophasés ou triphasés, installés par module, centralisés (un onduleur gère l'ensemble de l'installation) ou encore en rangée/chaîne (Volta, 2015; Brigand, 2011).

Les technologies d'onduleurs ne cessent d'évoluer avec de nouveaux dispositifs semi-conducteurs de puissance qui permettent d'obtenir un rendement de conversion plus élevé, ainsi qu'une réduction de la taille et du poids. Ces découvertes, couplées à un nombre d'acteurs croissants sur le marché, se traduisent par une réduction du coût actualisé de l'énergie photovoltaïque (LCOE). Le rendement de conversion pondéré varie entre 95% et 99% en fonction du type d'onduleur utilisé (IEA, 2018). Il est toutefois important de noter que la durée de vie d'un onduleur est environ deux fois moindre que celle d'un module : il devra donc être remplacé deux fois sur la durée de vie du module.

Les systèmes de câblage et de connexion subissant du courant continu, ils disposent tous d'une isolation protectrice (Tecnolec, 2015). Des fils de cuivre sont utilisés pour assurer les connexions électriques et représentent 39% des câbles et connecteurs externes. La protection en plastique représente quant à elle les 61% restants (Gonda, 2017).

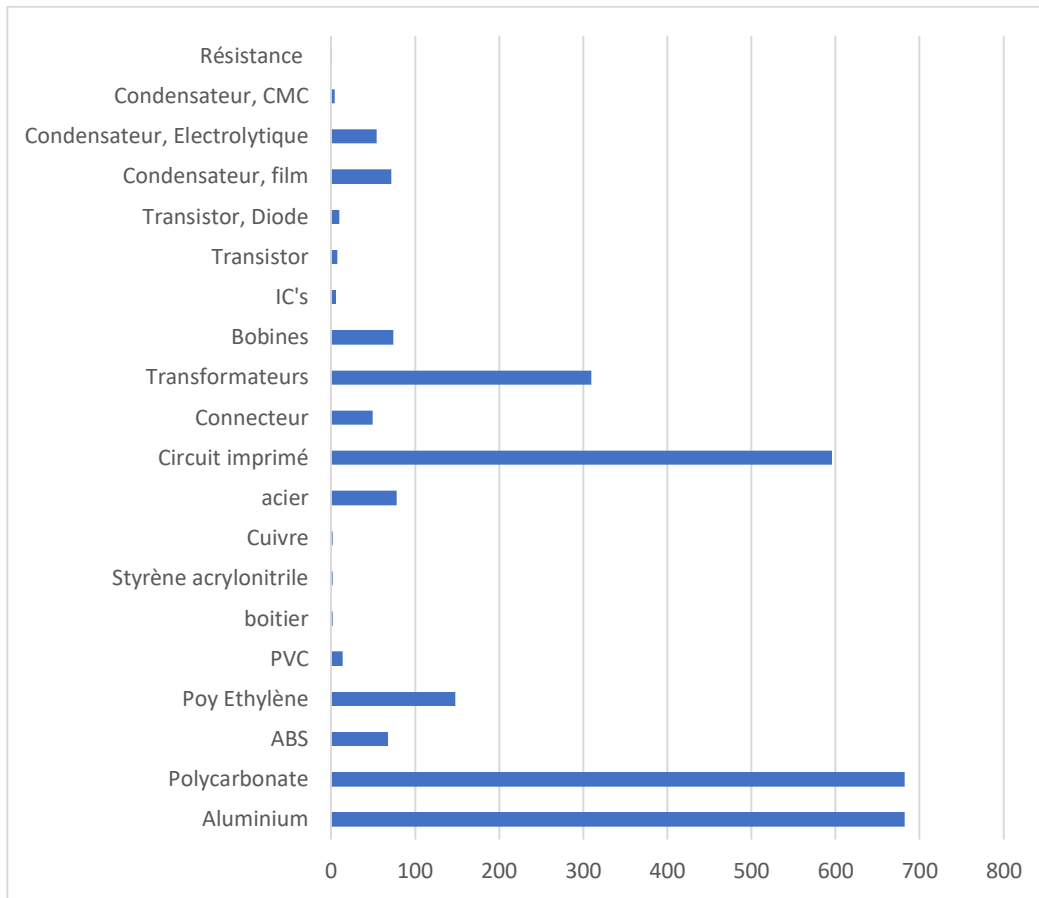
Il n'y a que très peu d'information pertinente quant à la quantité exacte de matière impliquée dans sa composition. Un seul rapport de l'IEA (Frischnecht et al., 2015) détaille la composition de deux onduleurs, effectuée en 2006. La composition du premier onduleur de 2500 W-ac a été réalisée par démantèlement et pesée. Celle du deuxième onduleur de 500 W-ac est basée sur les spécifications du fabricant. La répartition du poids de chaque composant est illustrée ci-dessous.

Figure 7 : Composition d'un onduleur 2500 W-ac (poids des matériaux en kg)



Source : basé sur les données de Frischknecht R., Itten R., Sinha P., de Wild-Scholten M., et Zhang J. « Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems », janvier 2015.

Figure 8 : Composition d'un onduleur 500 W-ac (poids des matériaux en grammes, sauf pour le circuit imprimé exprimé en cm²)



Source : basé sur les données de Frischknecht R., Itten R., Sinha P., de Wild-Scholten M., et Zhang J. « Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems », janvier 2015.

Malheureusement, la multitude d'onduleurs existants ainsi que l'ancienneté de l'inventaire ne nous permettent pas de généraliser ces données à tout type d'onduleur. Ce manque de données publiques sur la composition des onduleurs renforce la difficulté à évaluer quels onduleurs du marché sont meilleurs que d'autres (d'un point de vue environnemental), et par conséquent rend ardue la formulation de critères d'écoconception.

Chapitre 2. Impact environnemental d'un panneau et des systèmes auxiliaires photovoltaïques tout au long de leur cycle de vie

Le profil environnemental du système photovoltaïque en fait l'une des sources d'énergie les plus prometteuses pour la production d'électricité parmi les combustibles non fossiles. En effet, la production d'énergie, par rapport au système de référence (ie. les énergies fossiles) offre un impact réduit sur l'environnement, même dans les régions où l'irradiation solaire est faible (c'est le cas de la Belgique par exemple) et même si l'on suppose une durée de vie de seulement vingt ans (article Laleman et al. dans le livre de Singh et al., 2013). L'avantage principal des systèmes photovoltaïques a trait aux émissions nulles de dioxyde de carbone lors de leur utilisation, quoiqu'il existe des impacts associés aux autres phases du cycle de vie, qui seront parcourus dans ce chapitre.

L'analyse des impacts environnementaux est essentielle pour identifier les points critiques (hotspots) et élaborer les critères principaux à prendre en compte lors de la création d'un éco-label. Ce chapitre a pour objectif de présenter les principaux résultats provenant de la littérature actuelle, qui détaille de manière approfondie les impacts associés à chaque phase du cycle de vie des systèmes photovoltaïques au silicium cristallin.

La présentation des résultats dans le cadre de ce travail n'a pas pour but de se limiter aux résultats précis obtenus par chaque analyse, mais plutôt de représenter l'impact global de chaque phase du cycle de vie. Nous avons donc choisi d'illustrer les résultats de plusieurs rapports, même s'ils présentent des critères, outils et conclusions parfois variables.

Rappelons enfin les principaux enjeux environnementaux des systèmes photovoltaïques :

- Améliorer le bilan énergétique sur la durée de vie du système – mesuré par des indicateurs tels que l'EROEI (Energy Returned On Energy Invested), l'empreinte carbone, l'energy pay back time, etc. Le bilan énergétique varie en fonction de la technologie du module utilisée, du pays de production et du lieu d'installation.
- Réduire les impacts des activités de fabrication.

- Limiter au maximum l'utilisation de ressources critiques.
- Permettre le meilleur recyclage possible en fin de vie.

2.1. Extraction de ressources et risques associés

L'extraction de ressources passe invariablement par une exploitation minière. Ces exploitations, quelles que soient leurs échelles, génèrent autour d'elles des impacts sur le sol, l'eau et l'air.

Tout d'abord, la mise sur pied de ces mines peut passer par une déforestation préalable, qui rend la zone sujette à l'érosion. De plus, l'extraction et le traitement de ressources sont des activités polluantes dues aux émissions de particules toxiques rejetées dans l'air et à la pollution des eaux environnantes (cours d'eau et eaux souterraines). Ces eaux impropres à la consommation s'écoulent par la suite vers la mer par différents cours d'eau, ce qui a pour conséquence de contaminer les poissons et indirectement les humains. Enfin, la toxicité des résidus de traitement rend la régénération de la couverture terrestre de la mine difficile voire impossible à long terme (Jacka, 2018).

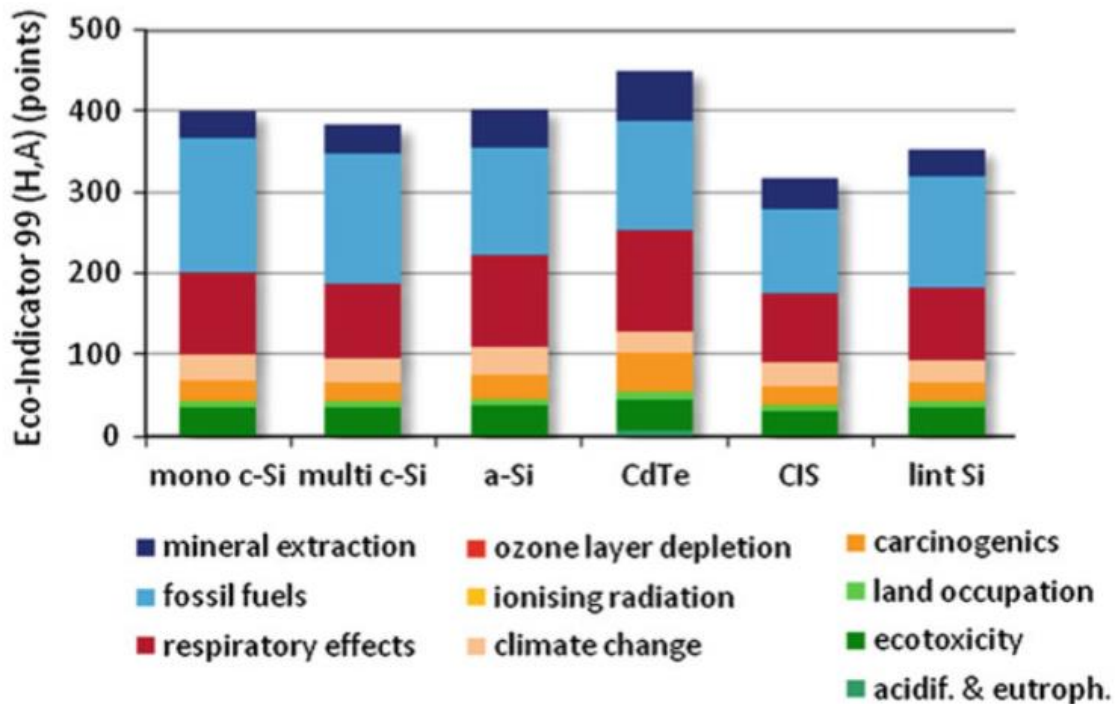
Limiter les dégâts de l'exploitation sur l'environnement pourrait se faire en fixant des exigences, comme par exemple minimiser les déchets toxiques et s'assurer de filtrer les eaux avant de les déverser dans les cours d'eau.

Le problème réside dans le manque de contrôle des opérations des mines, qui se trouvent pour la majorité dans des pays non européens et qui sont régies par des objectifs de rentabilité et de pression sur les coûts.

Pour certaines ressources, il faut aussi tenir compte du rythme d'extraction qui, à long terme, pourrait poser un problème de raréfaction voire d'épuisement de celles-ci. Plusieurs analyses de cycle de vie investiguent déjà les possibilités de réduire la quantité de matière par module (pour un rendement identique), de substituer certaines matières par d'autres plus abondantes ou moins toxiques et qui présentent des propriétés similaires, soit encore, d'augmenter le taux de

recyclage pour réduire la demande primaire (Wambach et al., 2017; Buchholz, 2017; Bellman et al., nd. ; PV MoReDe ; CABRISS ; FRELP).

Figure 9 : Résultats d'ACV de l'Eco-Indicateur'99 pour différents types de systèmes PV résidentiels de 3 kWc



Source : Singh, Anoop. et al. *Life Cycle Assessment of Renewable Energy Sources*. 2013^e éd. Green Energy and Technology. London: Springer London, 2013.

La figure 9 illustre le potentiel de réchauffement planétaire (Global Warming Potential) calculé à partir de l'éco-indicateur 99 pour l'analyse d'impact lors du cycle de vie des différentes technologies photovoltaïques résidentielles. D'après cette analyse, ce sont les panneaux au tellurure de cadmium (CdTe) qui contribuent le plus au potentiel de réchauffement, à cause des postes liés à l'extraction minière et aux effets respiratoires.

Néanmoins, l'extraction des minerais, bien qu'elle contribue au potentiel d'impact total, ne constitue pas l'étape la plus polluante. Pour chaque technologie, c'est la partie « énergies fossiles » qui affecte majoritairement le score global. Cette part peut être liée à la consommation d'énergie pendant la production et le transport des panneaux (Laleman et al., 2013), qui sera discutée au point suivant.

2.2. Production et installation

La chaîne du processus de production implique plusieurs étapes de raffinage et d'assemblage, avant l'installation de chaque système photovoltaïque. Cette chaîne de production passe par la transformation de la silice en silicone, la purification du silicium jusqu'au pourcentage requis, la fabrication de lingots dans lesquels sont découpées les gaufres ou tranches, l'application des contacts électriques, avant d'encapsuler ces cellules en modules (Wambach et al., 2017; Gerbinet, 2011; Brigand, 2011). Toutes ces opérations consomment de l'énergie et des ressources : électricité, produits chimiques, eau, énergies fossiles, etc.

Une étude d'analyse de cycle de vie réalisée en 2011 en Espagne (Sumper et al., 2011) a évalué les étapes de fabrication, montage, installations et transport de systèmes photovoltaïques polycristallins (incluant les modules, les onduleurs et les structures de support).

Après avoir analysé les principaux polluants émis lors des différentes étapes, il est ressorti que c'est **l'étape de fabrication du module** qui présentait les émissions atmosphériques les plus élevées, suivi de **l'étape du transport** – les modules et onduleurs pris en compte provenant de Chine. La production du module est en effet responsable de 65% des émissions totales de CO émises, 70% des NOX, 99% des PM10, 95% du SO2, 70% du plomb, 65% des hydro-carbures, 90% des émissions de CO2 et enfin 75% des émissions de méthane (CH4)⁵. Si l'on regarde maintenant en terme d'énergie requise pour chaque étape, la production des modules consomme plus de 84% de la consommation totale d'énergie primaire de l'ensemble du système photovoltaïque (Sumper et al., 2011).

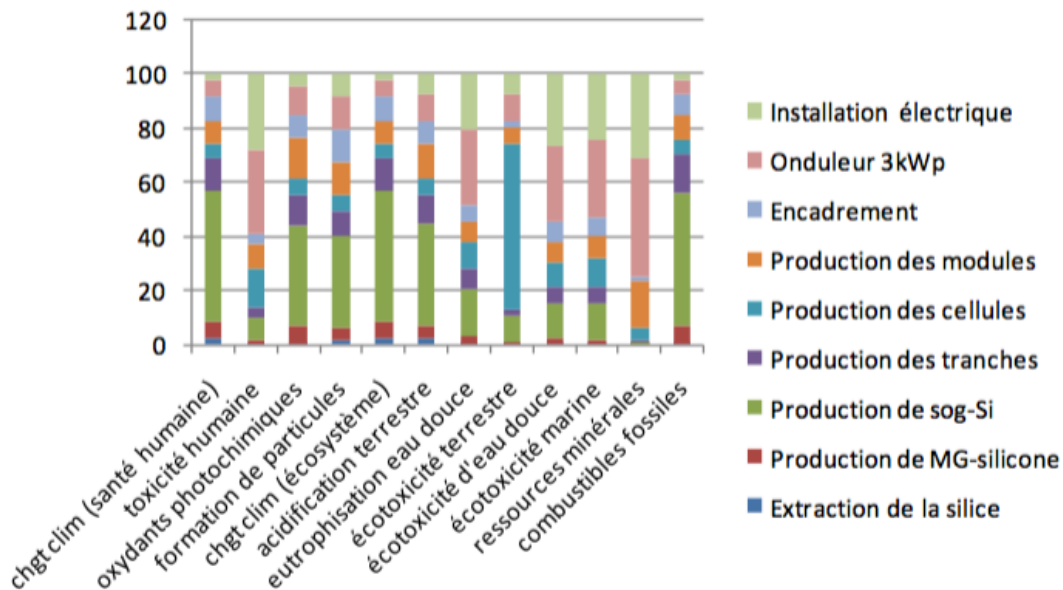
Il est toutefois important de noter que cette analyse ne prenait pas en compte l'étape d'extraction des ressources, ni de fin de vie des systèmes photovoltaïques. De plus, chaque ACV peut différer en fonction des limites définies du système, des unités fonctionnelles choisies, du mélange énergétique utilisé dans la fabrication de chaque système, des procédés de production pris en compte, du rendement de conversion et lieu géographique sélectionné, etc.

⁵ Pour rappel, les NOx sont les oxydes d'azote, les PM10 sont l'acronyme de particulate matter de diamètre inférieur à 10 micromètre et le SO2 est le dioxyde de soufre.

Les résultats de cette étude concordent avec ceux publiés par Stolz et al. en 2016, qui montrent que l’approvisionnement en matières premières et la production des modules (considérés comme une seule catégorie) contribuent à la majorité des impacts environnementaux⁶, suivi par l’installation et le montage. Le démantèlement et le recyclage ne contribuent que minoritairement aux impacts totaux.

Enfin, une troisième étude réalisée par des chercheurs de l’Ulg sur des panneaux multicristallins⁷ sur base de la méthode ReCiPe, conclut également que l’étape de la production et plus précisément la **production du silicium de pureté suffisante** (grade solaire, à contrario du grade métallique qui consomme beaucoup moins d’énergie) s’avère être l’étape la plus impactante d’un point de vue environnemental. Ces résultats sont illustrés ci-dessous (Gerbinet et al., 2011).

Figure 10 : Scores de l'ACV caractérisés en pourcentages relatifs



Source : Saicha Gerbinet. « Évaluation environnementale de systèmes de production d’électricité renouvelable ». Université de Liège, 2011.

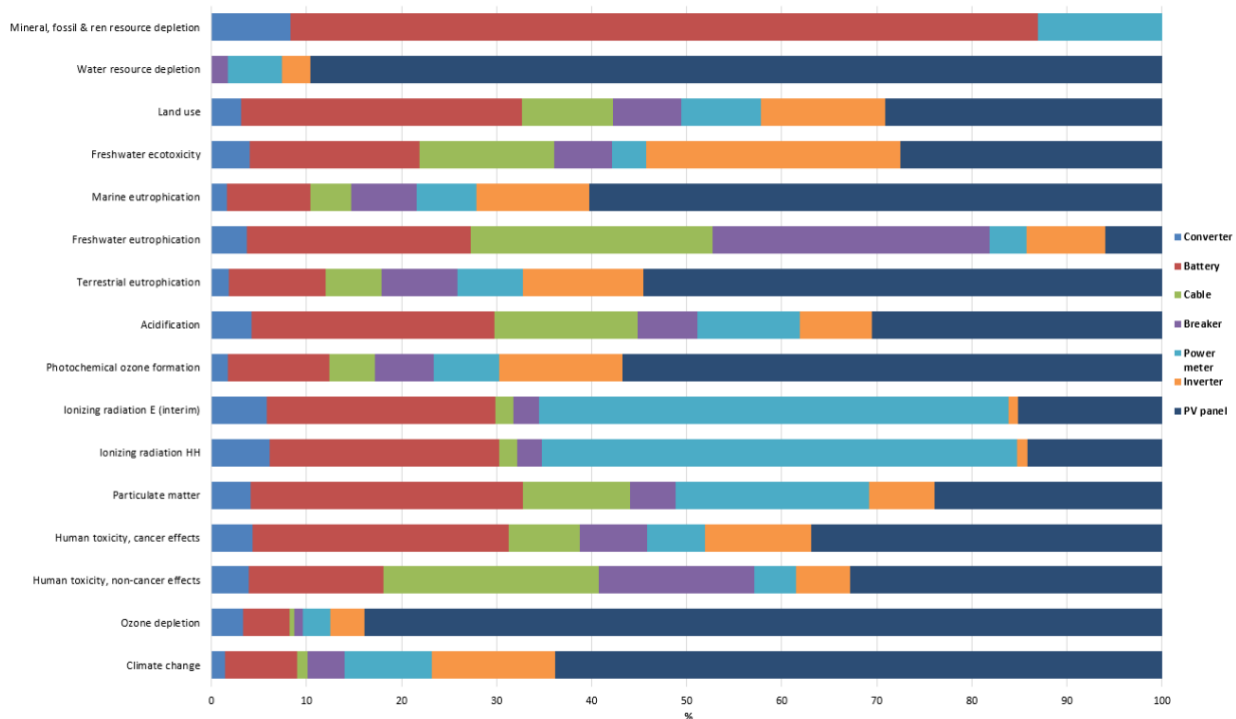
⁶ Pour 1 kWh d’électricité en courant continu produite avec un système PV à l’échelle résidentielle (3 kWc) avec des panneaux PV moyens montés sur un toit en pente. L’onduleur n’a pas été pris en compte dans le système pour cette étude, de même que l’étape du transport.

⁷ Pour des panneaux installés sur un toit d’habitation avec une orientation vers le sud et une inclinaison de 30° par rapport à l’horizontale. Toutes les étapes comprises entre l’extraction de la silice et l’encadrement du module sont envisagées avec l’onduleur et le système de raccordement, en excluant toutefois la fin de vie et les émissions liées au transport.

Par ailleurs, on peut observer que les systèmes auxiliaires (onduleur et câblage) participent de manière non négligeable à l'impact environnemental total, surtout pour les catégories liées à la diminution des ressources minérales, à la toxicité humaine, à l'écotoxicité et l'eutrophisation d'eau douce et à l'écotoxicité marine. Cette observation concorde avec une étude réalisée par Parvez Mahmud et al. en 2018 (voir la figure des résultats ci-dessous), sur les panneaux monocristallins⁸ cette fois. L'étude arrive à la conclusion que l'onduleur est responsable d'une partie importante des impacts liés à l'écotoxicité d'eau douce, et dans une moindre mesure à l'utilisation du sol, l'eutrophisation marine et terrestre, la toxicité humaine, le changement climatique et la formation photochimique d'ozone. Pour le câblage, la contribution la plus importante concerne les critères de l'eutrophisation, l'écotoxicité d'eau douce et la toxicité humaine. Les systèmes auxiliaires ne font pas partie dans cette étude des éléments les plus impactants pour le critère de réduction des ressources, contrairement à l'analyse de l'Ulg. Ceci est dû à la prise en compte des batteries dans le système photovoltaïque, qui se trouve être de loin, en termes de contribution à l'impact total de ce critère, l'élément le plus influant.

⁸ Les étapes prises en compte sont l'extraction de matières premières, la production d'éléments clés, le transport, l'installation et la gestion des déchets. L'unité fonctionnelle de l'ACV est considérée comme 1 kWh de production d'énergie. Le système comprend un panneau monocristallin, un régulateur de charge, l'onduleur, un disjoncteur et une batterie.

Figure 11 : Profils environnementaux du système solaire PV monocristallin

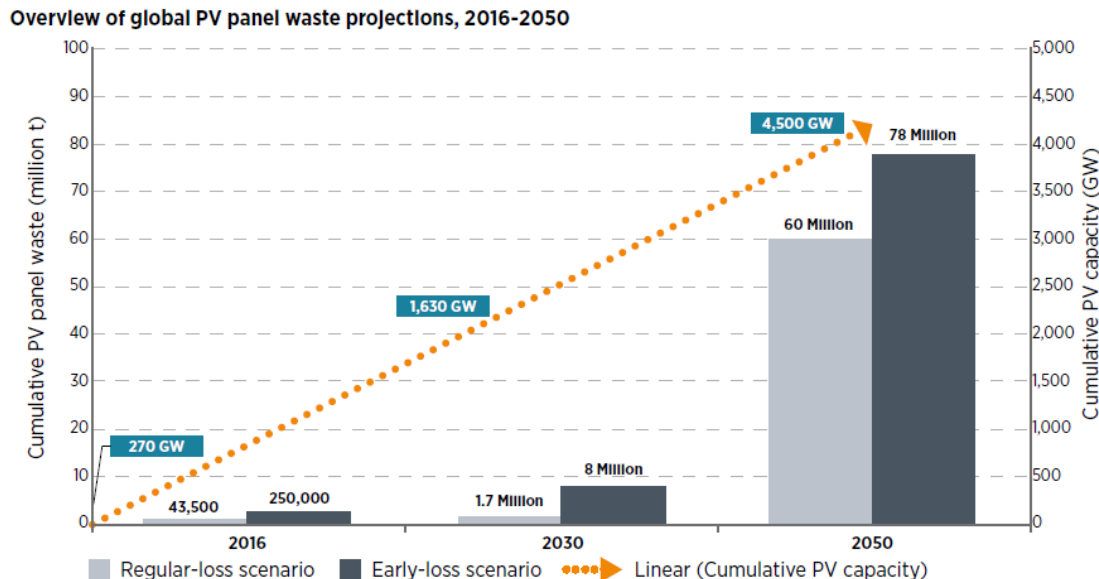


Source : Mahmud, M. A., Huda, N., Farjana, S., et Lang, C. « Environmental Impacts of Solar-Photovoltaic and Solar-Thermal Systems with Life-Cycle Assessment ». *Energies* 11 (septembre 2018): 2346.

2.3. Traitement en fin de vie

L'expansion du marché photovoltaïque signifie aussi qu'une augmentation des déchets en fin de vie est à prévoir dans les années à venir. D'après L'IRENA et l'IEA, la projection des volumes cumulés de déchets atteindrait 1,7 million de tonnes d'ici 2030 et 60 millions de tonnes d'ici 2050 (ce scénario prévoit une durée de vie moyenne des systèmes de 30 ans, les prévisions sont d'autant plus élevées que la durée de vie des systèmes prise en compte est raccourcie). Quand on sait que les déchets s'élevaient à 43 500 tonnes en 2016, l'augmentation à venir est spectaculaire et nécessite une gestion appropriée (IRENA, 2018).

Figure 12 : Projections de la quantité de déchets photovoltaïques, 2016 - 20150



Source : Circusol, basé sur l'étude de l'IRENA et l'IEA

Le processus de traitement de fin de vie des panneaux comprend elle aussi une multitude d'étapes : le transport vers le centre de recyclage, le démantèlement des modules avec le démontage du cadre métallique et de la boîte de jonction, l'élimination de l'encapsulant du laminat, le traitement des câbles, la séparation et le traitement du verre, l'incinération de certains matériaux, l'électrolyse pour récupérer des métaux des cellules de silicium, etc. jusqu'à la mise en déchetterie des éléments n'ayant pas pu être récupérés (Latunussa et al., 2016). Les principaux éléments ainsi récupérés sont l'**aluminium**, la **boîte de jonction**, le **cuivre**, des **câbles**⁹, du **verre**, du **silicium métal** et de l'**argent** (Latunussa et al., 2016; Stolz et al., 2018). Les trois approches d'élimination de l'encapsulant de la structure stratifiée existant à l'heure actuelle sont :

- L'approche thermique : la combustion/le brûlage ou un processus de craquage permettent de récupérer les matériaux principaux en chauffant les panneaux à une température très élevée.

⁹ Le taux de recyclage des métaux à partir des débris de câbles est de l'ordre de 94 à 99% (Latunussa et al., 2016).

- L'approche chimique : les modules sont immergés dans un solvant et les composants sont séparés par réactions chimiques. Cette approche peut atteindre un taux de récupération très élevé, mais s'avère également avoir un impact environnemental non négligeable dû à l'élimination des déchets acides à la suite du procédé chimique.
- L'approche mécanique qui décape, découpe et concasse les couches stratifiées. Elle permet d'obtenir un taux de récupération élevé bien que certains matériaux de faible masse ne puissent pas être récupérés. Elle peut donc être appliquée en combinaison de l'approche thermique et chimique pour présenter une récupération plus poussée.

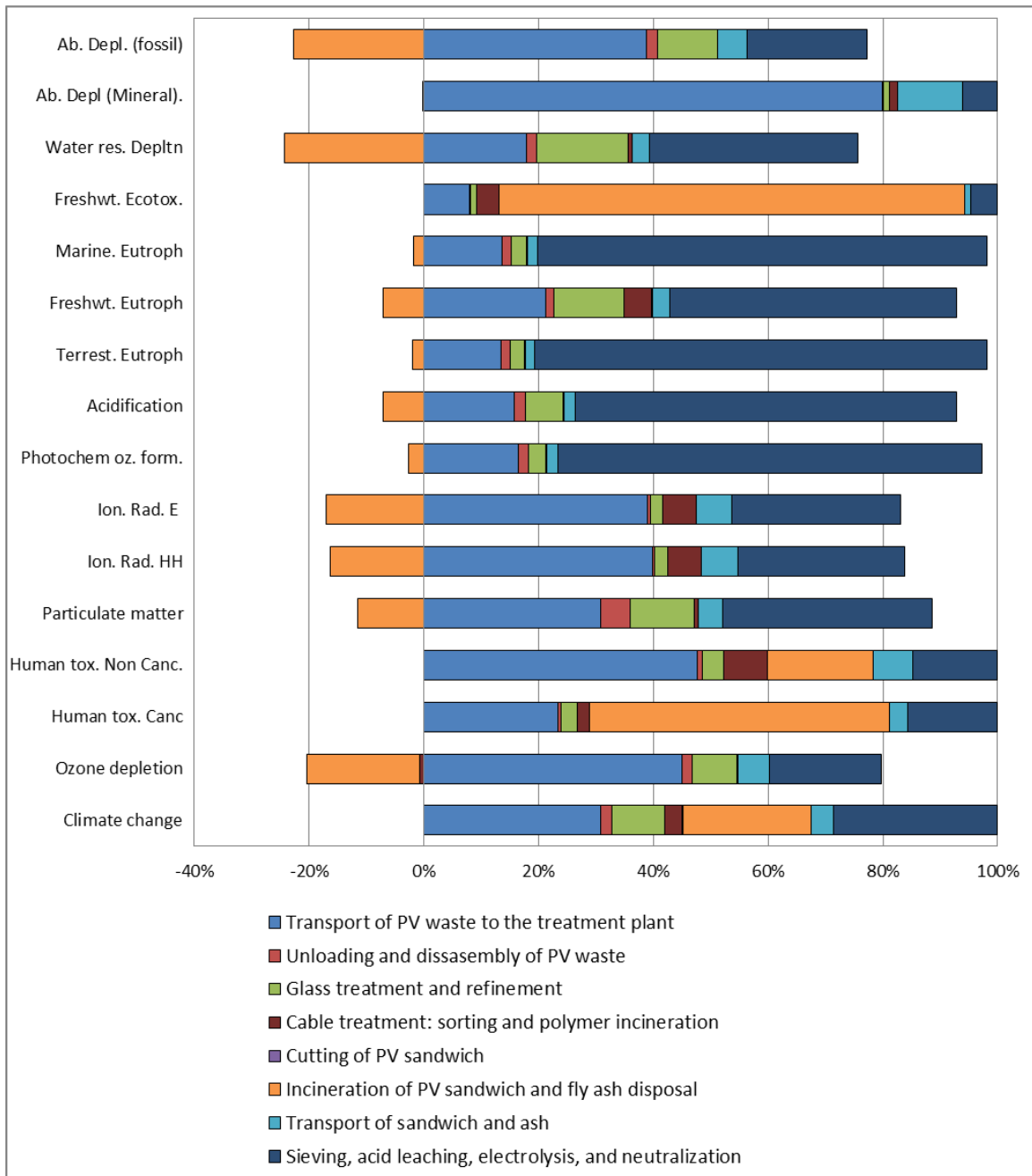
D'après une étude réalisée en 2018 par le Programme de systèmes d'énergie photovoltaïque de l'IEA qui s'est penchée sur *l'ACV du recyclage actuel des modules pv en Europe*, la récupération et le recyclage des matériaux des modules au silicium cristallin c-Si (en prenant la moyenne et la part respective des modules multi et monocristallins dans la capacité totale installée en Europe) a un impact environnemental moindre que l'extraction, le raffinage et l'approvisionnement de ces mêmes matériaux à partir de ressources primaires (Stolz et al., 2018).

Ce qui signifie que malgré le fait que le recyclage consomme une certaine quantité d'énergie pour traiter les matériaux et pouvoir leur donner une seconde vie, cette consommation est moindre que l'énergie qui serait dépensée à fabriquer cette même quantité de nouveaux matériaux. Les avantages potentiels pour la catégorie d'impact « épuisement des ressources minérales, fossiles et renouvelables » sont par exemple 54 fois plus élevés que les impacts causés par le recyclage des modules au silicium cristallin. Globalement, le recyclage amène un bénéfice¹⁰ environnemental net pour chaque catégorie analysée. Il peut cependant générer un impact qui contrebalancera en partie le bénéfice, principalement lors du **transport vers le centre de recyclage**, de **l'élimination des déchets résiduels** et dans une moindre mesure lors de la consommation d'électricité dans le centre de recyclage (Stolz et al., 2018).

¹⁰ Le bénéfice environnemental est la différence entre les impacts environnementaux causés par le recyclage des modules et les charges évitées grâce à la récupération des matériaux. Un chiffre négatif indique par conséquent que le processus de recyclage présente un avantage net pour l'environnement.

L'étude menée par le Joint Research Centre de la Commission européenne rejoint les résultats précédemment cités. Pour toutes les catégories d'impacts liées au traitement des déchets photovoltaïques de panneaux au silicium cristallin, ce sont les **processus du transport des déchets** vers l'entreprise, **l'incinération et le processus de récupération des métaux** (qui comprend le tamisage, la lixiviation acide - acid leaching, l'électrolyse et la neutralisation) qui contribuent le plus au potentiel d'impact total (Latunussa et al., 2016). Les résultats sont illustrés dans le graphique ci-dessous.

Figure 13 : La contribution potentielle de l'impact de chaque phase du traitement des déchets photovoltaïques

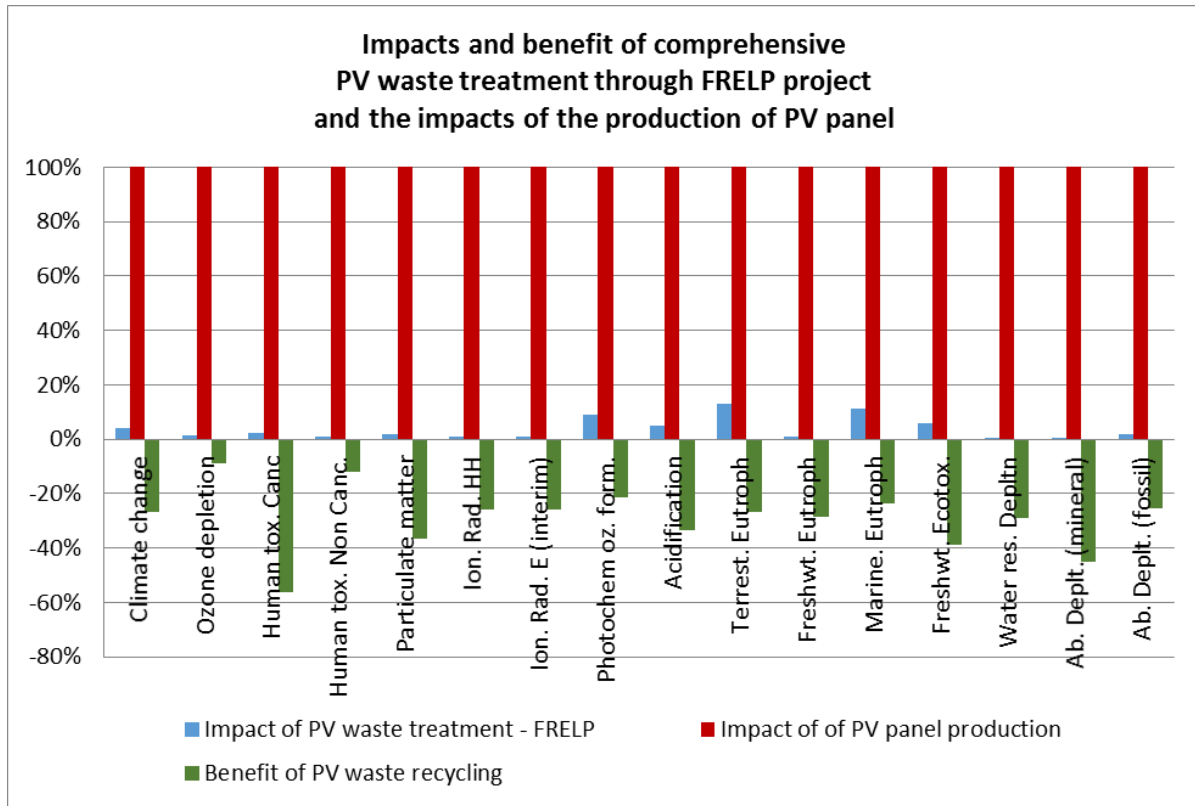


Source : Latunussa, Cynthia E. L, Lucia, Mancini. Blengini, Gian Andrea. Ardente, Fulvio. et Pennington, David. *Analysis of Material Recovery from Photovoltaic Panels - Life Cycle Assessment and Implications for Critical Raw Materials and Ecodesign*. 27797. Luxembourg: Publications Office, 2016.

Enfin, comme mentionné plus haut, les bénéfices environnementaux générés par le recyclage et l'évitement de la production de matériaux primaires pour la fabrication de panneaux sont illustrés dans la figure 14. Tout d'abord, il peut être observé que l'impact sur l'environnement

lié au recyclage est assez faible comparé à celui de la production. En outre, il existe des bénéfices potentiels au traitement des matériaux en fin de vie pour toutes les catégories considérées, ce qui montre bien que l'étape de fin de vie des systèmes photovoltaïque n'est pas à minimiser.

Figure 14 : Comparaison des impacts dûs à la production et au traitement des panneaux pv et des bénéfices potentiels dus à la production de matériaux secondaires



Source : Latunussa, Cynthia E. L, Lucia, Mancini, Blengini, Gian Andrea, Ardente, Fulvio, et Pennington, David. *Analysis of Material Recovery from Photovoltaic Panels - Life Cycle Assessment and Implications for Critical Raw Materials and Ecodesign*. 27797. Luxembourg: Publications Office, 2016.

2.3.1. Législation européenne relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques

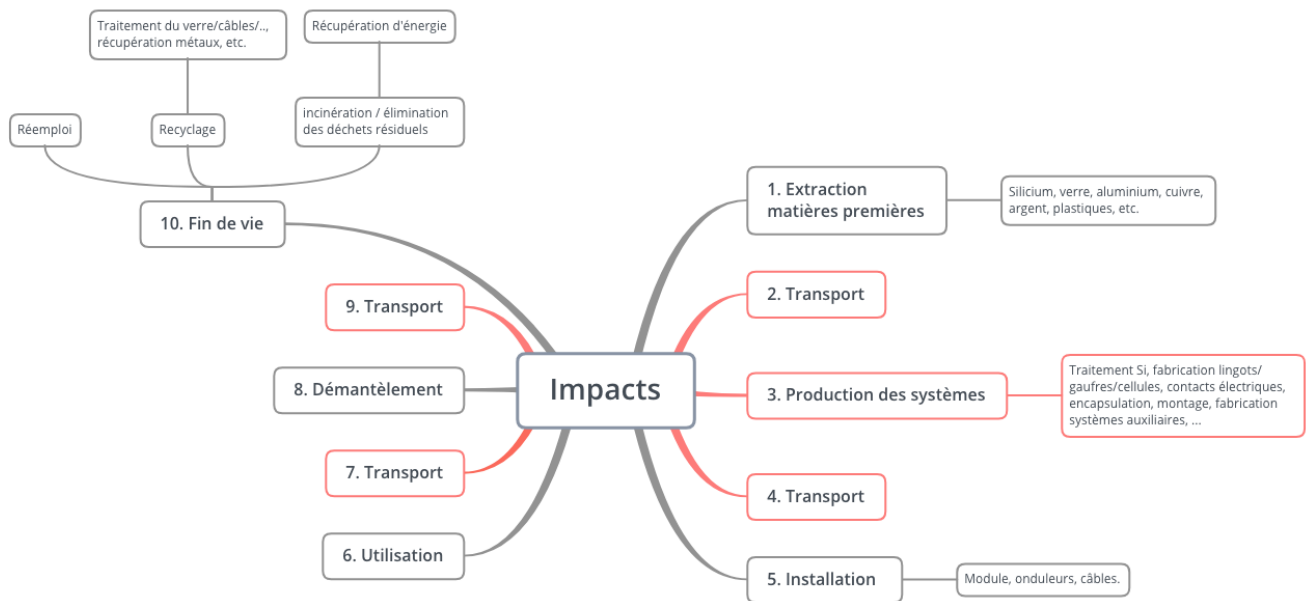
La directive 2012/19/UE relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE ou WEEE en anglais) est entrée en vigueur en août 2012 et devait être transposée par les États membres au plus tard le 14 février 2014.

Cette directive établit des règles quant à la gestion des DEEE en fin de vie et des objectifs de valorisation. Le taux de recyclage/préparation en vue de la réutilisation était globalement fixé à 65% en 2014 pour l'UE pour les équipements grand public et panneaux photovoltaïques. La Belgique, d'après le rapport sur « L'exercice de promotion de la conformité DEEE », dépassait largement cet objectif pour cette catégorie avec un taux effectif de recyclage de 84% cette même année (WEEE compliance promotion exercise, 2017). Les objectifs de cette directive ont été réexaminés en avril 2017 et il a été décidé qu'aucun changement ne se justifiait pour le moment (Commission européenne, 2017). De plus, cette directive inclut une obligation, d'une part, pour les producteurs (y compris fabricants, importateurs et installateurs) de financer la collecte et le traitement des produits en fin de vie, et d'autre part, pour les distributeurs d'informer les consommateurs sur les solutions de collecte disponibles. Les producteurs peuvent effectuer cette collecte et traitement à l'échelle individuelle ou passer par des organismes de gestion de déchets photovoltaïques spécialisés (tels que PV Cycle en Belgique). Jusqu'à présent, seule la Flandre a transposé la convention environnementale sur l'obligation de reprise des panneaux photovoltaïques. PV Cycle s'occupe déjà volontairement des panneaux en fin de vie en Wallonie et à Bruxelles, bien que les deux régions n'aient pas encore adopté cette directive propre aux panneaux solaires (WEEE compliance promotion exercise, 2017; entretien avec PV Cycle, 27 mars 2019).

Conclusion

En conclusion, les principales étapes du cycle de vie sont résumées dans la figure 15, qui souligne les étapes les plus impactantes en rouge.

Figure 15 : Récapitulatif des impacts environnementaux générés par un système photovoltaïque au silicium cristallin



Source : construction personnelle

Bien que la transformation de l'énergie solaire en énergie électrique n'émette pas de pollution en tant que tel, ce chapitre a permis de mettre en évidence que l'impact environnemental des modules photovoltaïques au silicium cristallin se situe principalement au niveau de la fabrication et du transport des modules. Plus spécifiquement, c'est la purification du silicium qui présente l'impact le plus élevé. Les étapes d'extraction des ressources, d'installation et de recyclage des modules présentent quant à elles un impact global plus faible. Enfin, chaque partie du système photovoltaïque impacte dans une mesure différente chaque critère pris en considération, certains ayant plus d'impact sur le changement climatique, comme c'est le cas pour l'étape de production de silicium de pureté suffisante et pour le transport cumulé, d'autres affectant davantage l'écotoxicité d'eau douce, comme c'est le cas pour l'onduleur. Il faut donc rester attentif que lors de l'étape d'écoconception, en améliorant un aspect du système, le gain environnemental spécifique réalisé ne se fasse pas au détriment d'autres aspects environnementaux.

Chapitre 3. Eco-conception

Maintenant que l'analyse des impacts environnementaux a été effectuée, comment peut-on les minimiser ? Une réflexion en amont de la chaîne de valeur doit être opérée, pour identifier les possibilités d'améliorations et d'innovations réalisables pour les acteurs du secteur.

Jusqu'à présent, les mesures et législations se sont focalisées sur le traitement en fin de vie des déchets photovoltaïques.

Or, il est également impératif de concevoir le produit, non seulement pour que ce traitement soit facilité (démantèlement et séparation des matériaux par exemple), mais aussi pour permettre une optimisation du choix des matériaux, de la production, des distances parcourues, de l'utilisation et de la fin de vie des systèmes.

C'est ce que ce chapitre tente de rassembler, à travers une démarche exploratoire des différentes pistes de solutions qui peuvent être prise en compte lors de l'étape d'écoconception. La démarche de recherche a été de rassembler plusieurs sources sur le sujet d'écoconception en général et sur les résultats de projets de R&D européens spécifiques au secteur photovoltaïque et de rencontrer des acteurs de terrain spécialisés dans le secteur photovoltaïque.

Les consultations ont permis de récolter des informations spécifiques aux acteurs/entreprises/marché et de confronter la faisabilité des critères d'écoconception considérés. Des entretiens ont été réalisés avec :

- Monsieur Bertrand Lempkowicz, Manager des relations publiques, de la communication et du marketing pour l'organisme de collecte PV Cycle (traitement en fin de vie)
- Monsieur Philippe Macé, Senior Analyst pour l'Institut Becquerel (experts du marché photovoltaïque mondial)
- Monsieur Sergio Vicini, Responsable commercial de l'entreprise Evocells (fabricant belge de panneaux solaires)
- Monsieur Sébastien La Fontaine, Project, production et process Manager de l'entreprise ISSOL (fabricant belge de panneaux solaires)

- Monsieur Laurent Noirhomme, Consultant pour des projets d'énergies renouvelables pour l'entreprise Sonck (fournisseurs et installateurs de systèmes photovoltaïques en Belgique).

Ainsi, un tableau récapitulatif comprenant tous les critères d'écoconception envisageables pour les systèmes photovoltaïques a été créé (voir section 3.2.).

3.1. En quoi consiste l'éco-conception ?

Plusieurs définitions de l'écoconception coexistent, certaines se limitent aux impacts environnementaux tandis que d'autres s'élargissent à des dimensions sociales et sociétales.

D'après la définition du Larousse, l'écoconception est la « *prise en compte des critères environnementaux dans la phase de conception d'un produit* ». La norme ISO 14006 mentionne quant à elle que « *l'écoconception est l'intégration des aspects environnementaux dans le développement de la conception d'un produit dans le but de réduire les impacts environnementaux négatifs tout au long de son cycle de vie* ». En bref, cette démarche a pour but de se placer en amont de la chaîne de valeur/approvisionnement et de repenser le produit pour réduire les impacts environnementaux tout en conservant la qualité d'usage de celui-ci. Elle fait partie intégrante du concept d'économie circulaire qui vise à rendre l'utilisation des ressources plus efficiente et à diminuer l'impact sur l'environnement.

- L'écoconception est une démarche **multi-étapes** car elle passe par une analyse des impacts initiaux pour chaque étape du cycle de vie, par l'imagination et la création de critères innovants jusqu'à la réalisation et la vérification des nouveaux éléments mis en place.
- Elle est également **multi-critères** puisqu'elle tient compte des consommations de ressources et d'énergie mais également des rejets de déchets, des effets sur le climat, la biodiversité etc.

- Enfin, c'est une démarche **multi-acteurs** qui implique une bonne coordination/collaboration entre les différentes parties prenantes pour être réussie (Faure, 2016).
- Je rajouterai qu'elle est également **multi-dimensions**, car à côté des aspects environnementaux, l'écoconception peut agir comme levier de croissance économique pour les entreprises, de par l'innovation, la différenciation, l'adéquation de l'offre aux attentes des consommateurs et la gestion des coûts qu'elle apporte. De plus, certains prennent en compte des variables sociétales telles que les conditions de travail et de santé des employés, le respect des populations locales lors de l'approvisionnement en matières premières ou encore la transparence vis-à-vis des consommateurs sur le produit. L'écoconception s'inscrit alors dans un objectif plus large de conception responsable (Teulon, 2015; Faure, 2016).

Ces dimensions sont toutes importantes, mais nous nous limiterons cependant à la dimension environnementale pour ce travail.

Il existe en outre différents niveaux d'actions d'écoconception, qui peuvent être très sélectifs et confinés ou exploratoires, innovants et systémiques. Plus précisément, une meilleure conception peut commencer par **améliorer** le bien ou service en travaillant sur un ou plusieurs composants, sans modification technologique majeure. Un second niveau peut aller un peu plus loin en **repensant** l'architecture du bien, sans en changer le concept. **L'innovation fonctionnelle** va plus loin encore et crée un nouveau concept ou change la technologie utilisée. La fonction du produit est alors modifiée. Enfin, **l'innovation du système** propose une organisation tout à fait différente qui nécessite des changements sur la chaîne de valeur, sur les infrastructures en place et sur le modèle économique, voire culturel (Abrassart, 2012; Faure, 2016).

Cependant, n'oublions pas qu'une nouvelle conception peut être encouragée par des motivations environnementales, mais également par des raisons économiques de concurrence de marché entre fabricants qui les conduisent par exemple à réduire au maximum la quantité de matériaux utilisés pour réduire les coûts à court terme. Cette concurrence couplée à la

délocalisation fréquente de la fabrication des systèmes photovoltaïques hors des frontières européennes peut limiter l'influence des acteurs européens sur une écoconception plus poussée.

L'écoconception d'un produit passe au préalable par une bonne compréhension du profil environnemental de celui-ci. C'est pour cette raison que l'analyse du cycle de vie (ACV) est fréquemment utilisée comme méthode de référence pour une évaluation environnementale exhaustive. Nous allons donc utiliser les points critiques identifiés précédemment pour imaginer et sélectionner des solutions.

3.2. Critères d'écoconception

Quels sont les points à étudier pour permettre aux systèmes photovoltaïques de prendre en compte l'écoconception ? Le tableau ci-dessous synthétise par phase du cycle de vie les différentes opportunités à envisager lors de l'étape de conception.

Tableau 3 : Critères d'écoconception pour un système photovoltaïque

Critères d'écoconception	
Matériaux	Minimiser la quantité de matières premières : argent, cuivre, gaz argon, cellules de silicium plus fines, ...
	Choisir des matériaux à impact réduit (non toxiques, plus abondants, moins énergivores, recyclés, recyclables, évaluer la substituabilité)
Transport	Minimiser les distances <ul style="list-style-type: none"> Mettre en place des infrastructures décentralisées Optimiser le remplissage Utiliser des transports durables
Technologies de fabrication propres	Réduire la consommation d'énergie
	Réduire les émissions polluantes (eau, air, sol)
	Réduire la production de déchets
	Maximiser l'utilisation d'électricité renouvelable lors de l'étape de fabrication
Packaging	Favoriser un packaging écologique
Maintenance	Limiter le besoin d'entretien
Durabilité	Augmenter la durée de vie effective

	Augmenter le potentiel de réparation pendant la durée de vie
Fonctionnalité accrue	Augmenter le rendement de conversion
Fin de vie	Faciliter le démantèlement et la séparation des matériaux
	<p>Valorisation</p> <ul style="list-style-type: none"> Réemploi des parties / matériaux encore fonctionnels Recyclage des modules et des ressources générées lors du processus de fabrication pour le marché pv ou autres marchés Valorisation énergétique (récupération d'énergie lors de l'élimination des déchets résiduels)
	Optimiser la coordination entre les différents acteurs intervenant en fin de vie (entreprises, collecteurs, recycleurs de déchets, transformateurs de matières secondaires)
Consommateur	<p>Informer/conseiller/sensibiliser les consommateurs</p> <ul style="list-style-type: none"> Conseils d'entretien pour une durée de vie plus longue Prévenir la mise au rebut prématurée Développer l'attachement de l'utilisateur Informé des mesures de collecte et de gestion de fin de vie

Source : Liste de critères construit sur la base des recherches et entretiens effectués dans le cadre du mémoire et inspiré des éco-solutions d'OpenGreen proposées pour tout type de produit (Teulon, 2015).

Pour synthétiser les améliorations possibles reprises dans le tableau ci-dessus, remettons-les en lien avec les enjeux environnementaux des systèmes photovoltaïques, qui sont les suivants :

- Améliorer le bilan énergétique sur la durée de vie du système → cette amélioration peut se faire en réduisant les énergies primaires dépensées pour produire, transporter, installer, démanteler et recycler ce système, en augmentant le rendement de conversion du module, ou encore sa durée de vie.
- Réduire les impacts des activités → moins de déchets en recyclant plus, moins de rejets de polluants dans l'air, l'eau, les sols, moins de distances entre chaque phase du cycle de vie, moins de consommation d'énergie ou avec une utilisation plus poussée d'énergies renouvelables.

- Limiter au maximum l'utilisation de ressources critiques → en réduisant la quantité de matières premières, en recyclant ces matières, en substituant par d'autres matériaux plus abondants lorsque c'est possible.
- Permettre le meilleur recyclage possible en fin de vie → en augmentant le taux effectif de recyclage par un meilleur tri, un assemblage qui facilite le démantèlement ou avec des technologies plus performantes qui permettent de récupérer plus de matériaux/présents en quantités infimes.

3.3. Initiatives existantes

Cette partie détaille les initiatives et projets existants qui intègrent la démarche d'écoconception pour les systèmes photovoltaïques. Elle permettra de voir quel est le cadre législatif actuel en Europe, quelles sont les mesures déjà implémentées et quels sont les résultats de certains projets de recherche et développement.

- **Directive européenne Ecodesign**

La directive européenne 2009/125/EC fixe des exigences minimales obligatoires en matière d'écoconception pour l'efficacité énergétique applicables à une vingtaine de produits. Cependant, les panneaux solaires ne font pas partie des équipements de la liste. La directive actuelle couvre les impacts environnementaux en mettant principalement l'accent sur des améliorations d'efficacité énergétique. A l'avenir, les exigences seront plus globales et porteront plus systématiquement sur l'économie circulaire, en incluant par exemple la durabilité et la recyclabilité des matériaux.

A la suite du dernier Working Plan 2016-2019 publié en 2016, les panneaux photovoltaïques et les onduleurs font partie des nouveaux produits considérés et font l'objet d'études préparatoires qui évalueront le potentiel d'économies d'énergie réalisable. La date de publication des résultats et les exigences sélectionnées par la directive ne sont pas encore connues.

- **Gestion de fin de vie : PV Cycle**

L'asbl PV Cycle est l'unique système de gestion de déchets photovoltaïques soutenu par les pouvoirs publics belges. PV Cycle, qui collabore avec différents partenaires de collecte et recyclage indépendants, assure depuis 2016 la **collecte** des panneaux en fin de vie, la conformité du distributeur ainsi que celle du producteur.

L'entreprise a développé un réseau de collecte dans les installations des entreprises de panneaux photovoltaïques, afin de faciliter la remise des panneaux usagés. Une fois les panneaux collectés, ils sont envoyés vers des centres de recyclage en Belgique. Il existe trois centres de recyclage dans le pays : à Hasselt, près d'Anvers et en Wallonie. Certains centres s'occupent du recyclage dans son intégralité, d'autres traitent une partie des composants et envoient le reste vers d'autres centres spécialisés. Le taux de recyclage s'élève, d'après Bertrand Lempkowicz, responsable des relations publiques de PV Cycle (entretien du 27 mars 2019), entre 90 et 95% en Belgique, ce qui est d'ores et déjà un taux très élevé. De plus, les déchets résiduels partent soit en recouvrement énergétique par incinération, soit en décharge, pour être notamment utilisés dans la construction ou dans le goudron, comme stabilisateurs.

En parallèle de son activité de gestion, l'asbl et ses partenaires supportent plusieurs projets de R&D en Europe :

- Full Recovery End-of-Life Photovoltaic (FRELP) : ce projet examine des approches de taux de recyclage de 100% pour les modules photovoltaïques. Des méthodes de traitement sont développées pour : la récupération du verre pour le réutiliser dans l'industrie du verre creux et plat, la récupération du silicium, destiné à être réutilisé comme ferrosilicium ou transformé en silicium amorphe, en fonction de l'état de pureté de l'élément. Finalement, FRELP vise également la récupération de l'aluminium, des connecteurs, d'énergie du sandwich d'EVA et des divers métaux. En juillet 2015, une phase test a été exécutée et le rendement total de recyclage a atteint 93%, la perte étant liée aux plastiques destinés à la combustion et aux métaux

résiduels récupérés comme les hydroxydes. Selon les dernières prévisions du projet disponibles sur leur site, une usine pilote devait être opérationnelle à partir de 2017.

- ReSolar : initiative belge conjointe entre les recycleurs de déchets et les entreprises de transformation des matériaux qui explore les améliorations de collecte et de recyclage via une amélioration de la communication et un meilleur alignement entre acteurs.
- CABRISS : est focalisé sur l'implémentation d'une économie circulaire basée sur le recyclage, réemploi et la réutilisation de l'indium, du silicium et de l'argent pour les applications photovoltaïques et autres. Le projet a été lancé en 2015.
- Circusol : initiative européenne qui vise à augmenter la durée de vie, faciliter la réparabilité et optimiser le matériel utilisé en utilisant un système de produit-service. Le système de produit-service laisse la propriété du produit au fournisseur, pour le pousser à proposer un produit de qualité qui dure longtemps, plutôt que de pousser à la consommation et au remplacement prématuré.
- Photovoltaic Panels Mobile Recycling Device (PV Morede) – projet clos pour cause d'insolvabilité : le PV MoReDe est une installation mobile pour le recyclage des modules qui est capable de fonctionner directement là où les modules sont installés et de recycler 98% du contenu d'un panneau. Les deux dispositifs mobiles ont pour but de remplacer le traitement thermique-chimique par un processus exclusivement mécanique.
- Cradle-to-cradle Sustainable PV modules (CU-PV) – projet clos en 2016 : CU-PV a particulièrement étudié depuis 2012 la réduction de quantité de matières premières dans les modules au silicium cristallin. Le projet a développé des cellules solaires qui utilisent moins de silicium, en réduisant l'épaisseur des gaufres. De plus, il a mis au point de nouvelles méthodes de métallisation qui entraînent une réduction de 70 à

90% de la consommation d'argent (en le remplaçant notamment par du cuivre qui est mille fois plus abondant), ont évité l'utilisation de plomb en soustrayant l'utilisation de soudure pour l'interconnexion des cellules et ont travaillé à améliorer la recyclabilité par une conception plus poussée (approche Cradle-to-Cradle). Le projet espère que les technologies et méthodes développées soient mis en œuvre à l'échelle industrielle quelques années après la production pilote.

L'asbl PV Cycle souhaite ainsi intégrer des aspects d'écoconception plus poussés pour sa filière à l'avenir. Les avancées les plus récentes se font en France, avec par exemple à Rousset le lancement de la première usine de recyclage 100% dédiée aux modules photovoltaïques en collaboration avec Veolia.

Par ailleurs, l'entretien avec Bertrand Lempkowitz (27 mars 2019) a permis de confronter les critères d'écoconception identifiés pour la fin de vie des panneaux avec **les limitations du marché belge.**

Premièrement, lorsqu'on parle d'améliorer le taux de recyclage, un problème de choix se pose. En effet, les entreprises n'ont à ce jour pas de contrôle en Belgique concernant la fin de vie des panneaux. Les panneaux sont, soit automatiquement gérés par PV Cycle et les recycleurs partenaires, soit recyclés par l'entreprise elle-même si elle décide de monter sa propre usine de recyclage, ce qui représente un coût et une gestion colossale. Le choix ne se pose donc pas à l'heure actuelle d'augmenter le taux effectif de recyclage décidé par les fournisseurs/revendeurs de systèmes photovoltaïques. C'est notamment le cas pour le traitement de l'argent et du cuivre présents dans les panneaux, qui sont techniquement recyclables mais pratiquement pas recyclés (ils restent dans les morceaux de silicium) car cela coûte trop cher.

Deuxièmement, il est possible, avant qu'un module ne soit recyclé, de réemployer certains équipements fonctionnels en les réinjectant sur le marché comme produit de seconde main. C'est le cas pour certaines cellules de panneaux encore parfaitement performantes ou pour des panneaux qui ont un rendement inférieur au bout de 20 ans mais qui sont encore fonctionnels. En Belgique, à partir du moment où les modules

sont déposés à un point de collecte, ils sont considérés comme déchet et ne peuvent pas ressortir de l'usine pour être réemployés même si les cellules sont encore fonctionnelles. Les modules sont directement recyclés et il n'y a donc pas de réemploi de panneaux ou composants.

Finalement, le transport entre les points de collecte et les usines de recyclage est assuré par une entreprise sous-traitée. Les camions n'appartiennent pas à Pv Cycle, ce qui rend l'idée d'utiliser des camions fonctionnant à l'énergie renouvelable inexécutable pour l'heure.

Le fait que le développement de l'écoconception pour le recyclage est dépendant de l'organisme de collecte et de recyclage et non pas des fournisseurs de systèmes photovoltaïques, nous empêche d'inclure ces critères dans le label écologique.

- **Eco-Solar**

Eco-Solar (projet financé par le programme de recherche d'innovation Horizon 2020 de l'UE) collabore avec plusieurs partenaires dont Appollon Solar qui travaille sur une nouvelle encapsulation de cellules industrielles, et International Solar Energy Research Centre Konstanz qui recherche et développe de nouveaux concepts pour les cellules. Eco-solar explorait jusqu'en 2018:

- Une réduction de la quantité d'aluminium, de céramique, de silicium, d'organiques, d'argent et d'eau dé-ionisée.
- Le recyclage du gaz d'argon (utilisé pour éliminer les contaminants lors de la production de cristaux et de lingots et qui est actuellement rejeté dans l'air).
- Un nouveau procédé de sciage au fil avec fil diamanté plus fin et un procédé de récupération de copeaux de silicium à partir du liquide de refroidissement des machines à scier.
- Un nouveau procédé pour les cellules au silicium multicristallin uniquement.
- L'utilisation d'un module NIC E sans EVA avec ou sans cadre en verre.

Après implémentation des projets, il en est ressorti que pour les modules au silicium monocristallin, une réduction jusqu'à 0,46kg d'argon et 1kg d'aluminium par module peut être atteinte. La demande de céramique peut par ailleurs être réduite de 7,9%, tout comme celle de silicium de 7,9% et la demande d'organiques de plus de 74%.

En ce qui concerne les modules au silicium multicristallin, la réduction d'1kg d'aluminium peut être totalement atteinte. D'autres réductions présentent des bénéfices : la demande de gaz argon peut être réduite d'environ 92%, la demande de céramique d'environ 18%, la demande de silicium d'environ 7,9% et celle de matières organiques de plus de 74%. Seuls les ambitions relatives à la demande d'argent et à l'eau dé-ionisée présentent des bénéfices inférieurs aux autres objectifs cibles.

Ces résultats prouvent qu'il est possible, dans une certaine mesure, de réduire l'utilisation de certains composants des modules photovoltaïques et de fonctionner en boucles fermées en récupérant une partie de ces matériaux (gaz d'argon, silicium perdu lors de la fabrication des cellules, ...) pour les réutiliser sur le marché des panneaux solaires ou pour d'autres industries. Ce recyclage plus poussé évite, dès lors, la production de nouveaux modules ou parties de modules et réduit, par ailleurs, le risque d'approvisionnement et la dépendance à l'importation de ces matières premières. Une réduction de la consommation d'énergie et de matériaux peut être réalisée, tout en maintenant l'efficacité des cellules et la durée de vie des modules.

Il semblerait, malgré ces résultats, que la dernière étape nécessaire à la diffusion à grande échelle des découvertes déjà réalisées soit la mise en œuvre de ces technologies dans la production de masse des entreprises industrielles présentes sur le marché, ainsi qu'une réduction des coûts inhérents au recyclage plus poussé, frein majeur pour aller plus loin à court terme.

- **Onduleurs : Cefem Solar**

Enfin, en ce qui concerne les onduleurs, bien que les R&D soient plus limitées, l'entreprise Cefem Solar a lancé un site de production français d'onduleurs qui intègre des aspects d'écoconception. 80% des pièces sont par exemple fabriquées en France, l'assemblage de

tous les composants est effectué sur le site de production et l'onduleur est réparable. De plus, par souci de transparence, l'entreprise affiche toutes les spécificités techniques du produit ainsi que les détails de prix de revient par famille de fonction (main d'œuvre, électronique, mécanique, magnétique et divers) avec la proportion fabriquée en France pour chaque catégorie (voir tableau détaillé en annexe). Cette démarche est unique, car d'une part, aucune donnée de ce genre n'a pu être trouvée sur les sites des grands fabricants d'onduleurs. D'autre part, les onduleurs classiques présentent une durée de vie deux fois plus faible que les modules, il est essentiel d'améliorer la réparabilité et la durée de vie de ces systèmes auxiliaires. Le choix d'onduleur tel que celui de Cefem Solar favorisera une meilleure prise en compte de l'écoconception.

Conclusion :

A la suite des recherches effectuées, nous pouvons conclure que **l'écoconception n'est pas un frein au développement (de nouvelles technologies) du photovoltaïque**. Elle est même un driver des R&D récentes, qui tendent à mieux inclure cette démarche dans la production à venir. En pratique, le plus gros **obstacle** à l'inclusion de l'écoconception demeure le **manque de contrôle sur la chaîne de valeur et d'approvisionnement**, tant au niveau de la fabrication délocalisée des panneaux qu'au niveau du recyclage centralisé en Belgique, qui permet de collecter 100% des panneaux en fin de vie, mais qui, en étant indépendant des fournisseurs, limite leur levier d'influence sur un recyclage plus poussé et dilue le champ d'action par rapport à l'écoconception.

Un second obstacle prédominant porte sur la recherche de **minimisation du coût**. Cette vision réduit les efforts menés, alors même que les techniques actuelles permettent d'aller plus loin. Enfin, Philippe Macé de l'Institut Becquerel (entretien du 4 avril 2019) souligne l'importance des **lobbies de l'industrie solaire** comme frein majeur. Ces lobbies s'assurent que le débat soit maintenu sur certains points clés d'intérêt tel que l'energy payback time (qui peut être amélioré en augmentant l'efficacité, en réduisant la consommation d'énergie ou en augmentant la durée de vie du produit) plutôt que sur d'autres critères qui obligeraient à revoir en profondeur la manière dont les modules sont conçus et fabriqués.

Cette conclusion se retrouve dans le tableau ci-dessous, où les critères d'écoconception précédemment identifiés sont mis en comparaison avec une évaluation de la faisabilité à grande échelle et de l'état d'avancement en Belgique. Les critères en orange présentent un faible **potentiel de pouvoir être intégrés à un label écologique pour les fournisseurs de panneaux solaires**, avec une brève explication de la raison dans la seconde colonne. Les critères présents en vert offrent, quant à eux, un potentiel d'amélioration pour la prise en compte de l'écoconception.

Tableau 4 : Evaluation de la faisabilité pratique à large échelle des critères d'écoconception et de l'état d'avancement en Belgique

Critères d'écoconception	Faisabilité pratique à large échelle/ Etat d'avancement en Belgique
Minimiser la quantité de matières premières : argent, cuivre, gaz argon, cellules de silicium plus fines, ...	Manque de contrôle sur le processus de fabrication qui s'effectue majoritairement en Chine et nécessite un investissement dans des technologies de pointe, malgré la faisabilité technique qui a été démontrée (ie. CU-PV et Eco-Solar)
Choisir des matériaux à impact réduit (non toxiques, plus abondants, moins énergivores, recyclés, recyclables, évaluer la substituabilité)	Manque de contrôle sur le processus de fabrication qui s'effectue majoritairement en Chine mais possibilités de fonctionner plus en boucle fermée avec des matériaux recyclés pour les fabricants européens
Minimiser les distances : 1) Mettre en place des infrastructures décentralisées 2) Optimiser le remplissage 3) Utiliser des transports durables	Infrastructures décentralisées déjà en place en Belgique avec optimisation du remplissage des camions pour le recyclage Choix de transports durables possible avec optimisation de remplissage possible pour les installateurs (il existe plus de 2500 zones de recharges pour les véhicules électriques en Belgique) Pour les panneaux provenant d'Asie, il reste difficile de réduire les distances entre la phase de fabrication et de distribution
Réduire la consommation d'énergie lors de la fabrication	Manque de contrôle sur les entreprises asiatiques, même si : - Une entreprise plus respectueuse de l'environnement peut être choisie (pour les panneaux ou les onduleurs) - La faisabilité technique a été démontrée lors de
Réduire les émissions (eau, air, sol) lors de la fabrication	
Réduire la production de déchets lors de la fabrication	

Maximiser l'utilisation d'électricité renouvelable lors de l'étape de fabrication	projets de R&D (ie. CU-PV et Eco-Solar) ainsi que pour des entreprises belges telles qu'Evocells ou ISSOL, qui réduisent leur empreinte carbone en contrôlant une grande partie de la production des modules (moins de distances parcourues en s'approvisionnant chez des fournisseurs européens lorsque cela est possible ¹¹ , moins de déchets générés, revente de panneaux « non fonctionnels » plutôt que de les jeter, packaging écologique)
Favoriser un packaging écologique	
Limiter le besoin d'entretien	Durée de vie effective déjà très élevée : les modules reviennent actuellement après 30 ans en moyenne et ceux installés aujourd'hui tiendront en moyenne 40 ans. De plus, le fournisseur a la possibilité de choisir une marque de panneaux offrant la meilleure qualité (panel de choix de marques).
Augmenter la durée de vie effective	
Augmenter le potentiel de réparation pendant la durée de vie	Mettre en place des systèmes d'assistance réparation gratuits par le fournisseur, comme c'est le cas pour Evocells par exemple
Augmenter le rendement de conversion	Peu de différences entre les technologies actuelles pour le silicium cristallin
Faciliter le démantèlement et la séparation des matériaux	Doit être effectué en amont lors de la fabrication
<p>Valorisation :</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Réemploi des parties / matériaux encore fonctionnels 2) Recyclage des modules et des ressources générées lors du processus de fabrication pour le marché pv ou autres marchés 3) Valorisation énergétique (récupération d'énergie lors de l'élimination des déchets résiduels) 	<p>Le fournisseur n'a aucun contrôle sur la fin de vie. Pas de réemploi en Belgique à partir du moment où le module est déposé à un point de collecte. Recyclage déjà poussé (96%) mais pas de traitement de l'Ag et Cu présents dans les panneaux car trop cher.</p> <p>Valorisation énergétique déjà effectuée.</p>
Optimiser la coordination entre les différents acteurs intervenant en fin de vie (entreprises, collecteurs, recycleurs de déchets, transformateurs de matières secondaires)	

¹¹ Chez Evocells, seules les cellules, depuis octobre 2018 (ils s'approvisionnaient auparavant chez le fournisseur allemand SolarWorld), et les boîtes de jonction proviennent d'un fournisseur non européen (Taïwan). Chez ISSOL, l'encapsulant est fabriqué en Thaïlande et les cellules proviennent de Taïwan ou de Chine. Les autres composants proviennent tous de fournisseurs européens.

Informer/conseiller/sensibiliser les consommateurs :

- 1) Conseils d'entretien pour une durée de vie plus longue
- 2) Prévenir la mise au rebut prématurée
- 3) Développer l'attachement de l'utilisateur
- 4) Informer des mesures de collecte et de gestion de fin de vie

Stratégie de communication systématique à mettre en place

Chapitre 4. Développement et création d'un éco-label

Un label écologique est une forme de déclaration environnementale qui valorise les produits respectant des exigences environnementales définies. Il ne doit pas être confondu avec deux autres formes de déclarations : les auto-déclarations qui sont des allégations véhiculées par un producteur sous sa propre responsabilité, de même que les écoprofiles ou affichages environnementaux, qui mettent à disposition des données quantitatives sur les impacts environnementaux d'un produit (ADEME; Czarnecki et al, 2018 ; Faure, 2016; Houe et Grabot, 2009). Les types d'éco-labels existants présentent toutefois de nombreuses nuances et variations, en se superposant parfois avec les auto-déclarations ou les écoprofiles.

Le label écologique prend en considération le cycle de vie du produit en garantissant que celui-ci est performant quant à son impact sur l'environnement, et dans son efficacité, parce qu'il garde sa qualité d'usage. Les phases d'analyse de cycle de vie et d'écoconception permettent de représenter l'ensemble des processus et impacts environnementaux du produit, avec une identification des opportunités d'amélioration. Une fois ces étapes réalisées, il est nécessaire de **se focaliser sur les éléments qui présentent l'impact le plus élevé et les plus facilement modifiables.**

Le but est d'aider les professionnels et le grand public à identifier les produits de bonne qualité, d'augmenter la transparence et d'encourager la transition vers une économie industrielle circulaire et durable.

Ces dernières années, le développement de labels écologiques a été motivé par l'intérêt de fournir des informations aux consommateurs sur les attributs environnementaux d'un produit et leur permettre d'effectuer des choix consistants par rapport à leurs préférences. Bien qu'il existe un consensus sur l'utilité d'un éco-label, certaines interrogations persistent quant à la meilleure façon de le concevoir et de l'implémenter, et quant au type de label utiliser pour optimiser l'efficacité sur les comportements des consommateurs. De même, il est

important de noter que le succès d'un label peut fortement dépendre du contexte social qui peut influencer les comportements et propensions d'achat (Czarnezki et al, 2018).

Sur base de recherches de création d'un label écologique et d'entretiens avec différents acteurs du secteur photovoltaïque, nous analysons la faisabilité pratique de la mise sur pied d'un éco-label en confrontant les réalités du terrain avec le choix des critères d'écoconception qui seraient intégrés à ce label.

4.1. Caractéristiques générales d'un éco-label

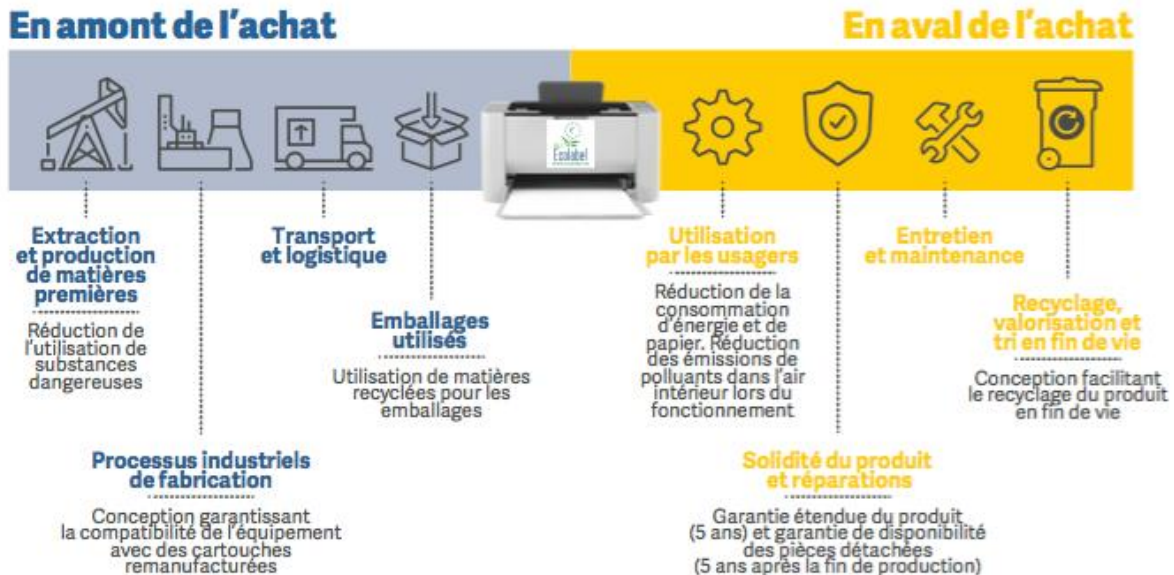
Un éco-label permet de respecter des critères d'exigence et de fournir un cadre pour avancer et faire progresser l'impact environnemental des entreprises. Il garantit que le produit est plus respectueux de l'environnement à toutes les étapes de sa vie. Les entreprises qui souhaitent se faire certifier par l'éco-label européen doivent présenter à l'organisme certificateur un dossier attestant qu'ils respectent les critères exigés (composition détaillée des produits, tests menés en laboratoire, etc.).

Un éco-label peut en général couvrir des critères tels qu'un seuil minimum d'utilisation d'énergies renouvelables, une limitation de la consommation d'eau, de l'usage des produits nocifs pour l'environnement, un tri obligatoire des déchets, le choix de ne pas utiliser de produits emballés individuellement, les partenariats avec des fournisseurs locaux, faciliter la réparabilité du produit, etc.. Nous citerons à titre d'exemple, le label écologique européen pour les ordinateurs personnels. Il garantit notamment une réduction de la consommation d'énergie pendant l'utilisation et en mode veille, une utilisation limitée de substances nocives pour l'environnement et la santé, une réduction de l'utilisation des ressources naturelles en encourageant le recyclage et une augmentation de la durée de vie du produit grâce à des mises à jour faciles.

Toujours dans le domaine des ordinateurs, un large panel de labels existe, citons entre autres l'écolabel européen, le label Epeat, l'écolabel nordique, Blue Angel et TCO Certified (ADEME).

A titre de deuxième exemple, voici les critères imposés aux imprimantes pour l'écolabel européen (dans la catégorie équipements d'imagerie) :

Figure 16 : Critères de l'Ecolabel européen pour les imprimantes tout au long du cycle de vie



Source : ADEME. « Vos achats responsables avec l'Ecolabel Européen : simplicité et fiabilité », n° N° 010324 (septembre 2017).

Néanmoins, à l'échelle européenne, aucun label n'a encore été spécifiquement créé pour les systèmes photovoltaïques.

Précisément, on parle souvent de label, mais aussi de normes, de certification et de qualification. Il est dès lors utile de définir chacun de ces concepts, qui diffèrent et se chevauchent également. Par exemple, un label peut nécessiter une certification préalable avant d'être délivré ou être simplement déclaratif (comme pour le label EPEAT). Une certification peut être volontaire ou obligatoire pour certains produits devant suivre des normes spécifiques avant d'être mis en vente sur le marché. Le tableau ci-dessous reprend les caractéristiques d'une norme, d'un label, d'une certification et d'une qualification :

Tableau 5 : Caractéristiques et distinction entre un norme, certification, qualification et label de qualité

Démarche environnementale	Définition
Norme	Référentiel précisant les caractéristiques à exiger d'un produit ou d'un service de qualité vérifié par des organismes officiels de normalisation. Les normes sont volontaires ou obligatoires si elles existent pour se conformer aux réglementations spécifiques.
Certification	Atteste qu'un produit ou un service est conforme aux normes en vigueur ou à des spécifications supplémentaires. Le terme, au sens large, désigne toutes les démarches nécessitant un audit de contrôle par un tiers indépendant avant d'être validée et de donner droit à l'utilisation d'une marque de qualité comme un label.
Qualification	S'attache plutôt à reconnaître les compétences et la qualité du travail fournis par une entreprise dans un secteur bien particulier (par exemple pour la main d'œuvre relative à l'installation des modules).
Label de qualité	Signe d'identification qui s'appuie sur un référentiel défini et atteste la qualité supérieure d'un produit. Étiquette ou marque spéciale créée et apposée sur un produit destiné à la vente, pour en certifier l'origine, en garantir la qualité et la conformité avec les normes de fabrication. Un label peut être délivré par un organisme certificateur (et être assimilé à une certification), ou être fondé sur une charte à respecter sans vérification par un tiers.

Source : Larousse, Fafsea. « Normes, labels, certifications... Quelles différences? », n° 106 (janvier 2014). http://www.fafsea.com/docs/fafseainfos/Fiche_pratique_Fi106.pdf.

4.2. Processus de création d'un éco-label appliqué aux modules photovoltaïques

Tout label de qualité passe par une procédure et une succession d'étapes.

Tout d'abord, il est indispensable d'établir un cahier des charges écologique précis. Dans notre cas, l'objectif est d'encourager une conception plus durable des systèmes photovoltaïques, de distinguer les produits qui ont un impact réduit sur l'environnement et les fournisseurs qui consentent à un effort dans ce sens.

Une fois le cahier des charges établi, l'entreprise qui souhaite se faire certifier doit introduire une demande de labellisation qui sera évaluée selon les étapes suivantes :

- Dépôt d'un dossier de demande de certification par l'entreprise
- Étude de recevabilité avec vérification du documentaire

- Contrôle et audit sur le site de l'entreprise et sur chantier avec réalisations de tests sur les produits
- Évaluation : analyse d'éventuels écarts et demande d'éléments complémentaires
- Décision : notification d'accord ou de refus du droit d'usage du label, avec livraison du certificat et du logo
- Audit de suivi une fois le label octroyé pour vérifier que le produit réponde toujours aux exigences
- Possibilité d'imposer un renouvellement de certification (site d'AQPV, consulté le 21 mars 2019; Obtenir un écolabel pour mes produits ou services – Ecolabel, consulté le 10 avril 2019).

Le processus de certification nécessite d'assigner un organisme certificateur spécialisé, indépendant et impartial. Dans le cas des systèmes photovoltaïques, il sera nécessaire de créer cet organisme, ou d'assigner cette compétence à un organisme qui s'occupe déjà de certifier le secteur photovoltaïque. On pourrait par exemple penser à Eliosys, laboratoire d'ores et déjà accrédité d'essais et de certification de modules solaires en Belgique. Pour l'instant, cette entreprise propose différents certificats photovoltaïques :

- ELIOCERT : vérification de la conformité du module en termes de performance, vieillissement, contrainte électrique, mécanique et sécurité. Cette démarche est obligatoire pour qu'un produit photovoltaïque puisse être mis en vente et bénéficie d'aides. Ce certificat est valable 5 ans.
- La charte ELIOQUAL est une démarche volontaire qui teste la qualité des modules. Elle est destinée aux installateurs, importateurs et distributeurs (site d'Eliosys, consulté le 5 avril 2019).

Compte tenu du fait qu'Eliosys dispose des outils de contrôle nécessaires pour vérifier les modules, ses compétences pourraient être élargies et l'entreprise pourrait être désignée comme organisme certificateur indépendant. Ces certifications n'entrent pas en conflit avec l'idée de création d'un label écologique.

BCCA (Belgian Construction Certification Association asbl) est un autre organisme de certification dans le domaine de la construction. L'asbl s'adresse aux entreprises de conception, fabrication et installation. Elle certifie déjà les entreprises wallonnes pour le label NRQual, relatif à la qualité des installations photovoltaïques détaillé dans la section 4.3.

De plus, il serait également possible de préciser différents niveaux de certification/labellisation en fonction du nombre de critères respectés (ex avec le label EPEAT qui présente des niveaux bronze, argent et or). Cette distinction est utile et sera retenue pour la création de l'éco-label PV, pour permettre différents niveaux de performance.

Il convient aussi de citer certaines exigences de l'éco-label européen, applicables à tous types de label (ADEME, Mehl, 2017) :

- Le label se doit d'être technologiquement neutre de sorte que ses exigences s'appliquent à tous
- Le label doit respecter le règlement CLP n° 1272/2008 du Parlement européen relatif à la classification, à l'étiquetage et l'emballage des substances chimiques et des mélanges. Une dérogation est possible uniquement s'il n'est « *pas possible techniquement de remplacer ces substances ou dans le cas de produits dont la performance environnementale d'ensemble est considérablement plus élevée par rapport à d'autres produits du même groupe* » (ADEME, Mehl, 2017, p.13).
- Il doit respecter l'article 57 du règlement n°1907/2006 du Parlement européen REACH concernant l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques ainsi que les restrictions applicables à ces substances.

Une fois le label implémenté, il reste primordial d'effectuer une communication verbale et visuelle (« branding » du label) efficace, qui impactera la décision d'achat finale du consommateur (Czarnecki et al., 2018).

4.3. Certifications et eco-labels existants pour le photovoltaïque : éléments pris en compte

Plusieurs labels/certifications relatifs au photovoltaïque existent présentement, bien qu'ils ne s'apparentent pas à l'idée du label qui est abordée dans ce mémoire.

- Les premiers ont été mentionnés précédemment. Il s'agit d'**Eliocert** et d'**Elioqual**, délivrés par l'entreprise Eliosys. Pour rappel, Eliocert est une norme obligatoire et Elioqual est une charte axée sur la qualité des modules.

- Nous pouvons ensuite citer **NRQual** et **Solar PV** : ces deux labels garantissent la qualité des installations photovoltaïque en Wallonie.

NRQual est un label qui a été lancé par la Wallonie pour soutenir et promouvoir les entreprises d'installation qui s'inscrivent dans un processus de qualité. Les conditions requises portent sur la capacité de concevoir une installation, la capacité de placer le système photovoltaïque et des conditions liées à la vente (Site énergie du Service Public de Wallonie, consulté le 10 avril 2019). Les installateurs labellisés sont repris sur le site de l'organisme certificateur BCCA.

Solar PV suit le même principe que NRQual mais s'applique à toute la Belgique. Il est basé sur des référentiels développés par Quest & Construction Quality et est également certifié par BCCA (Quest for quality, consulté le 10 avril 2019).

- **AQPV** (Alliance Qualité Photovoltaïque) est une autre certification de marque française qui atteste les compétences d'une entreprise pour la réalisation de projets solaires et de sa maîtrise des activités qu'elle sous-traite au regard d'un référentiel donné. Les opérateurs doivent ainsi maîtriser l'ensemble des savoir-faire nécessaires à la conception, la construction et l'exploitation-maintenance d'installations photovoltaïques de toute puissance. Comme indiqué sur le site d'AQPV : « *A la demande du SER, Certisolis a fait évoluer le label en certification de service afin de valoriser les différents métiers*

intervenant dans la construction et l'ingénierie de centrales. Le label a été définitivement remplacé par la certification de service en 2017 ». Cette certification garantit donc la qualification de service de l'entreprise plutôt qu'un label attestant la qualité des modules photovoltaïques en tant que telle (AQPV, consulté le 21 mars 2019).

- D'autre part, un profil environnemental et social des grandes marques de panneaux existe. Il s'agit de la **Solar Scorecard**, qui attribue des points aux marques de panneaux en fonction du respect ou non de critères environnementaux et sociaux. Au travers de recherches sur les sites internet des entreprises, de sondages, interviews, communications personnelles et données accessibles au public, la Silicon Valley Toxics Coalition établit un classement de plusieurs dizaines de marques de panneaux solaires. Les critères du tableau de bord s'articulent autour de la responsabilité étendue du producteur, du report d'émissions, des droits des travailleurs ainsi que leur santé et sécurité, de la chaîne d'approvisionnement, des matériaux et de la toxicité des matériaux, des émissions de gaz à effets de serre et de l'énergie, de l'eau et enfin du conflit minéral. Certains critères sont liés à des certifications spécifiques (engagement SEIA et UNGC, certification SA8000, OHSAS, ISO 140001).
- De plus, la norme **NSF 457** "Sustainability Leadership Standard for Photovoltaic Modules", publiée en 2017, fournit un cadre et un ensemble d'objectifs normalisés qui agit à la manière d'un guide pour les fabricants et acheteurs. Cette norme établit des critères pour différents niveaux de leadership et de performance en matière de durabilité et d'environnement tout au long du cycle de vie du produit. Le produit comprend le module, le cadre, les câbles et le système de montage si celui-ci est intégré. Ce référentiel étant payant, aucune information détaillée n'a pu être trouvée concernant le contenu exact des critères.
- Dans le large panel d'écol-abel existants, nous citerons encore l'Eco-label européen, les labels NF Environnement, Ange Bleu, The Nordic Swan, la certification EPEAT et le

programme Energy Star. Ils existent depuis plusieurs décennies et couvrent une large gamme de produits et services, allant des produits électroménagers, aux produits à usage professionnel ou encore au tourisme. Néanmoins, aucun de ces labels n'a encore établi de référentiel spécifiquement destiné aux produits photovoltaïques.

En conclusion, il n'existe à ce jour aucun label intégrant des critères basés sur l'intégralité du cycle de vie du système photovoltaïque. Les labels actuels sont axés sur une phase précise et sur la qualité du service plutôt que sur le produit lui-même. Malgré cela, l'utilisation de certains seuils et critères préétablis par des labels et certifications existants permet de renforcer les synergies entre labels, et seront une source d'inspiration pour déterminer les critères de notre éco-label.

4.4. Critères de l'éco-label appliqué aux systèmes photovoltaïques

Figure 17 : Idée/ suggestion de logo pour l'éco-label photovoltaïque



Source : création personnelle avec l'aide de freelogoservices.com

Après cette mise en contexte sur les labels écologiques, il faut s'assurer que les éléments importants relatifs aux systèmes photovoltaïques qui présentent l'impact le plus élevé et/ou les plus facilement modifiables soient pris en compte dans un système de vérification concret. Le but étant de cibler des critères qui aideront à réduire l'impact sur l'environnement, sur lesquels les fournisseurs de systèmes photovoltaïques ont un certain levier d'influence et qui sont susceptibles d'influencer le comportement des consommateurs. La présentation des critères et niveaux de label détaillés ci-dessous n'a pas pour prétention d'être exhaustive ou de pouvoir être mise en place sur le marché dès demain. Le but est de répondre à la question sous-jacente « A quels critères doit répondre l'éco-label pour être fiable ? » et dans une plus large mesure, à quels critères doit-il répondre pour être réalisable à l'échelle des fournisseurs/revendeurs belges et pour être efficace.

En analysant l'importance et la faisabilité des améliorations identifiées lors de l'étape d'écoconception en concertation avec différents acteurs du secteur, voici les niveaux et critères que nous avons retenus et qui pourraient être intégrés à un éco-label ambitieux applicable aux systèmes photovoltaïques au silicium cristallin:

➤ **Eco-label PV Bronze** : le fournisseur/installateur/revendeur doit répondre à tous les critères requis :

- Publication de données/inventaire : informations sur le produit :
 - Marque
 - Technologies utilisées lors de la production
 - Composition du module (matériaux utilisés)
 - Procédé d'extraction et localisation de l'approvisionnement en matières premières pour le module
- Garantie sur l'absence de terres rares pour les modules
- Certification NRQual ou Solar PV pour assurer la qualité de l'installation
- Mise en place d'un système d'assistance réparation gratuit lors de la durée de vie mécanique du produit (encore très rare à ce jour, ou sur une durée très limitée)
- Garantie étendue de durée de vie et de performance des modules par rapport à l'offre actuelle du marché (qui est présentement de 10 ans pour la durée de vie et de 25 ans pour la garantie de performance) : minimum 12 ans pour la durée de vie et 27 ans pour la performance
- Optimisation du remplissage des véhicules pour les étapes de transport liées à la fourniture de marchandises pour l'installation et le démantèlement, et adaptation du type de véhicule utilisé en fonction du remplissage pour ces étapes de de transport
- Stratégie de communication systématique à mettre en place envers le consommateur en l'informant sur : les conseils d'entretien pour une durée de vie plus longue, sur la prévention de la mise au rebut prématurée en informant le client sur la bonne performance des modules même après leur durée de vie « classique », sur les mesures de collecte et de gestion de fin de vie

➤ **Eco-label PV Argent** : le fournisseur/installateur/revendeur doit répondre à tous les critères du niveau bronze + 50% des critères optionnels additionnels ci-dessous :

- Publication de données/inventaire du fabricant chez qui le fournisseur s'approvisionne à propos de:
 - Consommation d'énergie
 - Consommation d'eau
 - Quantité d'eau rejetée
 - Quantité de déchets mis en décharge
 - Rapport sur les émissions (impacts associés à la production et à l'extraction de matières premières)
 - Liste des substances utilisées (produits chimiques et dangereux)
 - Composition du module et de l'onduleur (matériaux utilisés)
- Mention des impacts associés aux autres étapes du cycle de vie (transport en Belgique, installation et démantèlement)
- Garantie d'utilisation d'une proportion de matériaux recyclés dans la production
- R&D dans des projets liés à l'écoconception (que ce soit sur le réemploi avant la mise en décharge, sur la recherche de matériaux substituables, sur des techniques de recyclages plus poussées, etc.)
- Proposition d'onduleurs écoconçus au client tels que Cefem Solar
- Mise en place de véhicules durables pour les trajets effectués en Belgique

➤ **Eco-label PV Or** : le fournisseur/installateur/revendeur doit répondre à tous les critères du niveau bronze + 75% des critères optionnels additionnels ci-dessus

En conclusion, le tableau ci-dessous rassemble les différents critères proposés par niveau de labellisation et mis en lien avec la structure des catégories d'écoconception précédemment utilisée.

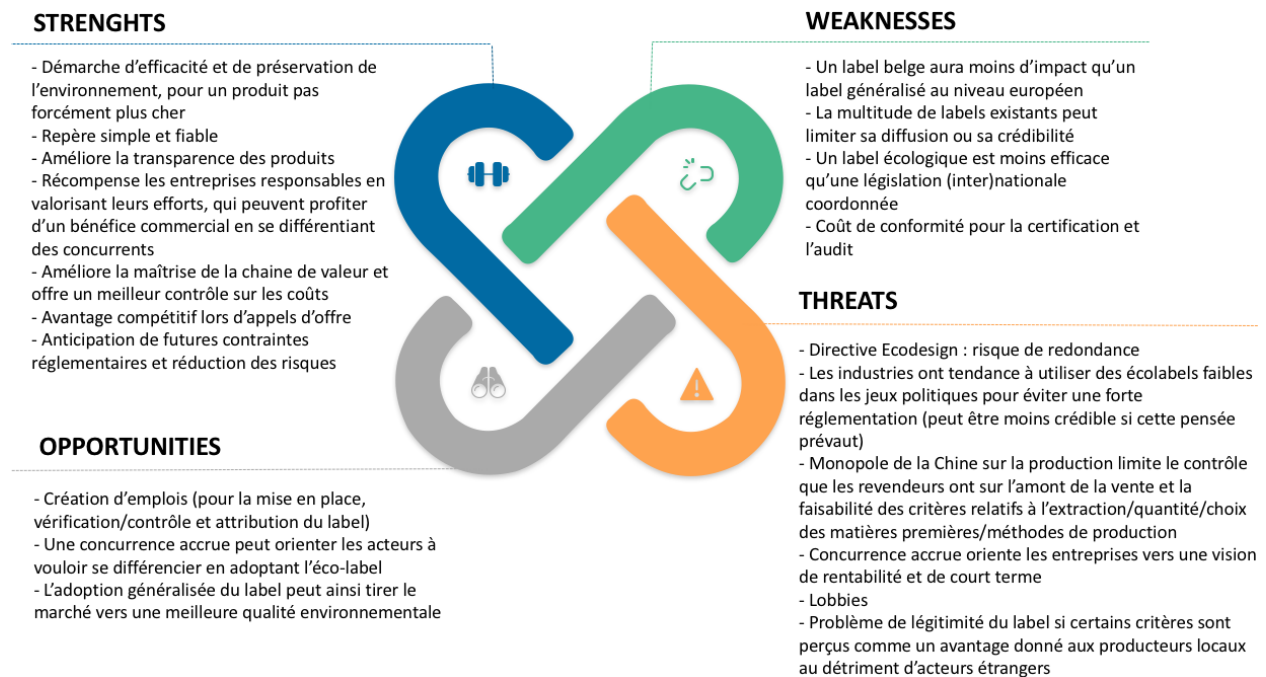
Catégories	Critères	Bronze	Argent*	Or**
Matériaux	Marque module	✓	✓	✓
	Composition module	✓	✓	✓
	Procédé d'extraction et localisation approvisionnement matières premières	✓	✓	✓
	Garantie absence terres rares	✓	✓	✓
	Composition de l'onduleur		✓	✓
Fabrication	Technologie production module	✓	✓	✓
	Consommation d'énergie		✓	✓
	Consommation d'eau		✓	✓
	Quantité d'eau rejetée		✓	✓
	Quantité de déchets mis en décharge		✓	✓
	Rapport sur les émissions pour production et extraction		✓	✓
	Garantie proportion de matériaux recyclés		✓	✓
Transport en Belgique	Optimisation remplissage véhicules	✓	✓	✓
	Adaptation du type de véhicule utilisé en fonction du remplissage	✓	✓	✓
	Mise en place véhicules durables		✓	✓
Installation	Certification qualité installation	✓	✓	✓
Maintenance	Assistance réparation gratuite	✓	✓	✓
Durabilité	Garantie étendue durée de vie et performance des modules	✓	✓	✓
Consommateur	Stratégie de communication systématique	✓	✓	✓
	Proposition d'onduleurs écoconçus aux clients		✓	✓
Autres	Mention impacts associés aux autres étapes du cycle de vie (transport en Belgique, installation et démantèlement)		✓	✓
	R&D dans des projets d'écoconception		✓	✓

* : critères verts + 50% des critères bleus ** : critères verts + 75% des critères bleus

4.5. Limites d'un éco-label : SWOT

Comme pour toute démarche, la création d'un label écologique présente des avantages et des limitations. Nous proposons par le tableau ci-dessous de reprendre les principales forces, faiblesses, menaces et opportunités (SWOT) d'un éco-label photovoltaïque. Certains points sont détaillés par la suite.

Figure 18 : SWOT d'un éco-label photovoltaïque



Source : construit sur base de toutes les recherches et entretiens effectués.

Forces et opportunités :

Un label est tout d'abord un repère simple et fiable pour le consommateur. Il aide à orienter le choix d'achat et facilite l'identification de produits photovoltaïques de bonne qualité. De plus, un label se veut être publiquement consultable et favorise la transparence du secteur en permettant d'accéder aux données clés, non seulement liées aux impacts environnementaux, mais aussi liées à la composition des différents produits. En effet, la transparence est la première étape indispensable pour se diriger vers une amélioration environnementale.

L'avantage compétitif et l'accès à de nouveaux marchés sont également des attraits potentiels majeurs de la création d'un label pour l'industrie solaire. En effet, une entreprise labellisée possède un atout supplémentaire qui peut s'avérer distinctif lors d'appels d'offre lorsque l'aspect environnemental est intégré dans la pondération de la cote finale (entretien avec l'Institut Becquerel, 4 avril 2019), en créant ainsi une barrière à l'entrée pour de potentiels concurrents. Dans le cas d'un succès généralisé du label, il peut avoir pour effet indirect d'améliorer les standards environnementaux du secteur et tirer le marché vers le haut (Prag et al., 2016). Un usage prolongé du produit, une meilleure connaissance sur la chaîne de valeur, une consommation raisonnée, des recherches pour déployer des produits moins nocifs et plus durables, ... d'un effort collectif peut découler une convergence des standards vers un produit encore plus respectueux de l'environnement et à moindre coût pour le consommateur final.

Faiblesses :

La multitude de labels existants peut limiter sa diffusion ou sa crédibilité dans la mesure où le consommateur s'y perd et ne tient pas forcément compte du label ou ne sait pas les distinguer. Bien qu'aucun label spécifique aux systèmes photovoltaïques n'existe à ce jour, le consommateur pourrait avoir une appréhension devant la foule de logos certifiant la qualité d'une série de produits et services. Les consommateurs n'ont par conséquent ni le temps ni la compétence pour évaluer dans quelle mesure un produit est respectueux de l'environnement (Houe et Grabot, 2009). Il est donc impératif de mettre une stratégie de communication efficace en place, en parallèle de la création du label. Cette stratégie doit mettre l'accent sur l'éducation des consommateurs au sujet des systèmes photovoltaïques (Khan Md Raziuddin et al., 2016). Elle doit être réalisée par les fournisseurs et les services publiques qui, en informant les consommateurs du fonctionnement du label et du fait que les critères portent sur tout le cycle de vie du produit, peuvent les aider et les influencer à prendre une décision d'achat éclairée.

Menaces :

La Commission travaille actuellement sur une directive Ecodesign propre aux systèmes photovoltaïques dont on ne connaît pas encore les critères et obligations légales. Cette directive risque de donner naissance à la création d'un eco-label européen qui intégrera les critères identifiés préalablement. Le label belge pourrait alors être redondant et perdre son intérêt. Cependant, il constitue un moyen d'anticiper les réglementations environnementales à venir et d'alléger de futures contraintes en les intégrant dès aujourd'hui au système de gestion de l'entreprise.

Par ailleurs, la concurrence accrue que connaît le secteur depuis quelques années oriente les entreprises vers une vision de rentabilité à court terme. Une certification présente un coût non négligeable : 40 000 euros environ en Belgique pour certifier la conformité d'un seul type de produit photovoltaïque, auxquels il faut ajouter 1 500 euros par an pour les contrôles de vérification et de suivi de conformité. Des coûts supplémentaires s'ajouteraient à cette somme dans le cas d'un label volontaire (entretien avec ISSOL, entretien du 15 avril 2019). A cela s'accompagne une vision de minimisation générale des coûts, qui entraîne un nivellement vers le bas de la qualité des produits depuis plusieurs années. C'est aujourd'hui le critère du prix qui prévaut sur le marché, et il s'agit d'un frein à l'adoption d'un label écologique.

Limites générales :

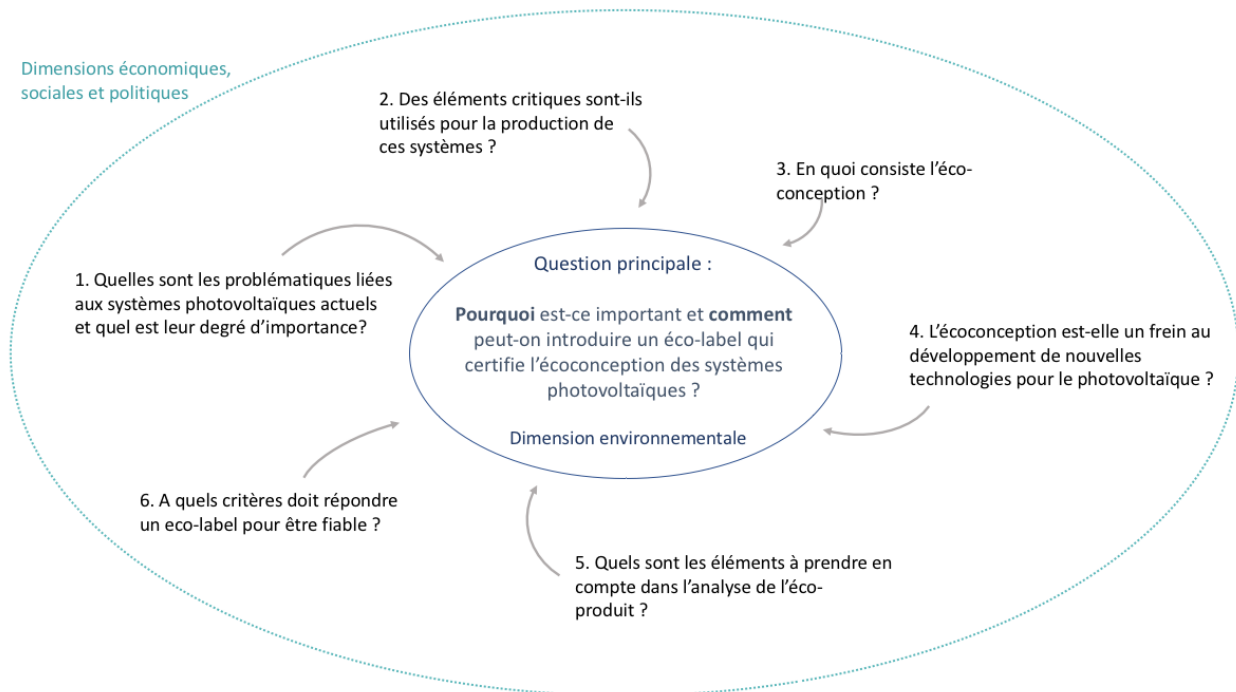
La dispersion géographique des différentes étapes du cycle de vie d'un système photovoltaïque et le nombre d'intervenants complexifient l'élaboration d'un label. Il existe un risque que le secteur ne choisisse pas volontairement de demander une certification pour un label de qualité tant qu'il n'y a pas d'incitant économique ou de contrainte réglementaire généralisée (entretien avec l'Institut Becquerel, 4 avril 2019). Dans la mesure où un label se demande sur base volontaire, il est moins efficace et ne se substitue pas à une législation internationale coordonnée. Ce risque peut être renforcé par le lobbying du secteur, dont les objectifs visent un développement de performance du produit plutôt que des avancées globales en matière d'écoconception et de publication de données. Si les lobbies maintiennent l'axe d'attention sur la performance et l'efficacité, ils pourraient réduire le sentiment quant à

l'importance d'adopter des labels écologiques volontaires poussés et contraignants. A l'inverse, si des actions coordonnées renforcent le soutien de ce genre d'initiatives, le succès du label pourrait être amplifié et être suivi par les acteurs mondiaux.

Conclusions et discussions

Au cours de ce travail, il est rapidement apparu que, même si l'objectif principal portait sur l'aspect environnemental, une interdépendance forte entre les systèmes environnementaux, sociaux, économiques et politiques existe. La dimension sociale est présente par des problématiques telles que les mauvaises conditions de travail ou une délocalisation des emplois qui peuvent découler de la croissance de l'industrie photovoltaïque. Au niveau économique, l'industrie est conditionnée par le marché et ses contraintes de rendement à court terme. Enfin, la dimension politique, qui fournit un encadrement légal, peut agir comme promoteur ou comme frein du secteur, en fournissant des incitants financiers, des lignes directrices ou des lois qui cadrent l'utilisation des labels pour l'industrie photovoltaïque.

Les enjeux d'une dimension recoupent et affectent ainsi inévitablement les enjeux des autres. La question de recherche, axée sur l'aspect environnemental, était par conséquent guidée et contrainte par les autres dimensions, comme le montre cette figure :



Les différents chapitres ont permis de construire progressivement une réponse à la question de recherche principale « **Pourquoi est-ce important et comment peut-on introduire un éco-label qui certifie l'écoconception des systèmes photovoltaïques au silicium cristallin ?** ».

Pourquoi est-il important d'introduire un éco-label:

- Pour stimuler et encourager la transition vers une économie industrielle durable.
- Pour réduire au maximum l'impact environnemental des systèmes photovoltaïques, en considérant toutes les étapes du cycle de vie.
- Pour permettre au secteur de soutenir la croissance à venir sans compromettre l'environnement, en fournissant un cadre qui accompagne les professionnels pour aller plus loin dans leur engagement envers une transition énergétique.
- Pour améliorer la transparence et l'accès à l'information.
- Pour aider les consommateurs à distinguer les fournisseurs plus engagés dans l'écoconception et les informer sur le fait que tous les produits et services ne sont pas de qualité équivalente.
- Pour inciter le secteur à considérer la qualité du produit au même niveau d'importance que le prix/coût.

Idéalement, un label écologique devrait permettre de garantir la durabilité des systèmes photovoltaïques dans leur globalité et tout au long de leur durée de vie, tout en ayant un produit socialement bénéfique, économiquement viable et encadré par les politiques.

Comment atteindre ces objectifs:

Il est crucial d'avoir des actions coordonnées et une collaboration entre acteurs publics et privés pour favoriser une adoption généralisée du label écologique. De plus, il faut établir un cahier des charges précis, désigner un organisme certificateur indépendant et impartial et effectuer un suivi et des contrôles rigoureux.

Outre cette question de recherche principale, voici les conclusions importantes qui sont ressorties de ce travail :

Tout d'abord, les modules au silicium cristallin ne possèdent pas de terres rares. Les ressources qui les composent, considérées comme critiques pour l'Europe, sont le silicium et l'antimoine.

Ensuite, l'analyse des impacts environnementaux a mis en évidence l'importance des impacts liés à la fabrication des systèmes et au transport entre chaque étape, tout en relativisant les impacts de l'étape de recyclage qui permet d'éviter l'extraction de nouvelles matières premières, et qui est donc bénéfique à l'impact global des systèmes photovoltaïques.

L'écoconception est une démarche prometteuse, qui mène d'ores et déjà à de réelles améliorations technologiques et pratiques dans l'industrie photovoltaïque. Elle stimule le développement et les recherches pour proposer des produits plus durables. Néanmoins, des barrières de taille subsistent et freinent son déploiement. Citons particulièrement que :

- Il existe un manque de contrôle des fournisseurs/revendeurs/installateurs sur la chaîne de valeur, particulièrement sur les étapes d'extraction, de production et de recyclage des systèmes.
- La recherche de profit à court terme pousse les entreprises à minimiser leurs coûts, et ne favorise donc pas les efforts d'écoconception.
- Les lobbies de l'industrie solaire exercent un pouvoir d'influence sur les décideurs politiques et freinent la révision profonde de la conception actuelle des systèmes photovoltaïques, en focalisant les points d'intérêts sur des critères d'efficacité et de performance plutôt que sur des critères qui obligeraient à revoir la manière dont les modules sont conçus.

Enfin, les entretiens avec les différents acteurs du secteur m'ont aidé à confronter ces critères d'écoconception avec les réalités du terrain et à déterminer la faisabilité des pistes d'amélioration. L'éco-label présenté propose une répartition des critères sur trois niveaux de certification (bronze, argent, or).

Les critères d'un label écologique doivent tout d'abord être dirigés sur la transparence et la publication de données. En effet, il reste difficile d'accéder à des données de composition/émissions/consommation/déchets. Or, pour mesurer les améliorations et conséquences réelles de la prise en compte de l'écoconception, il est essentiel de connaître les informations et données relatives à ces critères.

Outre la transparence, les critères s'intègrent dans les catégories suivantes : matériaux, fabrication, transport en Belgique, installation, maintenance, durabilité, sensibilisation du consommateur et autres. Les critères se veulent ambitieux, c'est-à-dire plus exigeants que les normes et législations actuelles, mais aussi accessibles, en proposant des critères sur lesquels le fournisseur belge a un levier de contrôle, de sorte qu'il ait la possibilité de l'obtenir. C'est pour cette raison que la plupart des éléments n'ont pas trait aux étapes de production ou de recyclage des modules, ces deux étapes étant hors du champ géographique et de contrôle des entreprises belges (à l'exception des deux fabricants ISSOL et Evocells).

Les **limites** de ce mémoire résident dans la difficulté de prédire la réussite d'un label construit théoriquement, dans la mesure où son efficacité pratique dépendra fortement du contexte social/économique/politique, ainsi que des intérêts propres de chaque acteur, plus ou moins enclin à intégrer la dimension d'écoconception dans la partie de la chaîne de valeur/d'approvisionnement qui les concerne. Lors de nos rencontres, les acteurs du secteur, qui estiment déjà faire beaucoup, ont d'ailleurs exprimé une certaine réticence à l'égard d'un label qui entraînerait des efforts et coûts supplémentaires. Le manque de contrôle sur la chaîne de valeur, tout comme la concurrence accrue et l'effondrement des prix du secteur réduisent fortement le spectre des actions possibles.

Enfin, le manque d'informations relatives aux onduleurs a limité l'intégration complète de critères pertinents à cet égard. Il apparaît pourtant que cet élément auxiliaire n'a pas atteint son potentiel maximum et qu'il serait important d'effectuer plus d'analyses à son sujet. Cela pourrait être un **prolongement possible** du mémoire. De plus, il serait intéressant d'inclure la dimension sociale, intrinsèquement liée à la transition énergétique. Par souci de clarté et de qualité, ce mémoire s'est focalisé sur l'aspect environnemental. Enfin, une élaboration plus fine des critères du label pourrait s'appuyer sur le calcul d'un score attribué à l'entreprise. La modélisation de ce score pourrait par exemple prendre en compte une pondération des critères selon les gains et coûts associés à chaque critère pour le fournisseur ou encore, selon l'importance de réduction d'impact. On pourrait également étudier un système de support ou de récompense du label par les acteurs publics pour encourager les acteurs à se faire labelliser.

Bibliographie

- Abrassart, C. « La naissance de l'éco-conception : acteurs, raisonnements, enjeux de pilotage et horizons d'une rationalisation industrielle (1990 - 2010) ». Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2012.
- ADEME. « Vos achats responsables avec l'Écolabel Européen : simplicité et fiabilité », n° N° 010324 (septembre 2017).
- Bellmann, M.P., Roligheten, R., Park, G.S., Denafas, J, Buchholz, F., Einhaus, R., Lombardi, I., et al. « Eco-Solar Factory : 40% plus eco-efficiency gains in the photovoltaic value chain with minimized resource and energy consumption by closed loop systems », s. d., 6.
- Bio Intelligence Service. « Study on photovoltaic panels supplementing the impact assessment for a recast of the WEEE directive ». European Commission DG ENV, 14 avril 2011.
- Brenner, W., et Adamovic, N., « A circular economy for Photovoltaic waste - the vision of the European project CABRISS ». In *2017 40th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*, 146-51. Opatija, Croatia: IEEE, 2017. <https://doi.org/10.23919/MIPRO.2017.7973407>.
- Brigand, S. *Installations solaires photovoltaïques : dimensionnement, installation et mise en oeuvre, maintenance*. Paris: Editions du Moniteur, 2011.
- Buchholz, F. « Saving Silver in Screen Printed Solar Cell Processing ». Ecosolar - International Solar Energy Research Center Konstanz, 8 juin 2017.
- CABRISS Consortium. « Cabriss Project », 15 avril 2016. <https://doi.org/10.5281/zenodo.827206>.
- Commission Européenne. « Ecodesign Working Plan 2016-2019 Communication from the Commission », 30 novembre 2016. https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/com_2016_773.en_.pdf.
- Commission Européenne, Publications Office of the European. « WEEE Compliance Promotion Exercise : Final Report. » Website, 26 avril 2018. <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/09c7215a-49c5-11e8-be1d-01aa75ed71a1/language-en>.
- « Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au Comité des Régions relative à la liste 2017 des matières premières critiques pour l'UE ». Consulté le 20 février 2019. <https://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2017/FR/COM-2017-490-F1-FR-MAIN-PART-1.PDF>.

- CU-PV « 20160608 Cu-PV final public report ». Consulté le 19 mars 2019.
http://www.sustainablepv.eu/fileadmin/sustainablepv/user/doc/20160608_Cu-PV_final_public_report_4_1.pdf.
- Czarnecki, J., K. Ingemar Jönsson, et Kuh, K. « Crafting next Generation Eco-Label Policy ». *Environmental Law* 48, n° 3 (2018): 409–452.
- Fafsea. « Normes, labels, certifications... Quelles différences? », n° 106 (janvier 2014).
http://www.fafsea.com/docs/fafseainfos/Fiche_pratique_Fi106.pdf.
- Faure, S. « Guide pratique de l'éco-conception Vers de nouveaux modèles économiques ». CGPME, mars 2016.
- Frischknecht R., Itten R., Sinha P., de Wild-Scholten M., et Zhang J. « Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems », janvier 2015.
- Gerbinet, S. « Évaluation environnementale de systèmes de production d'électricité renouvelable ». Université de Liège, 2011.
- Gonda, Louise. « Analyse environnementale de la gestion de fin de vie des déchets d'équipements électriques et électroniques par les entreprises d'économie sociale en Belgique francophone ». Université Libre de Bruxelles, 2017.
- Hélène Teulon. *Le guide de l'éco-innovation*. Eyrolles, ADEME, 2014.
- Houe, Raymond, et Bernard Grabot. « Assessing the Compliance of a Product with an Eco-Label: From Standards to Constraints ». *International Journal of Production Economics* 121, n° 1 (2009): 21–38.
- International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme. « IEA-PVPS - _A_Snapshot_of_Global_PV_-_1992-2017.pdf ». Consulté le 3 décembre 2018.
http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/statistics/IEA-PVPS_-_A_Snapshot_of_Global_PV_-_1992-2017.pdf.
- International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme. « Trends 2018 in Photovoltaic Applications », 2018, 88.
- IRENA, et International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme. « End-of-life management : Solar Photovoltaic Panels », juin 2016.
- Jacka, JK. « The Anthropology of Mining: The Social and Environmental Impacts of Resource Extraction in the Mineral Age » 47 (2018): 61–77.

- Khan Md Raziuddin, T., Chamhuri, S., Norshamliza, C., et Farah Hasan, S. « Integrating General Environmental Knowledge and Eco-Label Knowledge in Understanding Ecologically Conscious Consumer Behavior ». *Procedia Economics and Finance* 37 (2016): 39–45.
- Krauter, Stefan C. W. *Solar Electric Power Generation Photovoltaic Energy Systems*, 2006.
- La Fontaine, S., Entretien ISSOL, 15 avril 2019.
- Latunussa, Cynthia E. L, Mancini, L., Gian Andrea Blengini, Ardente, F., et Pennington, D. *Analysis of Material Recovery from Photovoltaic Panels*. EUR (Luxembourg. Online), 27797. Luxembourg: Publications Office, 2016.
<http://bookshop.europa.eu/uri?target=EUB:NOTICE:LBNA27797:EN:HTML>.
- Lempkowicz, B., Entretien PV Cycle, 27 mars 2019.
- Macé, P., Entretien Becquerel Institute, 4 avril 2019.
- Mahmud, M. A., Huda, N., Farjana, S., et Lang, C. « Environmental Impacts of Solar-Photovoltaic and Solar-Thermal Systems with Life-Cycle Assessment ». *Energies* 11 (septembre 2018): 2346. <https://doi.org/10.3390/en11092346>.
- Mehl, C. « Un ecolabel pour les modules photovoltaïques : Challenges et opportunités ». ADEME, 14 juin 2017. https://jnes-2017.sciencesconf.org/data/pages/2017_Mehl.pdf.
- Moine, G. *L'électrification solaire photovoltaïque*. Observ'ER., 2016.
- Prag, A., T. Lyon and A. Russillo, "Multiplication of Environmental Labelling and Information Schemes (ELIS): Implications for Environment and Trade", OECD Environment Working Papers, No. 106, OECD Publishing, Paris, 2016.
- « Rapport de la Commission au Parlement européen et au Conseil sur le réexamen des objectifs de valorisation des DEEE, sur l'éventuel établissement d'objectifs séparés pour les DEEE à préparer en vue de leur réemploi et sur le réexamen de la méthode de calcul des objectifs de valorisation fixés à l'article 11, paragraphe 6, de la directive 2012/19/UE relative aux DEEE ». Consulté le 14 mars 2019.
<https://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2017/FR/COM-2017-173-F1-FR-MAIN-PART-1.PDF>.
- Singh, A., Pant, D., et Olsen, S.I. *Life Cycle Assessment of Renewable Energy Sources*. 2013^e éd. Green Energy and Technology. London: Springer London, 2013.
- Stolz, P., et Frischknecht, R. « Life Cycle Assessment of Current Photovoltaic Module Recycling ». International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme, décembre 2017.

Stolz, P., Frischknecht, R., Wyss F. and de Wild Scholten M. "PEF screening report of electricity from photovoltaic panels in the context of the EU Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCR) Pilots, version 2.0." treeze Ltd. commissioned by the Technical Secretariat of the PEF Pilot "Photovoltaic Electricity Generation", Uster, Switzerland, 2016.

Sumper, A., Robledo-Garcia, M., Villafafila-Robles, R., Bergas-Jane, J. et Andres-Peiro, J. « Life-Cycle Assessment of a Photovoltaic System in Catalonia (Spain).(Report) ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, n° 8 (2011).

Thomson Reuters. « 2018 World Silver Survey ». The Silver Institute, avril 2018.

<https://www.silverinstitute.org/wp-content/uploads/2018/04/2018WorldSilverSurvey.pdf>.

Vicini, S., Entretien Evocells, 11 avril 2019.

Volta. « Note d'Information Technique Electricité : installations photovoltaïques ». Bruxelles, 2015.

Wambach, K., R. Peche, M. Seitz, M.P. Bellmann, G.S. Park, J. Denafas, F. Buchholz, et al. *Eco-Solar Factory: Environmental Impact Optimisation of PV Production*. WIP, 2017.

Wang, Hai-Qiao, Mirosław Batentschuk, Andres Osvet, Luigi Pinna, et Christoph J Brabec. « Rare-Earth Ion Doped up-Conversion Materials for Photovoltaic Applications. » *Advanced Materials (Deerfield Beach, Fla.)* 23, n° 22-23 (2011): 2675–2680.

Sites internet :

« About the Energy Label and Ecodesign ». Text. European Commission - European Commission. Consulté le 13 avril 2019. https://ec.europa.eu/info/energy-climate-change-environment/standards-tools-and-labels/products-labelling-rules-and-requirements/energy-label-and-ecodesign/about_en.

Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie. « ADEME ». ADEME. Consulté le 3 décembre 2018. <https://www.ademe.fr/>.

Anonymous. « Critical Raw Materials ». Text. Marché intérieur, industrie, entrepreneuriat et PME - European Commission, 5 juillet 2016. http://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical_en.

« AQPV – Alliance Qualité Photovoltaïque ». Consulté le 21 mars 2019. <https://www.aqpv.fr/>.

« BCCA ». Consulté le 10 avril 2019. <https://www.bcca.be/nl/>.

- « Cefem Solar en bref ». *Cefem Groupe* (blog). Consulté le 11 avril 2019. <http://cefem-group.com/cefem-solar/cefem-solar-en-bref/>.
- « Certification de produits PV | Eliosys ». Consulté le 5 avril 2019. http://www.eliosys.eu/?page_id=1341.
- « Eco-labels ». *Eco-3e* (blog). Consulté le 13 avril 2019. <http://eco3e.eu/base/eco-labels/>.
- « EU Ecolabel - Environment - European Commission ». Consulté le 13 avril 2019. <http://ec.europa.eu/environment/ecolabel/>.
- « EU Ecolabel: Ecolabel Products - European Commission ». Consulté le 21 mars 2019. <http://ec.europa.eu/ecat/>.
- « fiche de criticité antimoine ». Consulté le 12 avril 2019. http://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/upload/documents/Fiches_criticite/fichecriticiteantimoine-publique150409.pdf.
- « L’affichage environnemental sur les produits ». ADEME. Consulté le 21 mars 2019. <https://www.ademe.fr/particuliers-eco-citoyens/achats/laffichage-environnemental-produits>.
- « Les modules photovoltaïques ». Consulté le 12 avril 2019. <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16682>.
- « Obtenir un écolabel pour mes produits ou services - Ecolabels ». Consulté le 17 avril 2019. <https://www.ecolabels.fr/obtenir-un-ecolabel-pour-mes-produits-ou-services/>.
- « Les onduleurs ». Consulté le 12 avril 2019. <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16683>.
- « NRQual : un label de qualité officiel pour les entreprises d’installation de systèmes d’énergie renouvelables en Wallonie ». Site énergie du Service Public de Wallonie. Consulté le 10 avril 2019. <https://energie.wallonie.be/fr/qualite.html?IDC=8072>.
- « NSF 457 : Sustainability Leadership Standard for Photovoltaic Modules ». Consulté le 13 avril 2019. https://global.ihs.com/doc_detail.cfm?document_name=NSF%20457&items_key=00745029.
- « Particuliers et éco-citoyens, Achats, Les labels environnementaux ». ADEME. Consulté le 21 mars 2019. <https://www.ademe.fr/labels-environnementaux>.

« Project Summary | EcoSolar ». Consulté le 20 mars 2019. <http://ecosolar.eu.com/project-summary/>.

Projects, Sanmax. « Why CIRCUSOL | Circusol ». Consulté le 6 avril 2019. <https://www.circusol.eu/en/overview/why-circusol>.

« PV Cycle BE | PV CYCLE/fotovoltaïsche terugname- en recyclingprogramma ». Consulté le 3 décembre 2018. <http://www.pvcycle.be/fr/>.

pvmorede.it. « PVMoReDe.it - il primo impianto mobile capace di effettuare un trattamento completo dei pannelli fotovoltaici dismessi permettendo il recupero di tutti i materiali potenzialmente riutilizzabili. » pvmorede.it. Consulté le 19 mars 2019. <http://www.pvmorede.it/index.asp?>

« Quel est l'impact environnemental des panneaux solaires ». *Greenpeace France* (blog). Consulté le 13 avril 2019. <https://www.greenpeace.fr/impact-environnemental-solaire/>.

« SILICIUM - Encyclopædia Universalis ». Consulté le 13 février 2019. <https://www.universalis.fr/encyclopedie/silicium/>.

« Solar PV | Quest For Quality ». Consulté le 10 avril 2019. <https://www.questforquality.be/labels-de-qualite/solar-pv/>.

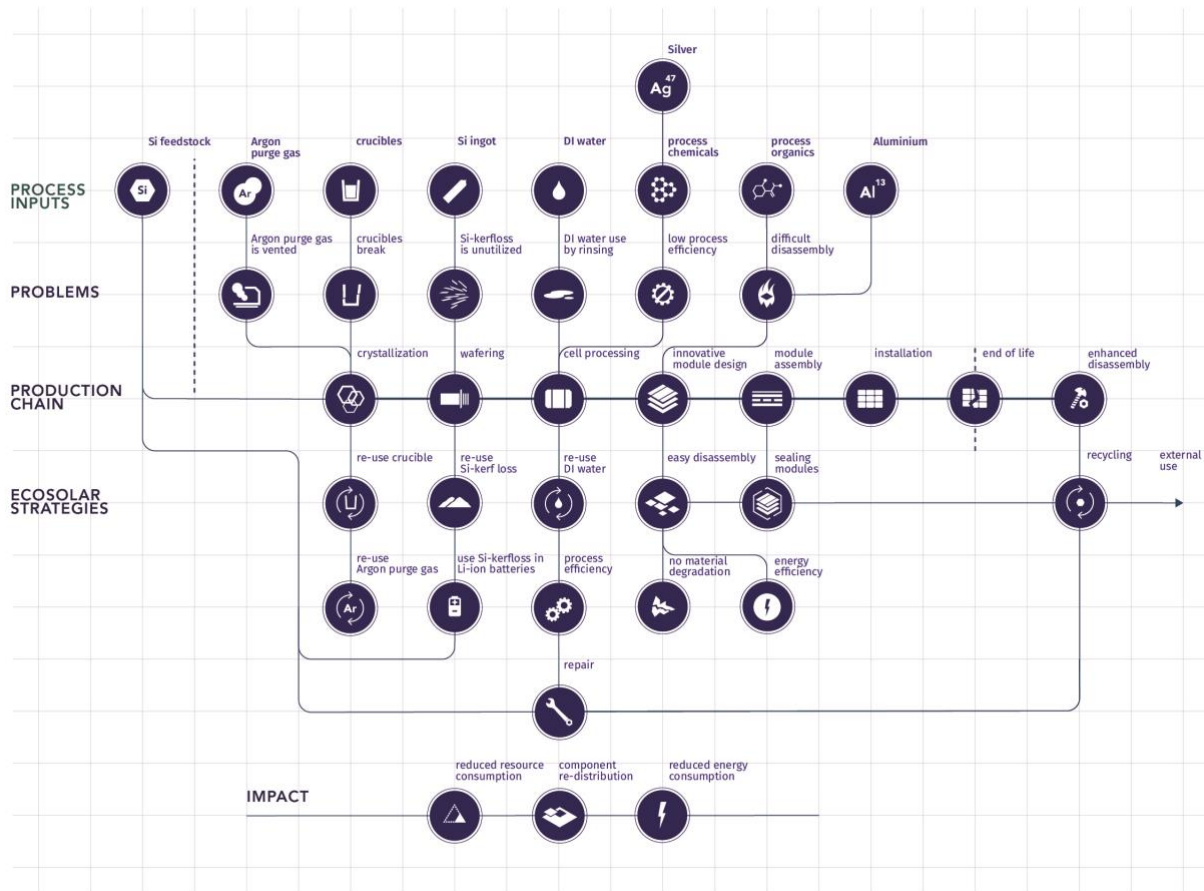
« SolarScorecard.com | 2018 ». Consulté le 3 décembre 2018. <http://www.solarscorecard.com/2018/>.

« SustainablePV: Home ». Consulté le 19 mars 2019. <http://www.sustainablepv.eu/home/>.

« Technical Progress | FRELP ». Consulté le 19 mars 2019. <https://frelp.info/category/news/technical-progress/>.

Annexes

Annexe 1 : Chaîne de valeur intégrée du projet Eco-Solar avec les objectifs cibles



Source : Eco-Solar

Annexe 2 : Tableau synthétique des prix de revient et proportion d'éléments fabriqués en France pour l'onduleur Trio Sun de Cefem Solar

Poste	% Prix de Revient Trio-Sun	% Fabriqué en France
Main d'Œuvre	19.76	19.76
Electronique	47.93	28.33
Mécanique	12.84	12.84
Magnétique	13.61	13.61
Divers	5.86	5.86
Total	100	80.4

Source : Cefem Solar

Annexe 3 : Questions générales posées lors des différents entretiens

PV Cycle

- Comment fonctionne l'entreprise et quelles sont les différentes étapes de collecte jusqu'au recyclage ?
- Qu'est-ce qui est et n'est pas couvert par votre système de collecte ?
- Qui assure le recyclage et pour quels éléments du module après la collecte ?
- Que se passe-t-il pour les déchets non valorisables ? quels sont-ils ?
- Les panneaux au silicium cristallins contiennent-ils des terres rares ?
- Existe-il d'autres organismes/entreprises similaires qui effectuent le recyclage ? les entreprises peuvent-elles aller plus loin dans le recyclage ou n'ont-elle aucun contrôle sur la fin de vie des modules ?
- Quel est le taux de recyclage en Belgique actuellement ?
- Certaines parties du module peuvent-elles être directement réemployées ?
- Quels sont les plans pour augmenter ce taux et mettre en place des approches de recyclage plus poussées ?
- Quels sont les progrès qui ont été réalisés en matière d'écoconception ou les projets, et qui seront bientôt mis en place dans toute la Belgique ? Les projets clos ont-ils été lancés à l'échelle industrielle ?
- Quels sont les freins ou attraits potentiels de l'industrie par rapport à un éco-label /recyclage plus poussé ?
- Quelles sont les relations avec les fournisseurs/producteurs/revendeurs ? La coordination est-elle parfois compliquée ?

The Becquerel Institute

- Les panneaux au silicium cristallins contiennent-ils des terres rares ?
- Où en est-on concernant les initiatives /directives européennes actuelles pour l'écoconception/éco-label ? La directive ecodesign qui inclue les systèmes photovoltaïques est-elle prévue de sortir bientôt ou cela peut-il prendre plusieurs années ?
- Quels sont les freins ou attraits potentiels de l'industrie par rapport à un éco-label ? Est-ce que la prise en compte de l'écoconception dans les modules photovoltaïques pourraient freiner le secteur en induisant des coûts supplémentaires ?
- Existe-t-il déjà des bases de données ou des obligations de divulguer des données et informations pour les fabricants de modules pv ? (par exemple : système de gestion documenté, rapport des émissions – pollutions chimique, polluants atmosphériques, appauvrissement de la couche d'ozone, GES, ...-, infos sur la production, recyclage interne, recherches et développement ou intégration de technologies à moindre impact, consommation d'énergie, consommation d'eau, quantité d'eau rejetée, tests de qualité de l'eau, mise en décharges des déchets et quantité)
- Y-a-t-il déjà un organe central qui aide/facilite/coordonne la communication entre acteurs en Belgique ou en Europe?

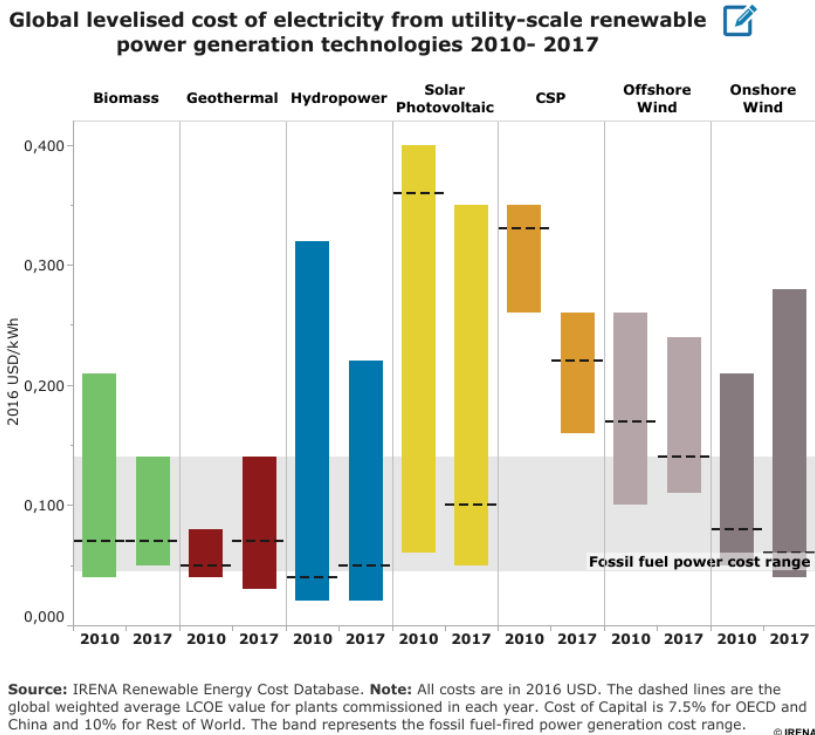
Fabricants belges ISSOL et Evocells

- Quelles sont les étapes de fabrication/d'assemblage au sein de votre usine ?
- Quelles sont les différences majeures avec un panneau chinois ?
- D'où viennent les différents composants utilisés ?
- Est-ce que vous recyclez une partie des pertes/déchets réalisés lors de votre chaîne de valeur ?
- Quels sont les freins ou attraits potentiels de l'industrie par rapport à un éco-label ?
- Divulgez-vous des données et informations concernant vos modules pv ? Existe-t-il déjà des bases de données ou des obligations de divulguer des données et informations pour les fabricants de modules pv ?

Installateur/fournisseur Sonck

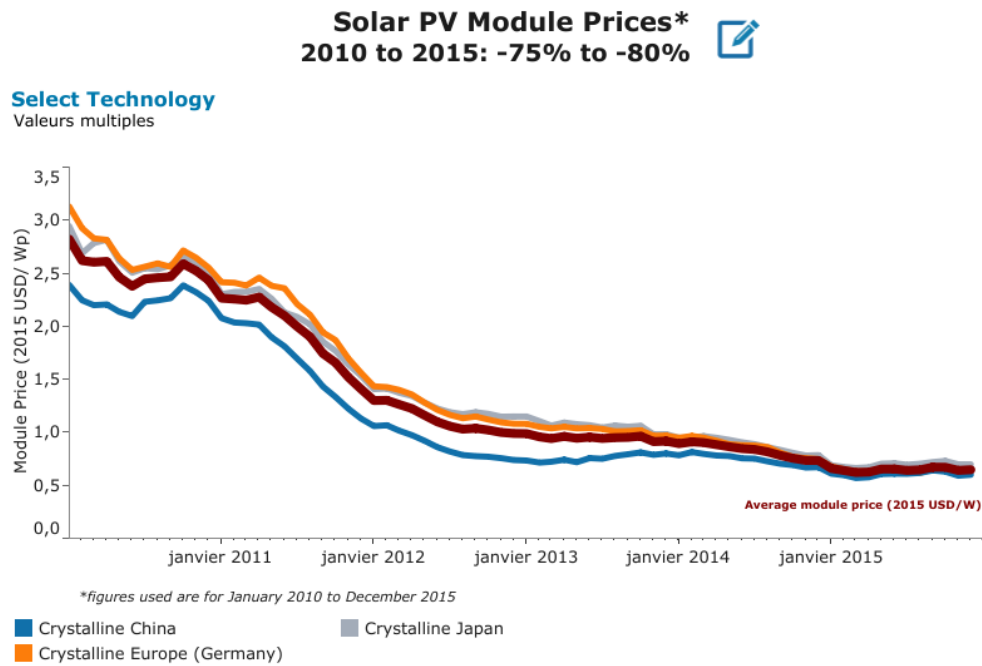
- Quelle est votre garantie de performance et de durée de vie ?
- Est-il possible d'exiger certaines normes au fournisseur chinois? (par ex utilisation de matériaux recyclés ou panneaux contenant moins d'argent,..)
- Est-il possible de connaître les informations des phases antérieures du cycle de vie des modules fabriqués dans d'autres pays que l'Europe/Belgique ?
- Quels sont les freins ou attraits potentiels de l'industrie par rapport à un éco-label ?

Annexe 4 : Levelized Cost of Electricity entre 2010 et 2017



Source : IRENA, « LCOE 2010-2017 ». Consulté le 17 mars 2019. <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Costs/LCOE-2010-2017>.

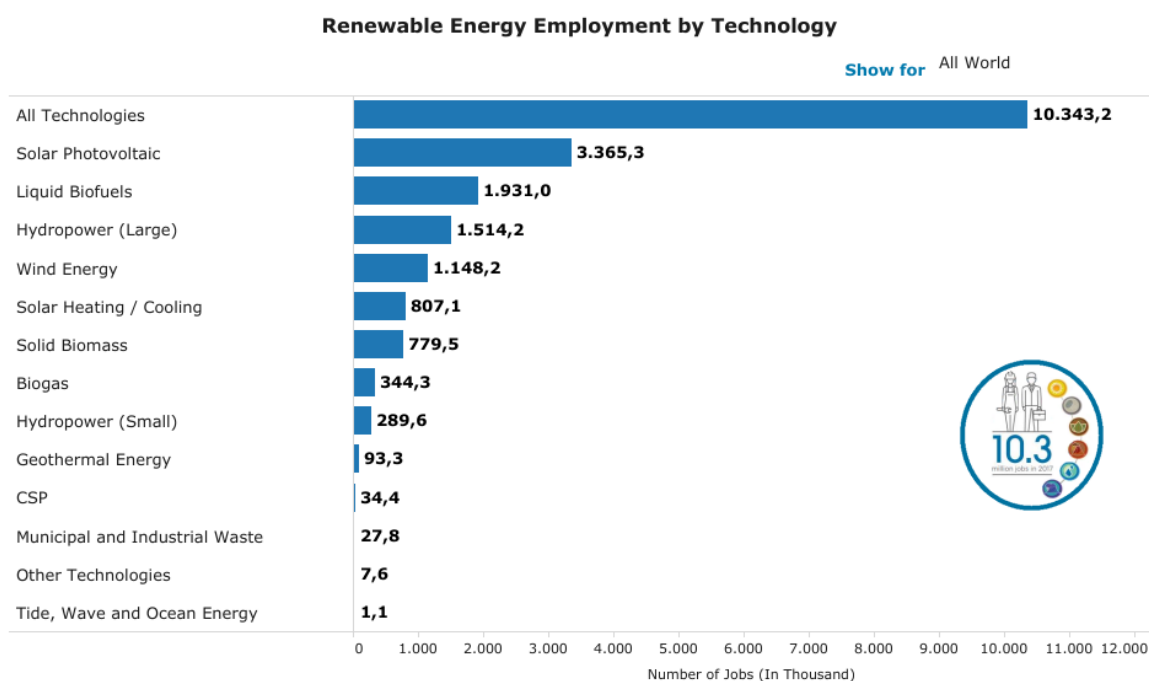
Annexe 5 : Evolution des prix des modules photovoltaïques solaires au silicium cristallin de
2010 à 2015



© IRENA

Source : IRENA, « Solar Costs ». Consulté le 17 mars 2019. <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Costs/Solar-Costs>.

Annexe 6 : Nombre d'emploi dans le secteur des énergies renouvelables dans le monde, par pays et par technologie



Source : IRENA, « Renewable Energy Employment by Country ». Consulté le 17 mars 2019.
<https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Benefits/Renewable-Energy-Employment-by-Country>.