

## ATELIER *LES DECHETS*

1<sup>er</sup> semestre - Année 2013-2014



*Les déchets liés aux technologies vertes*

*L'exemple des panneaux photovoltaïques et  
des ampoules fluo-compactes*

**FAURE Emmanuel, SERENI Laura**

# Les déchets liés aux technologies vertes

## Exemple des panneaux photovoltaïques et des ampoules fluocompactes

### I. Présentation générale

- 1) Composition
- 2) Usages et réglementation

### II. Élaboration : de la matière première à la technologie prête à l'emploi

- 1) Extraction de la matière première
- 2) Fabrication : exemple des panneaux photovoltaïques

### III. Traitement des déchets

- 1) Prise en charge des déchets
- 2) Le processus de recyclage
- 3) Mercure et recyclage des LFC
- 4) Recyclage des terres rares des LFC

### Bilan

Afin de pouvoir comparer l'impact environnemental de différents produits ou services, une méthode standardisée s'est développée sous le nom d'analyse du cycle de vie. Le principe est de comptabiliser les ressources utilisées, les émissions occasionnées et les déchets produits au cours des différentes étapes de la vie d'un produit, à savoir aussi bien au cours de son élaboration que de son fonctionnement et de son traitement en fin de vie. Nous nous intéresserons ici plus particulièrement aux installations photovoltaïques et aux ampoules fluocompactes. Les dommages environnementaux et nuisances occasionnées par le fonctionnement (bruits, odeurs....) sont en général pris en compte dans les analyses de cycle de vie, mais dans le cas des technologies étudiées, ceux-ci sont négligeables et seules les étapes de début et fin de vie pèsent dans les analyses. Nous commencerons par présenter ces technologies, dans leur contexte sociétal ; avant d'étudier les déchets qu'elles produisent au cours de leur cycle de vie, et notamment après emploi. Les installations photovoltaïques seront étudiées sur la base d'une durée de vie de 30 ans pour les panneaux à proprement parler, et nous considérerons donc chacun des autres composants en fonction du nombre de remplacement qu'il va nécessiter. Concernant les ampoules fluocompactes, la durée de vie moyenne est de 8000 h <sup>(1)</sup>.

### I. Présentation générale

#### 1) Composition

☒  
Panneau  
x  
photovoltaïques :

Les  
panneaux  
photovoltaïques

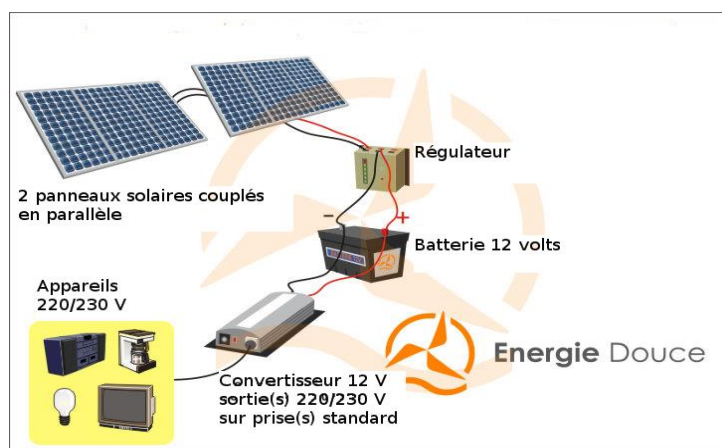


Illustration 1: Schéma de raccordement en sortie 12 V d'une installation autonome

absorbent l'énergie des photons pour la convertir en énergie électrique. Ils sont essentiellement constitués de :

- cellules ou modules photovoltaïques (convertisseurs de l'énergie solaire en énergie électrique),
- régulateurs de charge (dont le but est de limiter la diminution de la durée de vie d'une batterie suite à des charges incomplètes ou trop fortes)
- convertisseurs de tension pour transformer la tension continue fournie par les panneaux ou les batteries en une tension continue différente ou en une tension alternative (il s'agit alors d'onduleurs).
- batteries dans le cas des systèmes photovoltaïques autonomes.

Chacun de ces éléments existe sous différents types, dont les coûts de fabrication et rendements sont très variables.



Illustration 2: Agencement d'un module photovoltaïque cristallin

Les cellules photovoltaïques, doivent posséder à la fois des propriétés optiques et électriques ce qui nécessite l'emploi de matériaux très particuliers.

Elles sont réparties selon 2 grands types :

-les cellules cristallines qui utilisent des cristaux de silicium formant une plaquette ronde ou pseudo carrée de 150 à 200  $\mu\text{m}$  d'épaisseur, découpées dans un lingot puis connectées les unes aux autres au sein d'une résine d'éthylène vinyl-acétate (EVA) avant d'être posées et collées sur la face arrière du verre de protection. La matière première est toujours du silicium (Si), mais sous forme de monocristalline, multicristalline ou amorphe.

-les cellules en couche mince, où une fine couche uniforme composée d'un ou plusieurs matériaux réduits en poudre est déposée sous vide sur un substrat. Les technologies au tellure de cadmium (CdTe) et à base d'un alliage de cuivre, indium et sélénium (CIS) sont les plus développées.

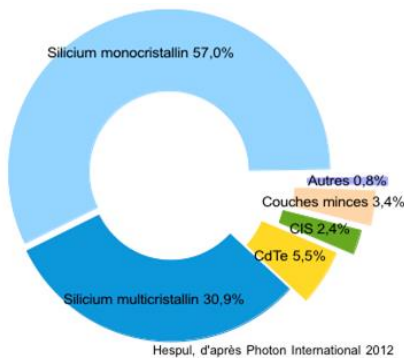


Illustration 3: Répartition des productions en 2011

Les cellules photoélectriques en silicium représentent la plus importante part du marché (93% en 2006 ),

nous allons nous pencher plus spécifiquement sur ces types de modules, mais on notera néanmoins que les cellules en couches minces sont une technologie nouvelle qui se développe fortement, malgré des matériaux très toxiques pour l'environnement et l'homme (CdTe cancérigène).

## ☒ Ampoules fluocompactes

En première approche, une ampoule fluocompacte (ou LFC, lampe fluocompacte) est constituée de deux parties : le tube spiralé, où est émise la lumière, et le ballast, composant électromagnétique d'où part le courant ionisant qui traverse le tube.

Le tube correspond à un long tube fluorescent, plié plusieurs fois, et de diamètre compris entre 7 et 20 mm. Sa paroi, faite d'oxydes de manganèse et de plomb, est couverte sur sa partie interne par un revêtement de poudres phosphorescentes (*phosphor coating* sur la figure 1), à base de terres rares, étalées sur trois couches. Elles émettent dans le rouge, le bleu et le vert. On trouve, à l'intérieur du tube, un gaz inerte (argon) à basse pression et des vapeurs de mercure, à raison de 5 mg par ampoule de 75 W (quantité en diminution grâce aux normes européennes).

Le ballast électronique contient un petit circuit avec des redresseurs, un condensateur de filtrage, et deux transistors de commutation connectés en série. Ses composants sont majoritairement plastiques et métalliques, avec une base en PVC et un circuit imprimé contenant des polymères plastiques et du cuivre, du fer, de l'aluminium et du plomb.

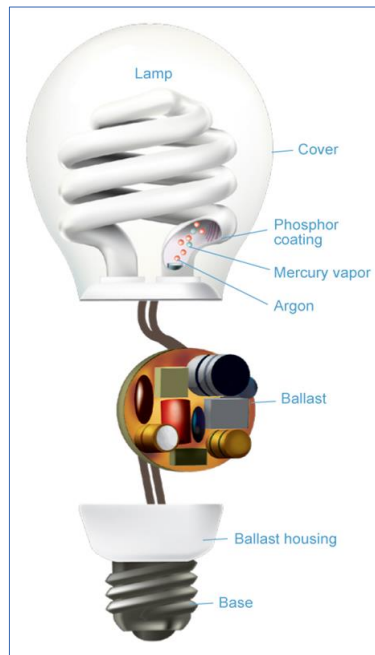


Illustration 4: Les différents composants d'une LFC <sup>(2)</sup>

## 2) Usages et réglementation

### ☒ Panneaux photovoltaïques

En 2012, les installations photovoltaïques du monde représentaient près de 100 GW. L'Europe culminait à la première place de la production électrique solaire en produisant près de 70 GW. L'augmentation mondiale des installations photovoltaïques est moins forte en 2013 (plus 9% alors qu'elle avait doublé entre 2011 et 2012), mais l'Europe reste leader sur les nouvelles capacités installées (16,8 / 30 GW). En France, 1,08 GW de nouvelles installations photovoltaïques ont été installées en 2012, amenant le parc français installé à plus de 4 GW (ce qui correspond à un parc d'environ  $318.10^6$  m<sup>2</sup>), contribuant ainsi à 35 % de la capacité électrique du pays. Les systèmes résidentiels inférieurs à 3 kWc représentent 16% (0,64 GW) de la capacité totale, les installations de 250 kWc environ 40% (1,6 GW) et celles de plus de 250 kWc, 44 % (1,76 GW) <sup>(3)</sup>. Cependant, cette augmentation concerne majoritairement des installations industrielles puisque le nombre d'installations a diminué de 58% <sup>(4)</sup>.

Des mesures soutenant la filière photovoltaïque ont été prises par un arrêté gouvernemental du 7 janvier 2013. Ainsi, les installations domestiques peuvent ont des tarifs de revente à EDF (qui varient entre 29,1 c€/kWh pour une installation intégrée au bâti à 7,55 c€/kWh pour une installation au sol) augmentés de 5% pour des installations en intégration simplifiée au bâti. En France on notera cependant l'obligation de connexion au réseau et de rachat de l'électricité par EDF alors

qu'une installation individuelle moyenne produit l'énergie nécessaire à une famille de 4 personnes. Cependant, le marché du photovoltaïque autonome continue à se développer, bien que plus lentement que celui des installations connectées (croissance évaluée à 15%). Il représentait ainsi 25% du marché du photovoltaïque mondial en 2003, mais est en pleine expansion dans les pays émergents (en Inde le nombre de foyers équipés de panneaux photovoltaïques autonomes à quasiment triplé entre 2000 et 2012 passant de 500 000 à 1,4 millions) puisqu'il permet l'accès à de nouveaux équipements sans pour autant être raccordé aux réseaux (ce qui est le cas d'1,3 milliards de personnes) <sup>(5) (6)</sup>.

### ☒ Lampes fluocompactes

D'abord assez mal acceptées par le public en raison de leur esthétique et de la lumière « froide » qu'elles émettent, ainsi que de leur temps à l'allumage, les ampoules fluocompactes ont commencé en France à éclairer un nombre important de foyers à partir du début des années 2000 et n'ont cessé de progresser depuis. En 2001, 44 %

des foyers français utilisaient au moins une ampoule basse consommation, ce taux était de 68,3 % en 2009 <sup>(7)</sup>. Cette augmentation est liée, d'une part à une amélioration du design des ampoules par les fabricants, sensibles à la critique par les consommateurs, et d'autre part à de nombreuses législations à plusieurs échelles visant à encourager l'achat d'ampoules à basse consommations (et de LFC en particulier); les ampoules à incandescences sont par exemple interdites à la vente depuis le 1er janvier 2013. Ainsi, au XXI<sup>e</sup> siècle, le nombre de LFC vendues annuellement est passé de 12 millions d'unités en 2003 à 64,4 millions en 2011 <sup>(8)</sup>.

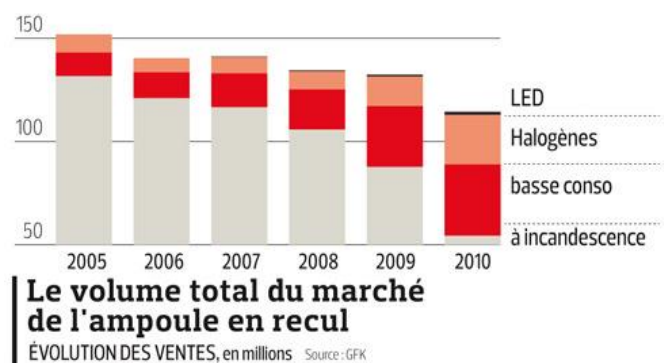


Illustration 5

A l'échelle européenne, une première directive (2005/32/CE) a été émise en 2005, introduisant la notion d'« écoconception » pour de nombreux appareils électroménagers ; il y a alors une nécessité de contrôler la production des LFC, du fait de leur volume de ventes de plus en plus important. En 2009 est voté le règlement n°244, imposant des normes de fabrication des LFC qui correspondent aux exigences de l'UE en termes d'écoconception. Les fabricants ne respectant pas ces règles ne peuvent commercialiser leurs ampoules en Europe ; ce règlement les contraint donc à adapter leur production, par paliers (les normes sont plus exigeantes au fil des années). Le but était d'interdire totalement la commercialisation d'ampoules à incandescence pour 2013.

En parallèle, en France, le Grenelle de l'environnement a provoqué la mise en place d'une convention sur le retrait de la vente des ampoules à incandescence et la promotion des LFC (signature en septembre 2008), convention impliquant le gouvernement, les fabricants et les organismes intéressés (EDF, l'ADEME et Récyclum, organisme chargé de la collecte des LFC usagées). Cette application des législations européennes avait aussi pour échéance l'année 2013, mais a finalement été repoussée à 2016.

## II. Cycle de vie : de la matière première à l'emploi domestique

### 1) Extraction de la matière première

#### ☒ Panneaux photovoltaïques

La matière première composant essentiellement les panneaux solaires est le silicium. Il

représente environ 25% de l'écorce terrestre, et on peut le considérer comme inépuisable. On le retrouve entre autre dans le quartz et les aluminosilicates, mais il n'est utilisable à des coûts énergétiques et économiques raisonnables que sous forme de quartz. L'industrie photovoltaïque consommerait ainsi chaque année près de 4000 tonnes de silicium issues de quartz, dont l'acquisition n'est pas (en soi) polluante. Cette silice doit néanmoins être très purifiée, et ces étapes nécessitent beaucoup d'énergie.

### ☒ *Lampes fluocompactes*

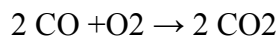
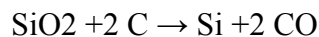
Les retombées environnementales de l'extraction minière et pétrolière correspondent beaucoup plus à de la pollution (notamment dans les mines d'étain, de cuivre et de plomb) qu'à des problèmes de déchets ; on ne s'intéressera pas ici au traitement des déchets miniers. Par ailleurs, l'extraction des terres rares pour les LFC ne pose aucun problème environnemental direct (les métaux ne sont pas dangereux en tant que tels<sup>(9)</sup>). En revanche, elle implique de creuser de grands volumes de terre, éventuellement dans des zones de radioactivité naturelle ; il faut alors traiter ces « déchets » miniers de manière particulière.

La méthode de purification de l'euprasiolite et du cérium -les deux principales terres rares- fait intervenir des acides forts (sulfurique, nitrique, chlorhydrique) et des bases fortes (soude, ammoniac), pouvant tous être aisément neutralisés.

## 2) Fabrication : exemple des panneaux photovoltaïques

Le silicium de grade solaire devant atteindre une pureté de 99,9999% (en réalité, une pureté moins grande pourrait suffire pour le solaire, mais il est en général issu des mêmes filières que celles du silicium électronique, qui lui doit être extrêmement pur), il subit deux grandes étapes de purification très énergivores.

☒ La silice du quartz est d'abord transformée en silicium métallurgique selon une réduction carbothermique :



Réduction de la silice par le carbone à 1700°C

On obtient alors un silicium de qualité dite métallurgique, pur à 99% .

Ce procédé est très énergivore : on compte 14 kWh électriques pour produire 1kg de silicium. Par ailleurs les émissions de CO<sub>2</sub> sont également importantes : il faut compter 3,14 kg de CO<sub>2</sub> rejeté pour produire 1 kg de silicium.

Dans un deuxième temps, le silicium métallurgique est transformé en silicium solaire. Cette transformation peut se faire selon une voie chimique (quasi totalité du marché) en suivant le procédé Siemens ou selon une voie métallurgique. Le procédé Siemens, est le plus répandu car il est utilisé pour l'industrie électronique, dont l'industrie solaire ne s'est pas détachée. Il a cependant un rendement faible de 25% pour une consommation de 150 kWh EF (énergie finale)/kg et génère un dégagement gazeux de HCl et de SiHCl.

Une fois le silicium de qualité solaire obtenu il est dopé par ajout de bore puis fondu sous forme de lingots avant d'être découpé en plaques ou wafers. Ce processus a des rendements en matière assez faible (20%) quelle que soit l'option choisie mais on peut distinguer :

- le silicium monocristallin ou sc-Si, constitué d'un seul cristal, qui donnera les meilleurs rendements électriques d'environ 15% mais nécessite le plus d'énergie
- le silicium polycristallin, dont la mise au point est moins énergivore mais donne des rendements plus faibles de 12%. C'est la technique la plus répandue.
- le silicium en ruban présente un rendement de 15%, mais est une technique difficile à

mettre en place. On notera qu'un procédé développé en 2002 pourrait avoir amené à doubler le rendement matière. Cette technique reste néanmoins peu répandue.

⊗ Les cellules sont par la suite améliorées grâce à différents procédés chimiques faisant intervenir des agents chimiques tels que acide fluorhydrique, acide acétique, acide nitrique, soude, potasse, alcool isopropylique IPA, CF<sub>4</sub>, silane, ammoniac, aluminium et argent.... Elles sont ensuite fixées dans une résine déthylvinyl acétate (EVA) et prises en « sandwich » entre une plaque de verre (face supérieure) et une plaque de verre ou de polyvinyl-fluorure (PVF). On a donc, pour la construction de module au silicium multicristallin, les consommations, déchets et rejets suivants :

Et.	Energie finale		Matériaux kg	Consommables kg, L	Rejets
	#	kWh <sub>th</sub>			
1	Raffinage du silicium				
	pour 1 kg de MG-Si (équiv. 66 Wc)				
	14		sable : ± 3 kg	Charbon, houille, coke, bois : 2,6 kg Graphite	poussières fines
Poly-Si	pour 1 kg de poly-Si procédé Siemens (équiv. 108 Wc)				
	100	51	MG-Si : 1,13 kg	Produits chimiques : 2 kg	produits chlorés
2	Cristallisation du silicium et mise en forme des plaques				
	pour 1 m <sup>2</sup> de mc-Si à 240 µm (équiv. 143 Wc)				
Plaques	30	1	poly-Si : 1,3 kg	Eau : 65 L Produits chimiques et gaz : 3,7 kg Creuset quartz : 0,4 kg Câble acier, abrasif SiC : 4,1 kg	silicium, slurry, cône, crouset
3	Fabrication des cellules				
	pour 156x156 mm à 285 µm (équiv. 3,6 Wc)				
Cellules	0,74	0	mc-Si : 1,06 plaque	Eau : 27 L Produits chimiques et gaz : 0,06 kg Polystyrène (emballage) : 10.10 <sup>-5</sup> kg	gaz à effet de serre, solvants organiques, émissions fluorées, effluents acides et basiques, cellules pv
4	Assemblage des modules				
	pour 60 cellules (équiv. 220 Wc)				
Modules	10,7		61,2 cellules pv Al, boîte jonction, verre, EVA, tedlar, Cu, silicone	Eau : 34 L Solvants organiques : 0,035 kg Carton (emballage) : 1,75 kg	cellules pv, EVA, tedlar

Tableau 1: Inventaire du cycle de vie simplifié d'un module au silicium polycristallin ; déchets et rejets étant encadrés

Les valeurs calculées prennent en compte un recyclage du silicium de l'ordre de 80%.

A ceci s'ajoute les déchets nécessaires à la fabrication de batteries et onduleurs qui ne sont pas négligeables puisque ces éléments les plus fragiles sont généralement remplacés plusieurs fois au cours d'une vie d'un panneau solaire.

⊗ Les différents types de déchets émis peuvent donc se résumer ainsi :

Substances dangereuses : Plomb (additif pour doper les cellules, mais aussi en plus forte quantité dans les batteries) et brome (retardateur de flamme dans les matières plastiques de l'onduleur).

Autres matériaux : EVA : relativement inerte rend le démontage des panneaux délicat, Tedlar : fabrication plus polluante que le verre et générant des émissions fluorées lors du recyclage des modules)

Argent : les ressources mondiales sont limitées et c'est le premier facteur limitant de production de panneaux photovoltaïques à grande échelle.

**Produits chimiques et rejets** : nous résumons ceux issus de la fabrication des cellules au silicium cristallin dans le tableau 2, et y ajouterons le SF6 (au pouvoir de réchauffement global estimé à 22 200 contre 1 pour le CO<sub>2</sub>) issus de la fabrication d'aluminium.

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

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

Par ailleurs, la fabrication des modules en eux même rejette de nombreuses substances chimiques (cf tableau supra) dont les traitements sont variables <sup>(5)</sup> :

-Les acides et bases inorganiques (HF, HNO<sub>3</sub>, HCl, NH<sub>3</sub> et NaOH) sont absorbés dans de l'eau qui est ensuite traitée.

-Les vapeurs de solvants sont condensées puis brûlées.

-Les gaz à effet de serre du type CF<sub>4</sub> sont craqués à haute température (>1100°C) afin de les décomposer en éléments qui peuvent être traités dans une tour de lavage. Le traitement de ce type de gaz (non réglementé) commence à se généraliser dans l'industrie photovoltaïque, son taux est estimé à 70%.

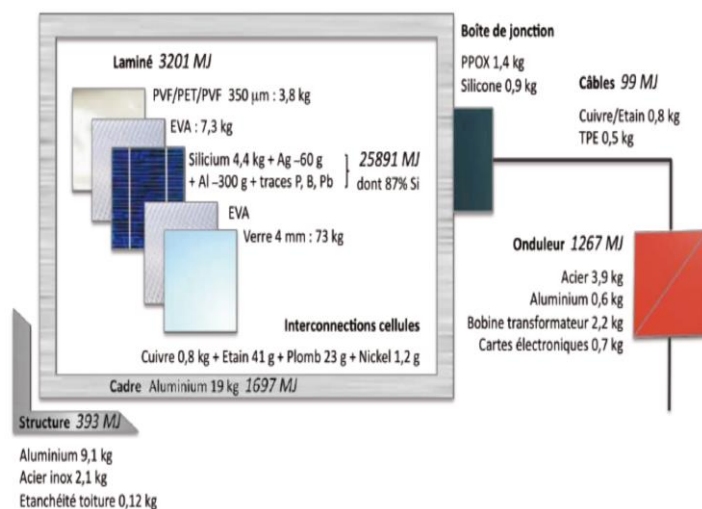
-Le fluide de coupe des plaques, appelé slurry, est un mélange de solvant organique PEG (polyéthylène glycol) et d'abrasif sous forme de micro-billes de carbure de silicium SiC, dont la fabrication est énergivore ("10 MJ EP/kg). Lors du sciage, il se charge de particules de silicium et de fer (provenant de l'acier du câble). La séparation du solvant et des particules est possible à environ 80%, le taux de réutilisation estimé est supérieur à 80%.

⊗ Les batteries sont la plupart du temps en plomb (même si certaines batteries en lithium ou nickel se développent). Elles sont alors constituées d'un électrolyte d'acide sulfurique maintenu (dans le cas des batteries fermées, plus utilisées) par un gel de silicate de sodium (ou absorbé dans un séparateur de verre AGM, moins durable). L'électrode négative est fabriquée à base d'antimoine (dans les batteries sans entretien il est remplacé par du calcium, de l'aluminium et de l'étain), d'arsenic, d'étain, de cuivre, de soufre ou de sélénium ; l'électrode positive est constituée de plomb et d'oxyde de plomb. L'élaboration d'une batterie nécessite une consommation énergétique de 8,33 kWh/kg. De plus, les batteries présentent des durées de vie courtes (5 à 7 ans) et très variables.



Cette durée de vie dépend notamment du nombre de charge et décharge que subit la batterie, puisqu'au fur et à mesure des cycles les batteries se chargent de moins en moins, et de la température à laquelle elle est exposée. Cette durée de vie courte implique de remplacer les batteries plusieurs fois (5 à 7 fois si le panneau solaire est maintenu 35 ans) au cours de la vie d'un panneau photovoltaïque ; nous nous intéresserons par la suite au recyclage des batteries et à leur coût énergétique.

Un autre élément critique est l'onduleur dont la durée de vie est courte également (une durée de 5 ans est garantie par le constructeur, les meilleures estimations l'amènent à 10). Cet élément, petite boîte grise à proximité des panneaux nécessite d'une part d'être ventilé, donc alimenté, et est d'autre part constitué de circuits électroniques (bobine, diodes, condensateurs, piles... inclus dans une résine pour former un circuit intégré). La grande diversité des onduleurs ne permet pas de chiffrage précis de la quantité de déchets qu'un onduleur génère, mais on peut dès lors retenir qu'ils présentent tous une dizaine de composants électroniques.



*s différents constituants pour l fabrication d'un ou réseau de 1kWc*

On peut par ailleurs considérer que l'onduleur doit être compté pour 2 à 3 fois, puisqu'au cours de la durée de vie d'un panneau il faudra changer celui ci 1 à 2 fois. De même pour les batteries qui ne sont pas représentées ici mais comptent pour 5 à 7 fois. Les substances chimiques issues de la fabrication des onduleurs et batteries sont variables selon les procédés industriels utilisés (et notamment l'utilisation de condensateurs chimiques ou mécaniques dans l'onduleur), mais on retrouvera les émissions classiques de construction d'élément électronique.

### **III. Le traitement des déchets**

#### 1) Prise en charge des déchets

##### ☒ *Panneaux photovoltaïques*

Les panneaux solaires ayant une durée de vie d'environ 30 ans, et 7 millions de tonnes ayant déjà été installées en Europe, l'association européenne de recyclage des panneaux photovoltaïques PVcycle considère que 130.000 tonnes devront être recyclées (ou éliminées) tous les ans en Europe d'ici 2030. L'enjeu du recyclage des panneaux photovoltaïques est donc essentiel. Le traitement des panneaux solaires en fin de vie est soumis à la directive européenne relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) depuis juillet 2012 (on notera que cette directive existe pourtant depuis 2005). 75 % des panneaux photovoltaïques en fin de vie devront être valorisés (récupérer des matières premières dites secondaires ou de l'énergie) et 65% recyclés

(remplacer totalement ou partiellement une matière première vierge dans le cycle de fabrication) les trois premières années, puis ces taux passeront respectivement à 80 % et 70 % les trois années suivantes, pour atteindre 85 % et 80 % au-delà du 15 août 2018.

La collecte et la gestion des déchets des panneaux solaires en fin de vie est à la charge des constructeurs, qui font appel à de grandes compagnies (CERES, PV cycle en Europe). Néanmoins ces processus complexes et coûteux peuvent amener (le 6/9/2013) à la cessation d'activité d'acteurs économiques comme le CERES (Centre Européen de Recyclage de l'Energie Solaire, association à but non lucratif qui misait sur la revente des matières premières recyclées) principal acteur du recyclage en France . On notera néanmoins qu'une autre association européenne, PV cycle (pionnière du recyclage des panneaux, basée elle sur le principe de responsabilité élargie du producteur), récupère les accords signés préalablement par CERES .

On notera par ailleurs que la répartition actuelle des centres de collecte en France peut nécessiter de faire parcourir plus d'une centaine de km à une installation en fin de vie avant qu'elle ne puisse être traitée.

#### ☒ *Lampes fluocompactes*

Les LFC représentent des déchets dangereux (ou DIS, classés 20 01 21 selon le catalogue européen), car elles contiennent du mercure <sup>(10)</sup>. A ce titre, elles ne peuvent pas suivre une loi « classique » de traitement des déchets (décret européen 2002-540 du 18 juillet 2002), et doivent être séparées des déchets ménagers avant d'être jetées, puis recyclées. 93% d'une LFC sont ainsi recyclables, taux supérieur à celui imposé (80 %) à l'échelle européenne pour les déchets d'équipement électrique et électronique, ou DEEE. Le décret européen 2005-829 réglementant ce type de déchets impose aux distributeurs et aux déchetteries, depuis le 20 juillet 2005, la reprise gratuite des lampes en fin de vie dans les entreprises, à hauteur de « 1 pour 1 ». La collecte peut donc se faire par dépôt au point de collecte, par un prestataire ou, pour des volumes plus importants, par l'organisme agréé Récylum. Pour les particuliers, des points de collecte sont également mis en place par Récylum au niveau des points de vente, leur permettant un dépôt sans limitation de quantité <sup>(11)</sup>.

Récylum a été créé en mai 2005 (donc avant le décret européen sur les DEEE) ; cet éco-organisme, agréé par les services publics, a pour vocation de collecter les lampes dites « à décharge » du fait de leur mode de fonctionnement (décharge d'électricité à haute fréquence dans un gaz contenant du mercure), ce qui regroupe les tubes fluorescents (ou « néons »), les LFC, LED, lampes à UV, lampes de vidéoprojecteurs, etc. à condition que ces lampes soient encore intactes. Cet organisme fonctionne donc, une fois la collecte effectuée, en partenariat avec des entreprises spécialisées dans le recyclages d'éléments spécifiques des ampoules, et notamment pour les LFC : mercure, composants électroniques et terres rares. Dès 2005, sur les 70 millions de LFC mises au rebut, 14 millions ont été recyclées. Depuis le 15 novembre 2006, Récylum a été successivement financé par une taxe d'« éco-contribution » de 0,30 € (TTC), puis de 0,18 € (TTC) depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2010, prélevée à l'achat de chaque lampe à décharge (100 millions en ont été vendues en 2007).

L'organisme a récolté 3700 tonnes de lampes à décharge en 2007, ce qui correspond à 35 % des lampes vendues (100 millions d'exemplaires en tout) ; le taux de retour pour les LFC seules, en revanche, n'est que de 18 % (soit 700 tonnes, pour l'année 2008). Ce faible taux peut s'expliquer par une mise sur le marché plus tardive que les autres lampes à décharge (donc une sensibilisation du public plus récente), et dans l'absolu par une durée de vie importante. Malgré cela, le taux de LFC recyclées grâce à Récylum va augmentant : en 2012, 4270 tonnes de lampes ont été recyclées (soit 36 % des LFC et tubes arrivés en fin de vie cette année-là), contre 4042 tonnes en 2011 (35%). Malgré cette augmentation annuelle, et des sondages montrant que la prise de conscience par la population augmente, 65 % environ des LFC et tubes finissent avec les ordures ménagères, ce qui

représente une forte exposition de l'environnement au mercure relargué par ces lampes ; l'objectif de Récyclum est d'arriver à 65 % de lampes recyclées d'ici 2019 <sup>(12)</sup>.

## 2) Le processus de recyclage

### a) Cas des panneaux solaires

α D'après EDF, 85% du poids d'un panneau solaire peut-être recyclé. Le traitement s'effectue selon plusieurs étapes <sup>(13)</sup> :

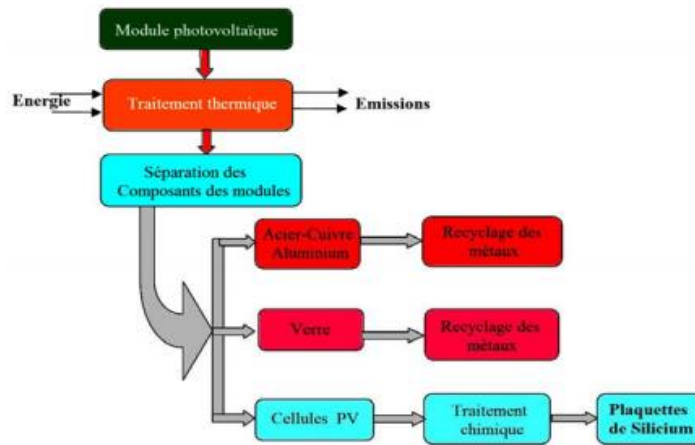


Illustration 7: Étapes de recyclage d'un panneau photovoltaïque

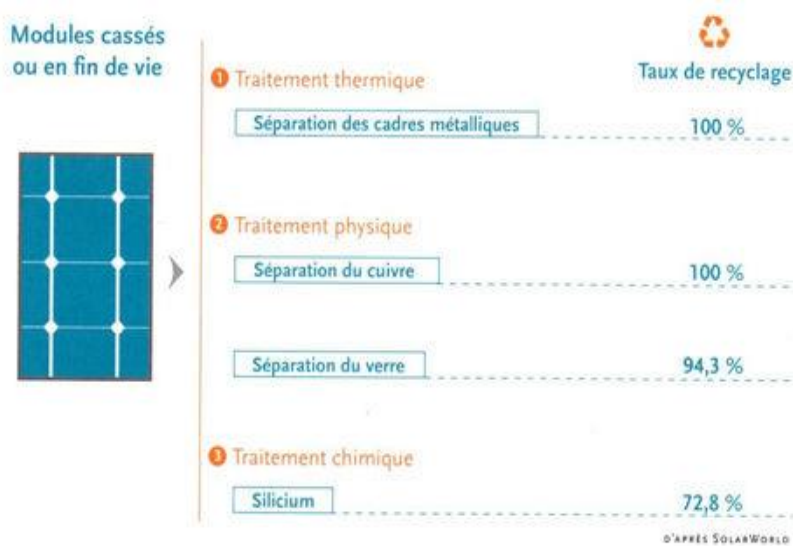


Illustration 8: Taux de recyclage des différents éléments issus d'un module

On notera que les taux de recyclage indiqués ne prennent pas en compte les composants annexes (tel que l'EVA) éliminé au cours de ces différents processus.

Lors du traitement thermique, la colle du cadre, les feuilles d'EVA (10% du poids d'un module) et le cadre plastique du module seront brûlés. Le verre qui recouvre les modules est transformé en granules et stocké.

Le cuivre qui relie les différentes cellules au sein d'un module et le verre sont séparés par un traitement physique.

Le silicium est récupéré avec un traitement chimique à base de KOH ; le silicium issu des

procédés de recyclage peut être intégré dans les processus de fabrication de cellules ou modules, fondu et intégré dans les procédés de fabrication des lingots de silicium ou s'il est impur être valorisé en tant qu'agrégat des fours de fonte. On étudiera les économies d'énergies que cette valorisation permet dans le III.

⊠ Les batteries et onduleurs sont à remplacer plus régulièrement. Ces deux composants électroniques sont également soumis à la réglementation DEEE, mais si un effort sur le recyclage des batteries semble réalisé, le manque d'informations sur le devenir des onduleurs laisse supposer qu'ils ne sont pas du tout valorisés.

Dans le cas des batteries au plomb <sup>(14)</sup>, le recyclage, bien que complexe du fait de la multiplicité des matériaux peut atteindre 60% en Europe (mais il n'est que de 20% en Afrique où les installations autonomes sont pourtant très répandues puisqu'elles permettent de fournir de l'électricité aux villages isolés). Le polypropylène est vendu à des recycleurs de matières plastiques tandis que le plomb alimente les usines de fabrication de batteries (jusqu'à 55% du plomb utilisé). La filière de recyclage des batteries au plomb répond bien au minimum de recyclage de 65% en poids fixé réglementairement. On notera cependant que la toxicité des batteries au plomb nécessite un démantèlement très rigoureux et qu'un recyclage méthodique et plus poussé pourrait être attendu : en effet, 40% des batteries au plomb ne sont pas recyclées. On ajoutera à ceci qu'une batterie au plomb recyclée à 60% (moyenne en Europe, <sup>(14)</sup>) récupère l'énergie grise dépensée à sa fabrication en 155 cycles et qu'elle maintient une charge exploitable (80% de profondeur de décharge) sur 250 cycles ; les meilleures batteries au plomb peuvent laisser espérer stocker 5 à 6 fois l'énergie grise de leur fabrication au cours de leur durée de vie, mais en réalité ce chiffre est nettement plus faible dans le cas des systèmes solaires autonomes parce que 20 à 30% d'énergie sont perdus (par exemple quand la batterie est pleine en été). On peut donc considérer qu'une batterie, même recyclée, ne permet de stocker de l'énergie « propre » que pendant les 2/3 de sa vie.

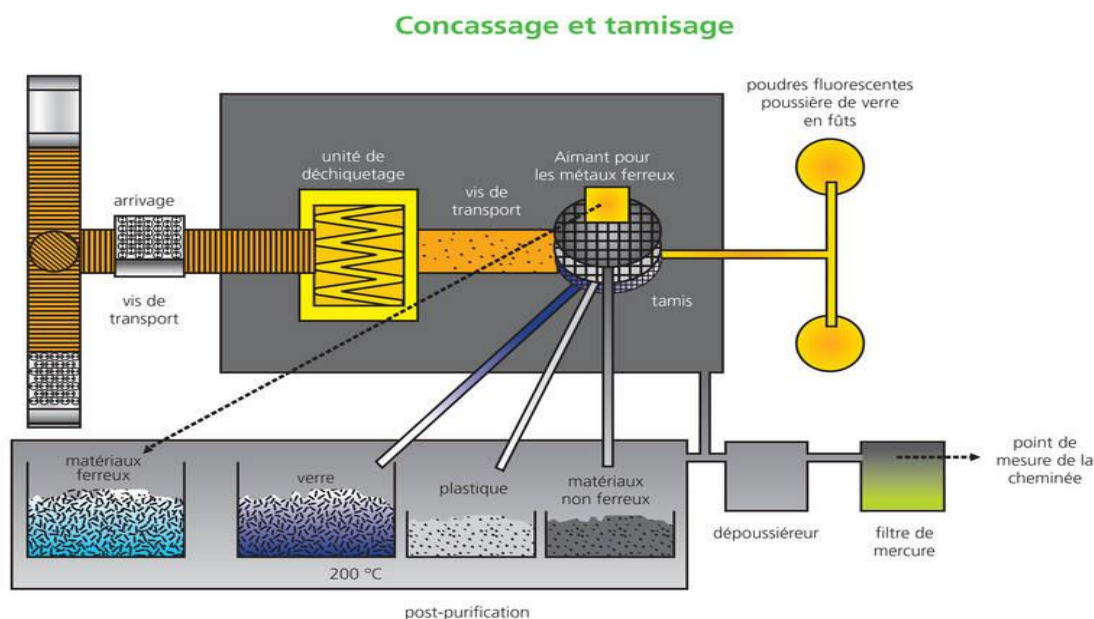
On a vu qu'une des principales causes de dépenses énergétiques dans l'élaboration de panneaux solaire était due à la purification et à l'élaboration des modules de silicium ; le recyclage permet ainsi d'économiser jusqu'à 30% de l'énergie nécessaire à leur fabrication.

#### b) Cas des LFC

A leur arrivée dans les centres spécialement habilités dans leur recyclage et autorisés à l'effectuer (Indaver, Artémise, SARP Industries, Lumiver et Coved pour la France <sup>(15)</sup>), les lampes sont broyées, dans le but d'être séparées en différentes fractions, notamment selon la nature dangereuse ou non de leurs composants. Selon ce procédé, dit Helborn, il y a ensuite chauffage du verre des lampes à 360°C. Le mercure est alors vaporisé et aspiré, puis passe par des filtres à charbon actif, avant de se recondenser par distillation sous vide (voir illustration 9) ; les poudres luminescentes sont isolées et stockées hermétiquement. D'autres techniques peuvent être employées pour le traitement des tubes fluorescents.

Dans les LFC, le verre (de type sodocalcique) est ensuite contrôlé, puis passe par une chambre de post-purification, pour vérifier qu'il est totalement dépourvu de mercure <sup>(16)</sup> ; il est ensuite envoyé chez des préparateurs de verre pour y être recyclé, notamment en nouvelles lampes à décharge, ou en abrasifs et en isolants pour bâtiments.

Après contrôles, le culot, contenant le ballast, est quant à lui envoyé en centre de traitement pour valoriser énergétiquement la carte électronique (notamment la résine époxy) et le plastique par incinération. La partie métallique du culot est envoyée en fonderie pour être de nouveau utilisable.



*Illustration*

9: Broyage des lampes et tri de leurs éléments chez Indaver (Belgique) <sup>(17)</sup>

Le processus total de recyclage, ramené à une LFC, consomme ainsi  $4,84 \cdot 10^{-6}$  kg-équivalent CO<sub>2</sub>. L'impact environnemental de ce recyclage est beaucoup plus marqué du fait du rejet de matières polluantes en cas de bris des ampoules qu'à cause du rejet de gaz à effet de serre.

### 3) Mercure et recyclage des LFC

Le mercure est présent en faible quantité dans une LFC (environ 0,005 % du poids de l'ampoule). Une fois le mercure issu des ampoules distillé (voir 2), il est récupéré dans des centres spécialisés <sup>(18)</sup>, à raison de plusieurs centaines de tonnes par an dans le monde <sup>(19)</sup>. Le rôle environnemental du recyclage est primordial en termes d'émissions de mercure : rappelons qu'environ 65 % des LFC ne sont pas recyclées en France, et qu'il existe un risque de bris des ampoules lors de leur utilisation, de leur transport, et de leur mise en décharge le cas échéant. Le tableau 3 montre la corrélation entre quantité d'ampoules recyclées et les rejets de mercure (calculés).

Taux de LFC recyclées	Rejets de mercure dus aux LFC (kg/an)
20 %	1592
50 %	1027
100 %	462

Tableau 3: Recyclage des ampoules et rejets de mercure à l'échelle européenne (4,5 mg Hg par ampoule) <sup>(20)</sup>

Le tableau montre que même dans le cas d'un recyclage total, les rejets de mercure sont non nuls. Ce résultat s'explique par les problèmes de bris des ampoules, et par le rejet de 16 ng de mercure pour la production d'un kWh par une centrale électrique au charbon <sup>(21)</sup>. Ainsi, tous types de lampes confondus (y compris à incandescence), en 2007, 5264 kg de mercure ont été rejetés dans la nature pour leur fabrication ou leur destruction. Cet élément chimique étant présent dans la plupart des organismes, il est fortement toxique à partir d'une certaine dose : une concentration supérieure à 20 µg/m<sup>3</sup> dans l'air ambiant a déjà des effets à long terme sur le système nerveux humain, avec une valeur limite dans le sang de 100 µg/L <sup>(22)</sup>. Des précautions très fortes sont donc prises dans les

usines de recyclage pour les ouvriers. Par ailleurs, dans la nature, le mercure Hg peut être transformé en méthylmercure  $\text{CH}_3\text{Hg}^+$ , cancérigène, qui se concentre dans certains maillons de la chaîne alimentaire.

Pour ces raisons, les quantités de mercure présentes dans les LFC vont décroissant <sup>(23)</sup> (5 mg jusqu'à 2011, 3,5 mg en 2012 et 2,5 mg à partir de 2013 pour les ampoules de moins de 30 W), grâce aux normes européennes. Le but est, à terme, d'empêcher l'emploi de mercure dans les ampoules par les fabricants, les contraignant à trouver de nouvelles technologies.

#### 4) Recyclage des terres rares des LFC

Contenues dans les poudres phosphorescentes (cf. I), les terres rares doivent faire l'objet d'un traitement spécifique ; il y a encore quelques années, elles étaient enfouies, faute de pouvoir être recyclées.

Actuellement, le seul industriel français – et mondial – à opérer leur recyclage est Rhodia <sup>(24)</sup> (groupe Solvay), grâce à une technique particulière mise au point au début des années 2010. Elle s'articule en deux étapes <sup>(25)</sup>, séparées dans l'espace et dans le temps : la première, d'extraction d'une poudre riche en terres rares à partir des poudres luminophores issues du broyage des LFC, a lieu à St-Fons : celles-ci subissent d'abord une attaque chimique, puis sont filtrées par séparation solide-liquide. Les effluents liquides issus de l'attaque chimique sont traités dans une station d'épuration dédiée, et les événements gazeux dégagés par la séparation passent par une colonne de lavage où ils sont réabsorbés. Les poudres conservées après séparation sont ensuite séchées, puis conditionnées pour être envoyées à La Rochelle.

C'est là qu'a lieu la seconde étape, visant à extraire les terres rares purifiées de ces poudres enrichies. Lors d'un premier traitement thermique, celles-ci passent dans un four tunnel, avant d'être remises en suspension, puis filtrées et lavées. Les poudres non dissoutes subissent ensuite une attaque par l'acide nitrique ; elles passent enfin dans des batteries, qui séparent les différentes terres rares. Les déchets liquides et gazeux sont, de même, traités dans les centres appropriés.

Les terres rares extraites se divisent en terres dites « légères » (La, Ce) et en terres « lourdes », d'intérêt majeur dans le domaine des nouvelles technologies (Y, Eu, Gd, Tb). Une fois celles-ci obtenues, elles peuvent être réemployées dans l'industrie, et notamment dans la fabrication de nouvelles LFC.

#### **Bilan :**

Les déchets résultant des installations photovoltaïques sont donc essentiellement des fluides chimiques lors des phases de purification de la silice, des gaz issus de la combustion d'EVA ou du verre et des déchets électroniques pour les installations raccordées au réseau, auxquels s'ajoute du plomb en quantité importante pour les installations autonomes. Bien de gros progrès soient réalisables quant au recyclage de la silice des modules et aux composants annexes, les panneaux photovoltaïques présentent ainsi l'intérêt de ne pas laisser de déchets à durée de vie indéterminée.

A titre de comparaison, la -volumineuse- dalle en béton qui sert à ancrer l'éolienne au sol ne subit aucun démantèlement et reste dans le sol et seules les parties métalliques (acier, cuivre et aluminium qui représentent respectivement 89,1 ; 1,6 et 0,8% du poids des pales ainsi que le mât) des éoliennes (de durée de vie comparable) sont recyclées tandis que la colle, les plastiques (jusqu'à 3,5kg/turbine) ou les fibres de verre (21,8 kg/turbine) <sup>(26)</sup> sont brûlés et ne permettent qu'une revalorisation énergétique. Les déchets des centrales nucléaires quant à eux ne sont recyclables qu'à environ 10% (seul l'uranium qui constitue 95% des déchets l'est, mais il reste quasi systématiquement en centre de stockage de déchets peu radioactifs). Les déchets ultimes (4% des déchets du nucléaire énergétique) qui représentent environ 26t/an pour la France et concentrent 99% de la radioactivité des déchets ; restent d'une dangerosité extrême pour plusieurs centaines de milliers d'années et on ne sait pour l'instant que les stocker.

Le bilan déchet des éoliennes comme du photovoltaïque est donc intimement lié au progrès qui pourront être réalisés dans la séparation des composants (EVA et fibres de verre), mais aussi, au

vu des coûts encourus, aux politiques incitatives de retraitement qui pourront être mises en œuvre. En revanche, le traitement des déchets nucléaires semble être dans une impasse puisque toutes les recherches faites dans ce domaine concernent stockage et enfouissement.

Malgré de grandes avancées dans le domaine de la réglementation et du recyclage autour des lampes fluocompactes (et des lampes à basse consommation en général), elles demeurent une préoccupation environnementale majeure pour l'Union Européenne, du fait de trop grands rejets annuels de mercure ; la controverse dont elles font l'objet s'explique aussi par l'émission de rayonnements électromagnétiques dangereux dans certaines conditions. Elles semblent en revanche représenter une meilleure solution énergétique que les lampes à incandescence - d'ailleurs vouées à disparaître. L'illustration 10 établit le bilan énergétique et environnemental établi par le CIRAIQ (centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services, basé au Québec) afin de comparer ampoules à incandescence et LFC. Il apparaît ainsi que les déchets d'emballage, ainsi que les déchets constitués par les ampoules elles-mêmes, sont plus importants en masse pour les lampes à incandescence que pour les LFC (à raison d'une pour 10 lampes à incandescence, selon l'étude) ; l'étude que nous avons menée a néanmoins montré que les déchets dus aux LFC sont de traitement plus complexe, car celles-ci sont constituées de matériaux plus polluants. Ainsi, si les LFC ont pour avantage de produire une moindre quantité de déchets, elles ont aussi pour inconvénient d'être beaucoup plus longues à recycler, car elles impliquent une purification des terres rares et du mercure, qui n'est souvent pas prise en compte dans les analyses de cycle de vie. L'impact environnemental des LFC dû à leur aspect composite est notamment visible, dans le tableau, au coût énergétique de la fabrication d'une LFC, trois fois plus important que celui de 10 lampes à incandescence.

La technologie d'avenir dans le domaine de l'éclairage apparaît comme étant la LED, qui répond à tous les critères auxquels ne répondent pas les deux autres types d'ampoules, consomme 2 fois moins d'énergie à luminosité égale et possède une durée de vie 5 fois plus longue que les LFC.

Toutes ces technologies vertes, dont le but est de produire de l'énergie sans rejet de gaz à effet de serre ont en contrepartie un coup énergétique élevé à la fabrication ; l'impact énergétique et le bilan-carbone de ces technologies est traité en annexe.

*Illustration 10: Bilan comparatif du CIRAIQ entre lampe à incandescence et LFC <sup>(27)</sup>*

## **Bibliographie :**

- ⑩ (1) NU-WAY SYSTEMS and DESIGN RECYCLE INC , *Design Recycle Inc* modification le 9/02/2010 [<http://www.designrecycleinc.com/led%20comp%20chart.html>]
- ⑩ (2) ENERGY STAR, *Learn about CFLs* : [[http://www.energystar.gov/index.cfm?c=cfls.pr\\_cfls\\_about](http://www.energystar.gov/index.cfm?c=cfls.pr_cfls_about)]
- ⑩ (3) LAPERCHE, Dorothee, *Actu-environnement*, 2/10/2013 [<http://www.actu-environnement.com/ae/news/production-industrielle-photovoltaique-mondilae-augmentation-moindre-2012-19606.php4> ]
- ⑩ (4) GRENON, Georgina, BOUTOT, Romary, *Rapport Panorama énergies et climat*, p115-120 [[http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Panorama-energies-climat\\_E2013.pdf](http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Panorama-energies-climat_E2013.pdf) ]
- ⑩ (5) Systèmes photovoltaïques, fabrication et impact environnementale, HESPUL, juillet 2009 , *photovoltaïque.info* [[http://www.photovoltaïque.info/IMG/pdf/PV\\_Fab\\_Envt\\_final\\_26082009.pdf](http://www.photovoltaïque.info/IMG/pdf/PV_Fab_Envt_final_26082009.pdf)]
- ⑩ (6) TOTAL, AFP, LA RECHERCHE, 06/08/2010 (mise à jour le 09/12/2013), *planete-energies.com* [<http://www.planete-energies.com/fr/l-energie-au-quotidien/les-nouveaux-usages/le-solaire-pourquoi-et-comment-l-usage-du-photovoltaïque-dans-le-monde-175.html>]
- ⑩ (7) CONSOGLOBE, *Planetoscope*, 2012 : [<http://www.planetoscope.com/Source-d-energie/517-ventes-d-ampoules-fluocompactes-lfc-en-europe.html>]
- ⑩ (8) DAMIEN, Alain, *Guide du traitement des déchets – 6<sup>e</sup> édition : Réglementation et choix des procédés*, Dunod/L'Usine Nouvelle, 2013
- ⑩ (9) SCIENTIFIC CONSULTING GROUP DE GAITHERSBURG, *The Scientific consulting group, INC* Maryland (2010) Analysis and comparison of incandescents, compact fluorescent lamps, and light emitting diode lamps in residential applications : [<http://www.scgcorp.com/docs/LightingReport.pdf>]
- ⑩ (10) CONSOGLOBE, *Planetoscope*, 2012 : <http://www.planetoscope.com/recyclage-dechets/327-collecte-et-recyclage-d-ampoules-en-france.html>
- ⑩ (11) AFE, Avis de l'ADEME *Les lampes basse consommation* , août 2009: [<http://www.afe-eclairage.com/fr/uploads/documentation/10223-ext.pdf> ]
- ⑩ (12) RÉCYLUM : [[www.recyclum.com](http://www.recyclum.com)]
- ⑩ (13) *solarpedia*, recyclage d'après ADEME - *Étude du potentiel de recyclage de certains métaux rares*
- ⑩ (14) LABOURET, Anne, VILLOZ, Michel, *Énergie solaire photovoltaïque 3<sup>ème</sup> édition*, Édition Le moniteur, Dunod (Paris), 2007
- ⑩ (15) SOCIÉTÉ CHIMIQUE DE FRANCE, *Le mercure* : [<http://www.societechimiquedefrance.fr/extras/Donnees/metaux/hg/texhg.htm>]
- ⑩ (16) ARTÉMISE, *Traçabilité* (2012-2014) : [<http://artemise-recyclage.com/services.php?s=tracabilite>]
- ⑩ (17) INDAVER, *Traitement des tubes néon et des autres déchets contenant du mercure* : [<http://www.indaver.be/fr/traitement-des-dechets/recyclage/dechets-contenant-du-mercure.html>]
- ⑩ (18) MBM ENERGIPOLE, *Une technologie et des process uniques* : [<http://mbm.energipole.com/index.php/category/8>]
- ⑩ (19) CD2E, *Mercurie* : [<http://www.cd2e.com/node/280>]
- ⑩ (20) SCIENTIFIC COMMITTEE ON HEALTH AND ENVIRONMENTAL RISKS SCHER « Opinion on Mercury in Certain Energy-saving Light Bulbs », *European commission, health and consumers scientific committees*:



[[http://ec.europa.eu/health/scientific\\_committees/environmental\\_risks/docs/scher\\_o\\_124.pdf](http://ec.europa.eu/health/scientific_committees/environmental_risks/docs/scher_o_124.pdf)

⑩ (21) VITO (2009) : [<http://www.vito.be/VITO/Search.aspx> ]

⑩ CNRS, *Prévention du risque chimique* :

-(22) *Le mercure, cycle et toxicité*: [<http://www.prc.cnrs-gif.fr/spip.php?article75>]

-(23) *Le mercure et les lampes basse consommation* : [<http://www.prc.cnrs-gif.fr/spip.php?article88>]

⑩ (24) CLARKE, Baptiste, 26/09/2012, *Actu-environnement* : [<http://www.actu-environnement.com/ae/news/procede-recyclage-terre-rare-lourdes-16657.php4>]

⑩ (25) SOLVAY-RHODIA, *Objectifs du projet Loop Life*, 2014 :

[[http://www.rhodia.com/fr/about\\_us/businesses/rare\\_earth\\_systems/Loop\\_Life\\_project\\_objectives.tcm](http://www.rhodia.com/fr/about_us/businesses/rare_earth_systems/Loop_Life_project_objectives.tcm)]

⑩ (26) ELSAM, 20/10/2004, *Vestas*;

[http://www.vestas.com/files%2ffiler%2fen%2fsustainability%2flca%2flca\\_v80\\_2004\\_uk.pdf](http://www.vestas.com/files%2ffiler%2fen%2fsustainability%2flca%2flca_v80_2004_uk.pdf)

⑩ (27) CIRAIG (2008) Analyse du cycle de vie comparative d'ampoules électriques : incandescentes et fluorescentes compactes, Rapport final , *CIRAIG*:

[http://www.ciraig.org/pdf/ACV\\_Ampoules\\_Rapp\\_Final.pdf](http://www.ciraig.org/pdf/ACV_Ampoules_Rapp_Final.pdf)

⑩ (28) BEN, 28/02/2008 *TheWatt* : <http://www.thewatt.com/node/175>

## ANNEXE

# L'impact énergétique des technologies vertes au cours de leur cycle de vie.

### Installations photovoltaïques

⌘ Fabrication et impact carbone :

On peut estimer la contribution à l'effet de serre (traduite par un équivalent CO<sub>2</sub> par kWh produit) d'un système photovoltaïque. Néanmoins ces calculs dépendent fortement de la productivité du système (donc de la région où il est installé) mais aussi de la valeur en g CO<sub>2</sub> équivalent du pays constructeur. Deux études réalisées l'une dans le cadre du projet espace-PV (cofinancé par l'ADEME) et l'autre par le NREL (laboratoire national des énergies renouvelables aux Etats-Unis) montrent ainsi des valeurs d'équivalent CO<sub>2</sub> assez variables, résultant peut-être des différences de valeurs du mix énergétique entre la France et les Etats-Unis.

g CO <sub>2</sub> -eq/kWh	au sol	en toiture
Toutes technos photovoltaïques	44	
mono-Si (14 %)	40	40
multi-Si (13,2 %)	69	46
a-Si (6,3 %)	28	29
CdTe (10,9 %)	21,5	22
CIGS (11,5 %)	44	46

Tableau 4: Empreinte carbone des différentes technologies photovoltaïques (données 2005-2006), source NREL

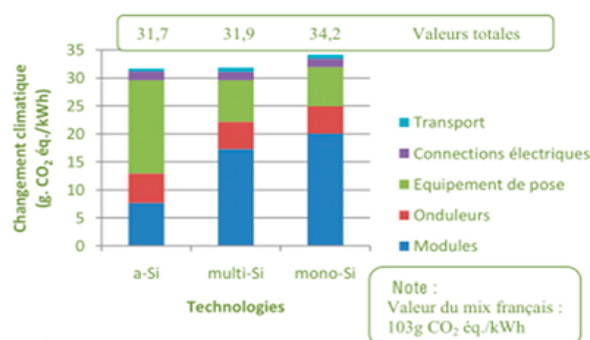


Illustration 11: Empreinte carbone, source projet espace

Pour une irradiation du type Sud Europe de 1700kWh/m<sup>2</sup>/an, on trouve un équivalent de 35g CO<sub>2</sub>-eq/kWh pour la fourniture électrique de la région Europe à l'UCTE (Union pour la Coordination du Transport de l'Electricité en Europe, à 0,48kg de CO<sub>2</sub>-eq/kWh) mais seulement 23g CO<sub>2</sub>-eq./kWh pour le procédé Elkem (et non Siemens) de purification du silicium utilisé en Norvège. A titre de comparaison la production d'électricité à partir de charbon, de technologie nucléaire et d'éolien sont respectivement de 1000, 6 et 11 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh .

Cependant ces valeurs ne considèrent que des installations raccordées au réseau, puisqu'aucune de ces études ne prend en compte les batteries, dont on a vu qu'il convient de les remplacer de nombreuses fois et qu'elles ont une fabrication coûteuse en énergie. Par ailleurs, ces valeurs sont issues de la conversion MJ en CO<sub>2</sub> eq. et ne tiennent peut-être pas compte des émissions de CO<sub>2</sub> inhérentes aux processus de fabrications des composants (on a notamment vu en I que la purification du silicium émettait 3,14kg de CO<sub>2</sub> par kg de silicium métallurgique fabriqué)

⌘ Économies d'énergie et recyclage :

Les panneaux solaires représentant une source d'énergie dite « renouvelable » ou « propre », mais nous avons vu que la fabrication de panneaux solaire nécessitait beaucoup d'énergie, en particulier en ce qui concerne l'élaboration des modules de silice. A l'énergie nécessaire à la fabrication des modules photovoltaïques s'ajoute celle nécessaire à la fabrication d'onduleurs (nous en compterons 2 puisque la durée de vie de 10 à 15 ans nécessite son remplacement). On peut donc considérer que l'énergie nécessaire à l'élaboration et au maintien d'un système complet

photovoltaïque de 1 kWc (le Wc correspond à la puissance électrique maximale pouvant être fournie ; en occurrence 1kWc représente une installation de 5 à 10 m<sup>2</sup> et peut fournir environ 1250kWh/an à Nice) est de  $3201 + 1697 + 333 + 25891 + 99 + 2 \cdot 1267 = 33755$  MJ si celui est fabriqué de novo.

Si ce système est à vocation autonome il convient alors d'ajouter l'énergie nécessaire à l'élaboration de batteries (nous en comptons 6 pour un panneau solaire) et il faudra alors  $33755 + 6 \cdot 1199 = 40949$  MJ.

Si l'on considère un recyclage de 60% du silicium et une économie d'énergie de 30% lors de la fabrication de module à partir de silicium recyclé (cf tableau infer), on obtient une énergie nécessaire à la fabrication du même système de  $3201 + 1697 + 333 + 0,6 \cdot 0,7 \cdot 25891 + 0,4 \cdot 25891 + 99 + 2 \cdot 1267 = 29094$  MJ. Ici aussi considérer le remplacement augmenté de manière très importante le coût énergétique de fabrication, puisqu'en considérant des batteries recyclées à 60% (valeurs pour l'Europe) économisant 25% d'énergie, on obtient une énergie nécessaire à la fabrication du même système de  $29094 + 6 \cdot 0,6 \cdot 0,75 \cdot 1199 + 6 \cdot 0,4 \cdot 1199 = 35209$  MJ

On notera que la bibliographie [1] donne des valeurs de l'ordre de 20 à 25000 MJ ce qui est bien inférieur, et résulte de la non prise en compte des batteries qui doivent être souvent remplacées.

On trouve dans les études ([1],[2]) que le temps de retour énergétique (c'est à dire le temps nécessaire pour qu'un système photovoltaïque ai produit autant d'énergie qu'il a fallu à sa fabrication) d'un système photovoltaïques est en moyenne de 3,3 ans pour des cellules multicristallines sous un ensoleillement de 1700kW/m<sup>2</sup>/an.

---

### LFC :

⊗ Extraction de matières premières :

Il convient de noter qu'une LFC est plus lourde et plus complexe qu'une ampoule à incandescence ; l'extraction des matières premières nécessaires à sa fabrication est donc plus coûteuse énergétiquement. Les principaux composants métalliques des LFC étant en grande partie extraits en Chine, lieu d'assemblage des ampoules, il y a une assez bonne optimisation des transports du secteur primaire au secondaire donc relativement peu d'émissions de CO<sub>2</sub> de ce point de vue. On compte finalement 0,164 kg-équivalent CO<sub>2</sub> pour l'extraction des matières premières nécessaires au ballast, et  $8,56 \cdot 10^{-2}$  kg-équivalent CO<sub>2</sub> pour la lampe.

⊗ Fabrication :

Une LFC se composant principalement d'un tube fluorescent et d'un ballast électronique, ces deux éléments nous intéresseront particulièrement pour l'étude de la fabrication des ampoules.

Lors de la fabrication d'un tube fluorescent, un long tube de verre est d'abord chauffé, puis tordu de la manière désirée ; un séjour dans une solution contenant les poudres phosphorescentes (ainsi que de l'oxyde de polyéthylène) permet d'en imprégner l'intérieur du tube. Celui-ci est ensuite séché et placé dans un four à 550°C pendant 3 minutes, puis couvert d'un agent blanchissant fluorescent. Ensuite, pendant que l'argon et le mercure y sont introduits, la cathode est chauffée – ce qui permet de vaporiser le mercure, liquide, à l'intérieur du tube. Enfin, le tube est scellé, en attendant d'être solidarisé avec le ballast.

La fabrication du ballast commence par l'élaboration d'une carte de circuit imprimé (carte PCB), composée d'une couche conductrice (généralement une fine couche de cuivre) et d'une couche isolante diélectrique (résine époxy). Le cuivre est ainsi collé sur le substrat isolant, puis l'excédent est éliminé alors qu'une « gravure » permet de laisser uniquement les motifs voulus ; plusieurs cartes PCB ainsi formées peuvent ainsi être assemblées, formant des cartes multi-couches. La carte est ensuite percée par de petits morceaux de tungstène solide, les trous étant ensuite comblés par des anneaux métalliques – ce qui permet une connexion entre des conducteurs situés de

chaque côté de la carte. Le circuit imprimé ne sera fonctionnel qu'après assemblage de ces cartes PCB avec d'autres composants électriques, grâce à un joint métallique assurant une cohérence mécanique et électrique.

Le bilan énergétique de la fabrication d'une LFC est donné en comparaison à celui d'une ampoule à incandescence dans le tableau 1 :

	LFC	Incandescence
Verre	0,17	0,11
Plastique	0,68	0
Electronique	0,66	0
Laiton	0,18	0,18
<b>Bilan</b>	<b>1,69</b>	<b>0,29</b>

Tableau 1: Coût énergétique des composants des ampoules (en kWh) <sup>(28)</sup>

La différence de coût énergétique entre les ampoules à incandescence et fluocompactes se joue donc lors de leur fabrication, les LFC étant beaucoup plus compliquées d'assemblage – notamment à cause de l'introduction très délicate du mercure dans les tubes, qui nécessite un conditionnement parfois indisponible dans les usines. Par ailleurs, du fait du lieu de fabrication des LFC, la forte demande en énergie qu'elle implique se traduit par d'assez importantes émissions de CO<sub>2</sub>, car la Chine emploie essentiellement du charbon pour sa production énergétique ; le transport des pièces d'une usine à l'autre, rendu nécessaire par la complexité du ballast, augmente encore ce coût énergétique. Ainsi, selon une étude du RMI (Rocky Mountain Institute), 7,2 % de l'équivalent CO<sub>2</sub> (soit 1,85.10<sup>-2</sup> kg) produit au cours de la vie d'une LFC de 23 W sont dus à sa fabrication ; l'équipement électronique est le plus demandeur en énergie.

Il ne faut pas conclure trop vite qu'une LFC est écologiquement moins viable qu'une ampoule à incandescence : il faut bien sûr prendre en compte les économies d'énergie réalisées pendant l'usage des LFC.

#### ⌘ Distribution :

Entre l'étape de fabrication des LFC et leur distribution, a lieu l'étape d'emballage. Une ampoule est généralement emballée avec un support de carton recouvert par du plastique ; le coût énergétique de ce processus pour une ampoule est de 2,94.10<sup>-4</sup> kg-équivalent CO<sub>2</sub>, ce qui est très faible. Cependant, l'impact environnemental de la fabrication du carton blanchi se mesure principalement en terme de matières polluantes ; on ne s'y intéressera pas ici.

Le transport des LFC commence à Shanghai, où la plupart d'entre elles sont fabriquées ; elles sont ensuite transportées par camion, jusqu'au port chinois d'où elles partent par bateau dans le monde entier. En supposant un transport maritime jusqu'à Los Angeles puis un acheminement par camion vers Denver (exemple de l'étude du Scientific Consulting Group de Gaithersburg), où se trouve un centre de stockage, 1,73.10<sup>-3</sup> kg-équivalent CO<sub>2</sub> au total est dû au transport d'une LFC emballée. Ce résultat est supérieur à celui obtenu pour les ampoules à incandescence (qui ne sont pas nécessairement fabriquées en Chine), mais négligeable devant la part de la fabrication elle-même sur l'équivalent CO<sub>2</sub> d'une LFC.

#### ⌘ Usage :

Qualifiées de « lampes à basse consommation », les LFC se distinguent en effet des ampoules à incandescence par leur longévité et leur faible consommation énergétique, qui compensent leur coût énergétique de fabrication, et permettent un moindre rejet de gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>). Les résultats suivants seront cependant fournis en kWh ; la conversion en kg-

équivalent CO<sub>2</sub> se fait à raison de 66 g de CO<sub>2</sub> rejetés pour 1 kWh fourni grâce au nucléaire, 664 g grâce au fioul et 960 g grâce au charbon.

Par ailleurs, comme le montre le tableau 2, une LFC est consommatrice d'une puissance électrique en moyenne quatre fois moins grande qu'une ampoule à incandescence, pour une même luminosité émise.

Luminosité (lumen)	Consommation d'une lampe à incandescence (W)	Consommation d'une LFC (W)
450	40	9-13
800	60	13-15
1100	75	18-25
1600	100	23-30
2600	150	30-55

Tableau 2: Consommation comparée des deux types d'ampoules

Les LFC sont ainsi construites pour durer 8000 heures en moyenne (à condition de ne pas les éteindre/allumer trop souvent), contre 1200 pour leurs homologues à incandescence. Le bilan des déchets dus à une LFC doit donc être comparé à celui de 6 ampoules à incandescence (qui nécessitent plus de kWh pour leur cycle de vie complet qu'une LFC).

Enfin, l'énergie consommée par une LFC est convertie à 80 % en lumière et à 20 % en chaleur (70°C), alors qu'une ampoule à incandescence la convertit en chaleur à 95 % (jusqu'à 150°C). Cette propriété peut être avantageuse, ou non, en terme de chauffage intérieur ; en effet, si l'on désire chauffer le logement, il paraît plus intéressant d'employer des ampoules à incandescence, alors que s'il faut le rafraîchir, celles-ci augmenteront les frais de climatisation. Or, les besoins de chauffage sont plus importants en hiver, donc lorsque les jours sont plus courts et que l'on s'éclaire plus. La prise en compte de ces paramètres s'appelle « scénario de l'effet croisé », et n'a été effectuée que dans l'analyse de cycle de vie menée par le CIRAIG. Cette analyse (menée pour le Québec) conclut qu'il faut, du point de vue énergétique, encourager les LFC, car bien que le chauffage par les lampes à incandescence soit moins polluant que le chauffage au mazout ou au gaz naturel, 70 % des logements québécois se chauffent à l'électricité. Cette conclusion est néanmoins discutable au vu des résultats de l'étude ; il semble en réalité plus intéressant, pour des climats aussi rigoureux, de s'éclairer avec des lampes à incandescence, quelle que soit la source de chauffage.

⌘ Recyclage :

La voie du recyclage permet d'éviter au maximum la quantité de déchets plastiques incinérés, déjà importante dans les LFC par rapport aux lampes à incandescence. En tant qu'éco-organisme, Récylyum s'est également engagé à minimiser l'impact environnemental de la collecte des LFC en termes de CO<sub>2</sub>, en optimisant le trajet des camions récupérant les ampoules usagées ainsi que leur chargement, mais aussi en soutenant financièrement les véhicules éco-conçus. A titre indicatif, aux États-Unis, on estime à 9,15 g-équivalent CO<sub>2</sub> l'empreinte carbone de la collecte d'une LFC.