

Analyse technique et économique de recyclage des modules photovoltaïques

K. Hamouda¹, A. Tkouti¹, M.D. Mouss¹, C. Hamouda¹ et A. Malek²

¹ Département de Génie Industriel, Université El Hadj Lakhdar
Rue Chahid Boukhrouf Mohamed El Hadi, B.P. 499, Batna, Algérie

² Division de l'Energie Solaire Photovoltaïque
Centre de Développement des Energies Renouvelables
B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzareah, Alger, Algérie

(reçu le 20 Mai 2012 – accepté le 21 Juin 2012)

Résumé - Les modules photovoltaïques doivent livrer une énergie propre durant au moins 25 ans. La plupart des systèmes photovoltaïques ont été installés au début des années 1990, alors ils vont atteindre la fin de leur durée de vie dans l'année 2015. D'où vient la nécessité de mettre en place un programme de récupération et de recyclage des modules photovoltaïques. Cette opération concerne aussi ceux, qui ont été endommagés durant le processus de production, pendant le transport et le montage sur site. Ce programme doit prendre en compte la minimisation des coûts de recyclage, ainsi que les effets de processus de recyclage sur l'environnement.

Abstract - Photovoltaic modules must deliver a clean energy during their 25 years old of service; most photovoltaic systems had been put in at the beginning of 1990, so they will achieve their end of life in 2015, so we need to establish a program to recover and recycle photovoltaic modules. This operation concerns also those undamaged during the production process, during their transport and/ or during installing. This program must consider how to minimize recycling cost and recycling process effect on the environment.

Mots clés: Modules photovoltaïques – Recyclage - Environnement.

1. INTRODUCTION

1.1 Développement technologique et réduction des coûts des cellules solaires

Au cours des années 1970, suite à la crise de 1973, le prix de pétrole a augmenté d'une façon spectaculaire. Au début des années 1980, comme alternative aux énergies d'origine fossiles, la technologie photovoltaïque a progressé régulièrement par l'utilisation de systèmes de quelques watts, en sites isolés et en milieux urbains.

Différents programmes photovoltaïques ont été élaborés depuis les années 1995, ce qui a induit une augmentation de la production des cellules solaires. Cette dernière est passée de 0.202 GW en 1999 à 27.293 GW en 2010. (Fig. 1).

Nous remarquons sur cette figure également, qu'au cours de la même période, il y a une amélioration du rendement des cellules. Celui-ci est passé de 10 % en 1980 à 18 % en 2010. Cette amélioration du rendement est accompagnée d'une réduction de l'épaisseur de la cellule. Elle est passée de 400 μm en 1980 à moins de 200 μm en 2010, ce qui induit une économie en matériau de silicium.

Ces facteurs technologiques ont stimulé la production des cellules solaires. Ceci a conduit à une baisse des coûts de production (2 €/W_c en 2010) et à une grande pénétration du marché, par ces nouveaux produits.

Les technologies utilisées sont les suivantes, 52.9 % en silicium polycristallin, 32.2 % en silicium monocristallin, 5.5 à base de tellurure de cadmium, 5.0 % en silicium amorphe et les 4,4 % restants sont à base de matériaux nouveaux. Nous observons que dans la fabrication des cellules photovoltaïques, le silicium poly cristallin avec 50.2 %, occupe la première place.

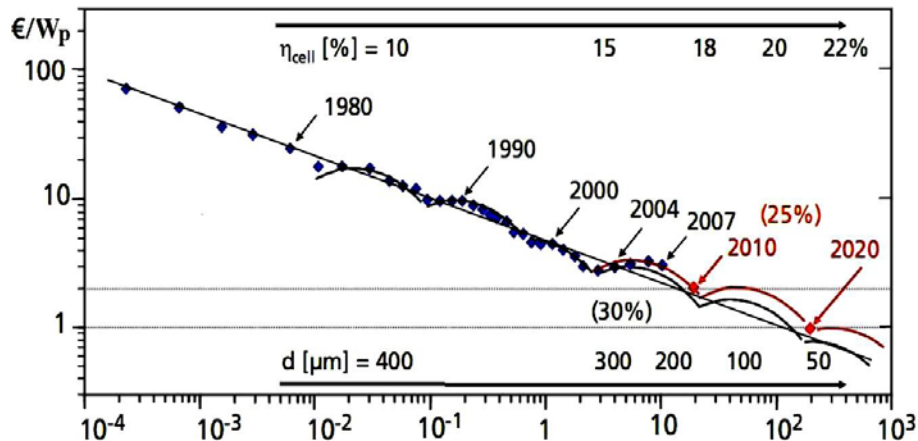


Fig. 1: Réduction des coûts en €/W_c et évolution de la puissance installée (cumulée) en GW_c, des cellules solaires, durant la période 1980-2010, dans le monde, [2]

1.2 Application des systèmes photovoltaïques en Algérie

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire des plus importants au monde, d'où la nécessité de l'exploitation de cette forme d'énergie durable et non polluante afin de préserver les ressources d'origine fossile (pétrole et gaz naturel).

Les prévisions pour les capacités à installer sont de 12.000 MW pour les besoins du marché national et 10.000 MW pour l'exportation. En systèmes photovoltaïques, le gouvernement prévoit le lancement de plusieurs projets d'ici 2020, d'une capacité totale de 800 MW. Durant la période 2021-2030, des centrales photovoltaïques de 200 MW par an devraient être réalisées [3].

1.3 Recyclage des modules photovoltaïques

L'énergie solaire ne sera véritablement durable que lorsque le cycle de vie des modules photovoltaïques aura été bouclé. Pour cela, les entreprises productrices des modules photovoltaïques doivent prendre leur responsabilité et s'engagent à la mise en place d'un programme volontaire de reprise et de recyclage des déchets de modules photovoltaïques en fin de vie, permettant ainsi la réutilisation industrielle après recyclage des matières premières nécessaires à leur fabrication tout en respectant l'environnement, aussi la création des nouvelles unités de collecte et traitement des déchets des modules photovoltaïques permettra sans doute de créer des postes de travail.

L'utilisation des modules photovoltaïques en Algérie et particulièrement dans la région de Batna, remonte au début de l'année 1985. Ces modules ont pour la plupart, aujourd'hui, vu la durée de leur utilisation, plus de 25 ans, hors usage. Leur

recupération, par l'université de Batna, sur différents sites de la wilaya, nous permet de s'intéresser à la problématique de leur recyclage.

L'augmentation des différents types de déchet (ménagers, spéciaux émanant des hôpitaux et industrie...) en l'Algérie a poussé les autorités à mettre en place une réglementation d'élimination, de récupération et de recyclage, telle que la loi 01-19 du 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets qui fixe les bases de la mise en place d'un Programme National de Gestion des Déchets Ménagers. Aussi l'Algérie est intéressée à la mise en œuvre d'autres lois de recyclage à titre exemple, le recyclage de verre, plastique, métal.

2. TECHNOLOGIES, PERFORMANCES ET DEGRADATIONS DES MODULES PHOTOVOLTAÏQUES

2.1 Processus de fabrication des cellules et modules solaires cristallins

Pour la production des cellules photovoltaïques cristallines, on utilise des plaquettes de silicium sous forme monocristalline ou polycristalline. Les processus de fabrication de ces cellules photovoltaïques sont similaires.

Cependant, les procédés d'obtention des matériaux de base (silicium monocristallin ou polycristallin) sont différents. Divers traitements du sable, dont la dimension est comprise entre 0.063 et 2 mm, permettent de purifier le silicium qui est alors chauffé et réduit dans un four.

Les étapes importantes du processus de fabrication (Fig. 2), des cellules photovoltaïques à base de silicium cristallin sont les suivantes: [4]

- Vérification de la qualité des plaquettes avant la production- Cette étape consiste à réaliser une série de vérifications préalables sur toutes les plaquettes de silicium provenant de fournisseurs externes. La qualité de ces plaquettes est un facteur clé des performances des cellules photovoltaïques.
- Nettoyage- Les plaquettes sont soumises, ensuite à un processus de nettoyage chimique, pour se débarrasser des dépôts et particules de poussière. Les plaquettes sont ensuite rincées à l'eau propre. Après avoir finalisé le traitement de surface, elles sont séchées en utilisant de l'air chaud.
- Diffusion- Cette opération est la plus importante. Elle consiste à réaliser la jonction n-p. A la surface des plaquettes, on applique un revêtement avec une charge négative (dépôt de dopant **n**) aux plaquettes brutes qui à l'origine présentent une charge positive, dans un four de diffusion, à une température d'environ 800 à 900 °C. Les atomes du dopant **n** pénètrent dans la plaquette et constituent ainsi la jonction n-p.
- Oxydation de silicium- Cette étape est également importante. Elle permet de masquer les zones, à la face avant, non destinées au dépôt d'aluminium.
- Décapage de l'oxyde de la face arrière- Il s'agit de nettoyer la surface arrière de la couche d'oxyde SiO₂.
- Dépôt de la métallisation côté arrière de la plaquette- Cette opération permet de couvrir tout l'arrière de la plaquette, avec une couche d'aluminium, dont le rôle est réaliser le contact (+) coté p-Si de la cellule.
- Lithographie pour dépôt de la résine et ouverture des fenêtres- Cette étape sert à mettre de la résine sur la couche d'oxyde, en face avant. Cette couche a pour

fonction de protéger la couche d'oxyde, lors de la gravure et du décapage à l'aide d'acide.

- *Dépôt de l'aluminium pour métallisation face avant*- C'est la métallisation de la face avant de la plaquette. Elle permet de réaliser le contact (-) coté n-Si de la cellule.
- *Décapage de l'aluminium et de la résine*- Il s'agit de nettoyer la surface de ces produits afin d'éviter toute contamination.
- *Test et classement*- Les cellules obtenues sont testées, sous simulateur solaire, aux conditions standards, pour un éclairage de 1000 W/m^2 et à une température de 25°C . Le rendement de chaque cellule est calculé à l'aide d'un programme informatique, suite à cela, un tri automatique des cellules est réalisé. Ces dernières sont regroupées par classe de rendement (de 10 à 17 %).

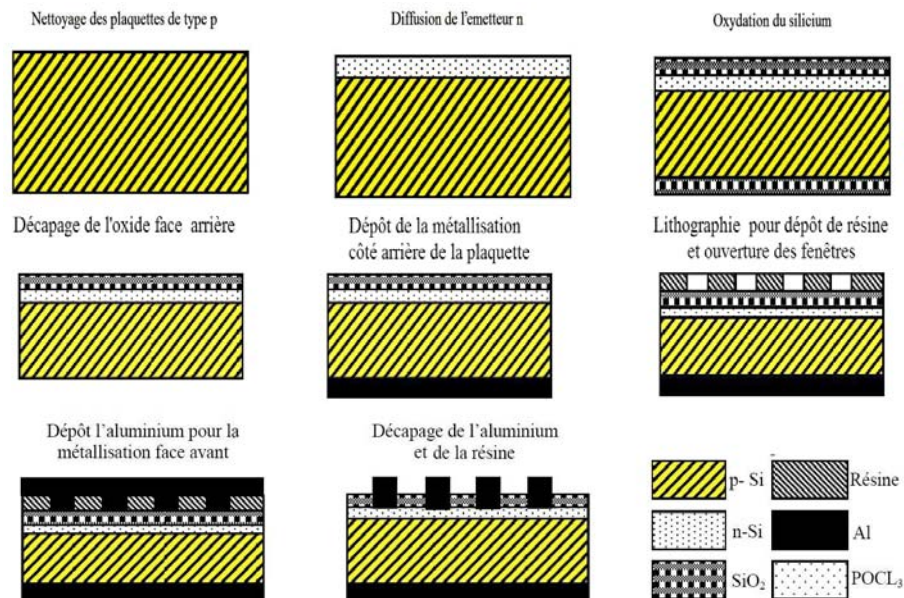


Fig. 2: Etapes de fabrication d'une cellule solaire au silicium cristallin [4]

2.2 Modules solaires cristallins

La production d'énergie solaire ne peut avoir lieu avec des cellules photovoltaïques de manière indépendante. Il est plus intéressant de les assembler en modules photovoltaïques.

Les modules photovoltaïques de la génération des années 80, sont constitués de 36 cellules (monocristallines) ou de 40 cellules (polycristallines). Les modules de la génération de 2011 peuvent comporter jusqu'à 60 cellules et développer des puissances allant de 215 à 250, selon les classes de rendement qui varient de 13 à 15 % [5].

La technologie de montage de modules (Fig. 2), mise à part l'introduction de chaînes automatisées, pour augmenter la rentabilité, n'a pas connu de grandes innovations, en termes de composants.

Les phases de montage d'un module photovoltaïque sont les suivantes:

- Contrôle des cellules et soudure des lamelles d'étain- Les cellules sont contrôlées visuellement par une personne, une machine ou par un contrôle caméra. Par la suite, plusieurs opérateurs effectuent le soudage de deux lamelles d'étain sur la partie supérieure de la cellule. Cette soudure consiste à créer la jonction électrique entre les cellules.
- Montage de chaînes et matrices- Après avoir connecté les cellules entre elles (une chaîne de dix cellules par exemple), un test de puissance électrique est effectué pour vérifier qu'il n'y a pas eu de problème pendant le montage. Ces chaînes sont posées les unes à côté des autres et les soudent entre elles, tout en construisant une matrice. Une fois soudée, la matrice subit un deuxième test de puissance électrique. Les cellules sont relâchées, sur une feuille d'EVA (éthylène-acétate de vinyle).
- Couche EVA- C'est une résine transparente, traitée thermiquement entre 150 et 160°C dont le rôle est de renforcer la robustesse du module solaire et d'éviter la pénétration d'humidité, tout en conservant des propriétés optiques et électriques satisfaisantes. L'EVA est caractérisé par: - une densité de 0.957 g/cc, - une épaisseur de ≈ 0.45 mm, - une résistivité électrique très élevée, 10^{14} Ω /cm, le classant comme un très bon isolant électrique, - un très faible taux d'absorption d'eau (0.05 % - 0.13 %), - une bonne transmission optique. On ajoute ensuite une autre feuille d'EVA et enfin la feuille de Tedlar (polycarbonate).
- Face arrière du module- L'arrière du module est constitué d'un film multicouche Tedlar-aluminium-Tedlar. L'aluminium dont le rôle prouvé contre l'humidité et les chocs mécaniques. il est mis en sandwich entre deux feuilles de Tedlar de 180 μ m d'épaisseur. Son rôle est de protéger le module contre les intempéries.
- Face avant du module- Elle est constituée d'un verre d'épaisseur 3 à 5 mm. Ce verre doit avoir un facteur de transmission très élevé ($\tau = 95\%$) afin de permettre aux rayons solaires d'atteindre les cellules solaires, comme il doit être suffisamment résistant à la grêle et aux autres objets durs, ainsi qu'aux cycles thermiques (variation des températures entre la nuit et le jour). Avant de passer au laminage, une feuille d'EVA est insérée entre le verre et la matrice de cellules photovoltaïques.
- Laminage- Le processus de laminage, consiste à chauffer les modules, sans le cadre, à la température de 100 à 142 °C, afin de permettre aux différentes couches (EVA-Tedlar) de fondre autour des cellules photovoltaïques et d'adhérer au verre de protection, constituant ainsi un seul corps sous vide.
- Coupe et pose de boîte- A la sortie du lamineur, les modules sont prêts à produire de l'électricité, mais non propres à la vente. En effet, quand l'EVA et le Tedlar sont laminés, il y a de la matière en trop et donc il faut couper l'excédent. Ensuite, on prend une boîte pour le raccordement électrique, qu'on colle sur la partie arrière du panneau.
- Encadrement- Pour protéger le module des chocs, un cadre aluminium est posé par une machine spéciale qui presse le cadre contre le panneau
- Test et stockage- Après l'encadrement, le module passe au dernier test de puissance électrique, en utilisant un simulateur solaire, sous forme de flash qui produit les

conditions d'éclairage standard. Le banc de mesures détermine ainsi sa puissance maximale effective, puis le module sera stocké.

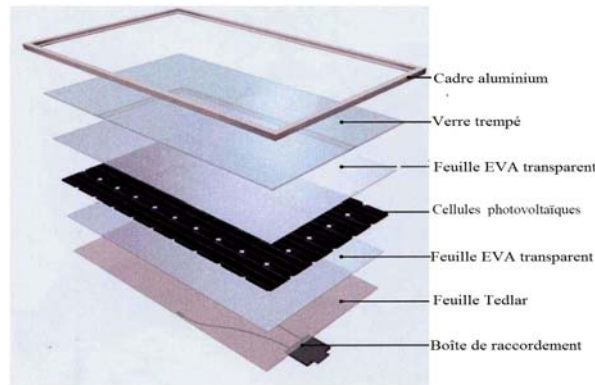


Fig. 3: Les différentes couches et matériaux composants un module photovoltaïque constitué de cellules mono- ou poly cristallin [6]

2.3 Processus de fabrication des modules à couche mince en Si-amorphe

Les couches minces constituent la seconde génération de la technologie photovoltaïque. Dans cette génération, on distingue le silicium amorphe (a-Si), le diséléniure de cuivre indium (CIS), le tellurure de cadmium (CdTe), et autres. Cependant leur technologie est totalement différente de celle des cellules cristallines.

Cette nouvelle technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium (0.5 à 2 μ m), qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide [7]. Les cellules solaires, jonction p-n, sont déposées en même temps sur les supports en verre. Le silicium amorphe est pris en sandwich entre un conducteur transparent (oxyde d'étain) et la métallisation arrière (ou Al / ZnO ou ZnO). Cette technologie a l'avantage de consommer moins de matériaux.

Les principales étapes pour la fabrication des modules à couche mince sont: [8]

- **Etape 1- *Traitement du substrat en verre***, Coupe - Nettoyer (dans H₂O désionisée à haute résistivité 10 Méga Ohm et plus) et Séchage.
- **Etape 2- *Contact face avant***, dépôt de SnO₂, translucide, sérigraphie et le frittage des bandes de contact pour les connexions externes.
SnO₂-CVD dépôt sous forme de vapeur sur la totalité du support.
- **Etape 3- *Dépôt a-Si***, cette étape constitue le chargement et le préchauffage
Dépôt séquentiel de la structure de broche en trois sillons. Dans chaque cas, deux substrats sont dos à dos dans ce qu'on appelle transporteur Bus qui permet le dépôt de: - Silicium dopé au phosphore n⁺-a-Si: H; - Silicium non dopé a-Si: H; - Silicium dopé au bore de type P⁺ a-Si: H; - Structuration partielle de couche a-Si: H avec laser Nd-YAG (ou mécanique).
- **Etape 4- *Contact face arrière***, Cette opération est réalisée en utilisant de l'aluminium. - Système de dépôt d'Aluminium sous vide; - Structuration de la métallisation avec laser Nd-YAG (ou mécanique).
- **Etape 5- *Encapsulation***, un revêtement en vinyle.

- **Etape 6- Encadrement modulaire**, Les matériaux utilisés sont le profilé d'aluminium, d'acier ou parfois, pour des applications en façades des bâtiments, les modules sont montés sans encadrement, pour raisons de poids et facilité de montage.
- **Etape 7- Test**, Les modules finis sont testés sous conditions standards à l'aide d'un simulateur solaire fonctionnant sous le mode Flash.

2.4 Dégradation des performances des modules photovoltaïques

2.4.1 Durée de vie d'un module

La durée de fonctionnement d'un module PV est largement déterminée par la stabilité et la résistance à la corrosion des matériaux à partir de laquelle il est construit. Les fabricants des modules photovoltaïques, suivant la qualité du silicium, dont sont construit ces modules, donnent une garantie pour une durée de vie d'environ de 25 pour un module photovoltaïque à base de Si monocristallin et 10 ans pour des modules à couches minces.

2.4.2 Dégradation due à l'éclatement du verre du module

L'éclatement de la surface vitrée peut se produire en raison d'actes de vandalisme, agression par pierre, le stress thermique, la manutention, le vent ou la grêle (Fig. 4).

2.4.3 Dégradation due à l'usure des matériaux

Dégradation de la couche EVA, l'absorption des rayons UV par la couche Eva, conduit souvent à une réduction de la durée de vie pour les matériaux d'encapsulation du module (Fig. 5). En particulier, le brunissement de la couche d'EVA, accompagné d'une accumulation de l'acide acétique, provoque une réduction graduelle de la production d'énergie de certains modules.

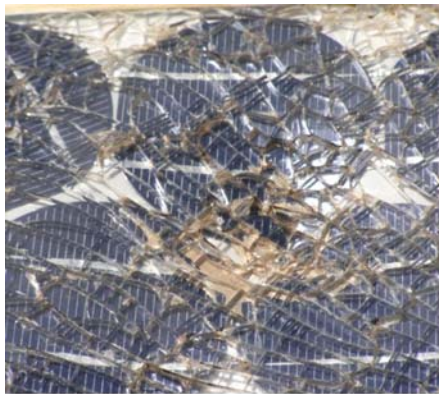


Fig. 4: Dégradation de la surface du module monocristallin, suite à une agression par pierre

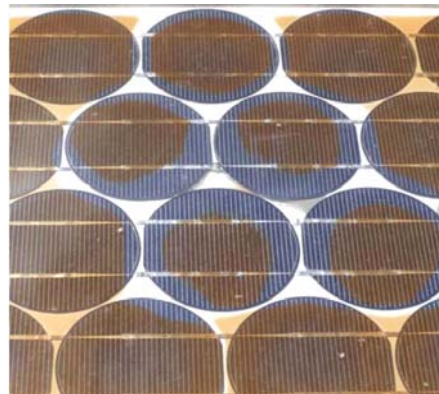


Fig. 5: Dégradation de la couche EVA et création de point chaud à la surface du module

2.5 Mesures des performances des modules avant et après dégradation

Afin de procéder à des mesures au laboratoire, de l'effet de dégradation sur les performances électriques, des modules usés qui ont été prélevés sur des installations se trouvant dans la wilaya de Batna et montés avec des modules neufs (en réserve à Batna) du même type, Sharp NT101.

Le relevé des caractéristiques Courant-Tension, $I = f(U)$, des modules a été obtenu à l'aide du montage électrique (Fig. 6) réalisé à l'Université de Batna. Le courant des modules est mesuré à l'aide d'un shunt et converti en une tension pour être relevé sur une table traçante.

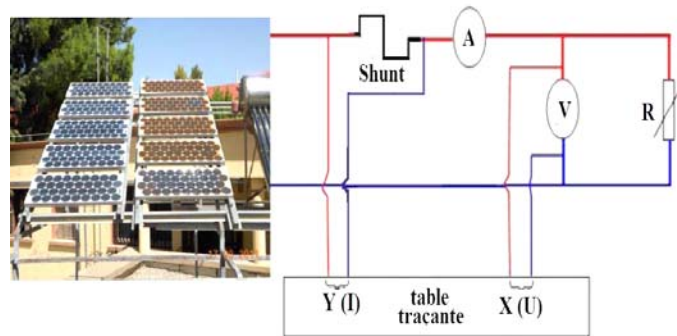


Fig. 6: Banc de mesures des modules photovoltaïques dégradés et des modules neufs

La puissance optimale des modules Sharp NT 101 (dégradés et neufs) permet de calculer les rendements des modules, sous conditions d'éclairement, $E_s = 800 \text{ W/m}^2$, et $T_c = 54^\circ\text{C}$.

2.5.1 Calcul des rendements des modules neufs et après dégradation

Le calcul du rendement d'un module est donné par l'équation:

$$\eta = \frac{U_p \times I_p}{A_c \times E_s}$$

Sachant que la surface du module NT101 est $A_c = 0.283 \text{ m}^2$ et l'éclairement est $E_s = 800 \text{ W/m}^2$.

- *Rendement du module Sharp NT101, neuf*

La puissance au point de puissance optimale est représentée par la relation suivante:

$$P_{\text{opt}} = U_p \times I_p = 14.5 \times 2.1 = 30.45 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{14.5 \times 2.1}{0.283 \times 800} = 0.133$$

Le rendement du module Sharp NT101, neuf est égal à 13.3 %.

- *Rendement du module Sharp NT101, dégradé*

La puissance au point de puissance optimale pour le module dégradé est égale à:

$$P_{\text{opt}_2} = U_p \times I_{p_2} = 14.5 \times 1.37 = 19.86 \text{ W}$$

$$\eta_2 = \frac{14.5 \times 1.37}{0.283 \times 800} = 0.087$$

Le rendement du module Sharp NT101, dégradé, est égal à 8.7 %.

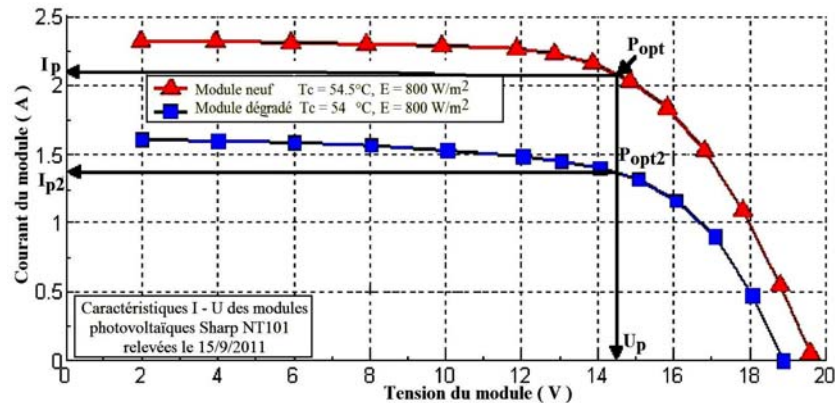


Fig. 7: Caractéristiques, Courant-Tension, $I = f(U)$, des modules PV Sharp NT101, avant et après dégradation, relevées à Batna, le 15-09-2011

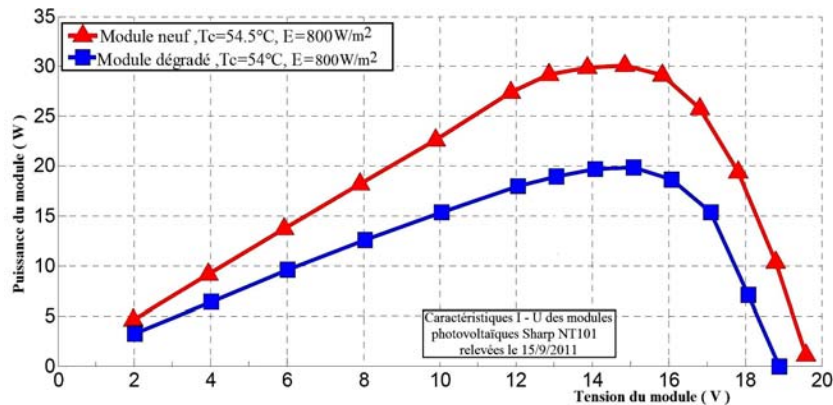


Fig. 8: Caractéristiques, Puissance-Tension, $P = f(U)$, des modules PV Sharp NT101, avant et après dégradation, relevées à Batna, le 15-09-2011

2.5.2 Analyse des résultats

Le calcul des paramètres, puissances et rendement des modules Sharp NT101, est obtenu à partir des courbes (Fig. 7 et 8), relevées sur un module neuf et un module utilisé.

Les résultats obtenus montrent que:

Le rendement calculé du module Sharp NT 101 neuf est de 13.3 %, cette valeur est du même ordre de grandeurs que celle mesurée en 1990 sur le site de Batna sous condition de $E_s = 800 \text{ W/m}^2$. -année 1990- ($\eta_{800(3)} = 12.8 \%$).

Pour le module dégradé, le rendement calculé est de 8.7 %, comparé au rendement du module neuf, nous constatons une dégradation du rendement de l'ordre de 34.58 %.

Enfin, nous constatons en terme de puissance, par rapport aux valeurs standard, $P_m = 40 \text{ W}$, pour $E_s = 1000 \text{ W/m}^2$ et $T_c = 25^\circ$, la dégradation de la puissance ($P_{opt_2} = 19,86 \text{ W}$) du module utilisé est de l'ordre de 50 %. Il est évident que pour un tel taux de dégradation, le module doit être remplacé.

3. PROCESSUS DE RECYCLAGE ET RECUPERATION DES MATERIAUX SOLAIRES

Auparavant, beaucoup d'études sur le recyclage des modules photovoltaïques, en fin de durée de vie, ont été effectuées, mais aucune d'entre elles, n'a trouvé d'application au niveau de l'industrie. Aujourd'hui, beaucoup d'entreprises s'intéressent à la mise en œuvre d'un programme de recyclage.

Durant les étapes de recyclage (Fig. 9), les différents matériaux utilisés seront éliminés ou récupérés pour une éventuelle réutilisation [9].

Le processus de recyclage des modules photovoltaïques est caractérisé par:

- un traitement thermique
- un traitement chimique.

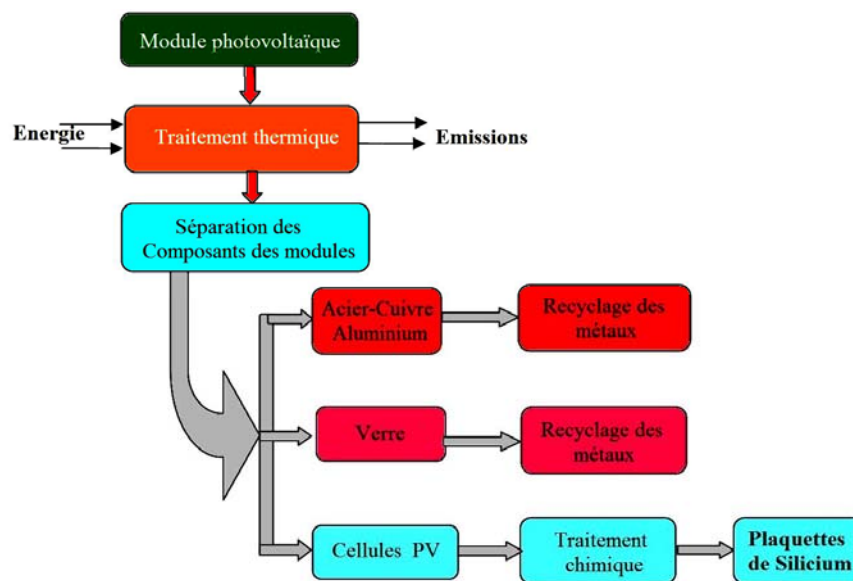


Fig. 9: Synoptique du processus de recyclage

3.1 Le traitement thermique dans le recyclage des modules photovoltaïques

Le traitement thermique est la première étape du processus de recyclage. Elle consiste à placer le module photovoltaïque dans un four chauffé où la température sera élevée progressivement de 400°C à 600°C (Fig. 10). Cette opération consiste à séparer les cellules solaires à base de silicium, des autres composants solides (verre, métal), toutes les parties synthétiques (EVA, colle du cadre, substrat du module en plastique), seront brûlées.

-Élimination des couches EVA et Tedlar-Aluminium-Tedlar- Ces produits qui sont, sous forme de feuilles de résine transparente et d'aluminium, montées à l'avant et à l'arrière du module. Sous l'effet de la température (150 et 160 °C), ces feuilles sont transformées pour former avec les cellules solaires et le verre de protection un corps solide, rigide et durable (Fig. 11).

Durant le processus de recyclage, l'objectif est de récupérer des produits à haute valeur pour leur éventuelle réutilisation. Les produits, EVA et Tedlar-Aluminium-Tedlar, seront brûlés afin de libérer les cellules solaires.

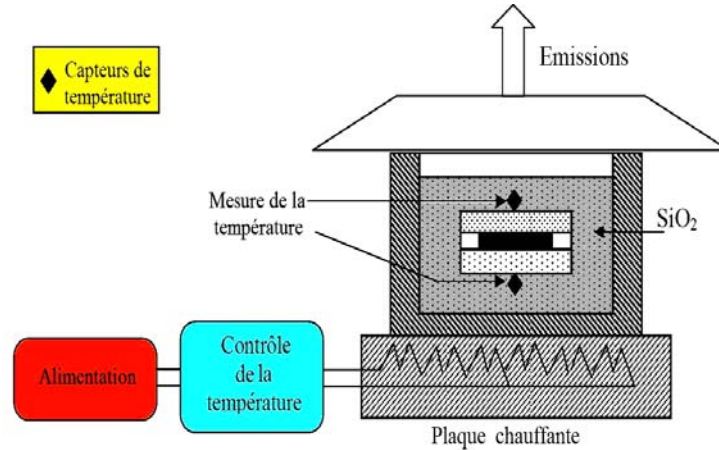


Fig. 10: Le traitement thermique d'un module photovoltaïque dans un four [10]

-Récupération des contacts- Les rubans en aluminium qui forment les connexions des différentes cellules solaires sont récupérer.

-Récupération du cadre de montage- L'encadrement des cellules solaires est réalisé en général en aluminium ou en acier inoxydable (pour les premières générations de modules). Ces deux matériaux sont récupérés également par le procédé thermique.

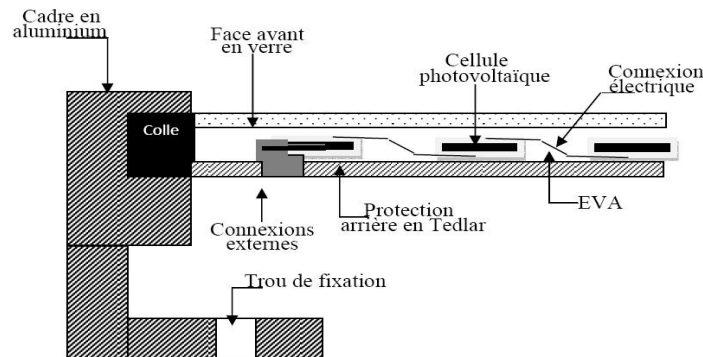


Fig. 11: Vue en coupe d'un module photovoltaïque [11]

-Récupération du verre- Durant la phase de traitement thermique, le verre libéré de la couche EVA, ne peut être réutilisé comme tel, il est broyé et transformé en granulé pour être cédé aux industries du verre pour sa transformation en verre plat trempé.

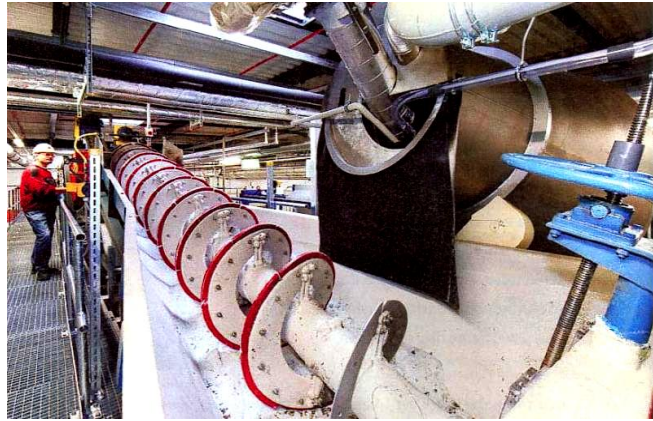


Fig. 12: Vue d'une installation de récupération du verre. Après broyage, le verre est transporté à l'aide d'une vis sans fin, vers le lieu de stockage [12]

3.2 Séparation des cellules de silicium à partir des modules usés

La séparation des cellules solaires à base de silicium se fait manuellement après le traitement thermique, les cellules récupérées vont subir un traitement chimique pour récupérer le silicium.



Fig. 13: Récupération manuelle des cellules solaires à partir des modules traités thermiquement [12]

3.3 Récupération des cellules solaires par traitement chimique

Dans le but de la récupération de silicium pure, on doit d'abord éliminer les différentes couches, la grille de contact, le dioxyde de silicium (SiO_2) et la couche dopée n. La métallisation de la face avant et de la face arrière, la couche antireflet. Le synoptique du processus chimique est représenté en figure 14.

L'utilisation de la potasse 'KOH' consiste en un pré traitement pour enlever la poussière et les autres substances. Ensuite les cellules seront lavées pour éliminer les effets de la potasse. Puis ces cellules sont mises dans une solution de décapage. Cette solution doit être adaptée aux différentes technologies, pour l'enlèvement de la métallisation de la face avant et aussi de la face arrière, de la couche antireflet et de la couche n.

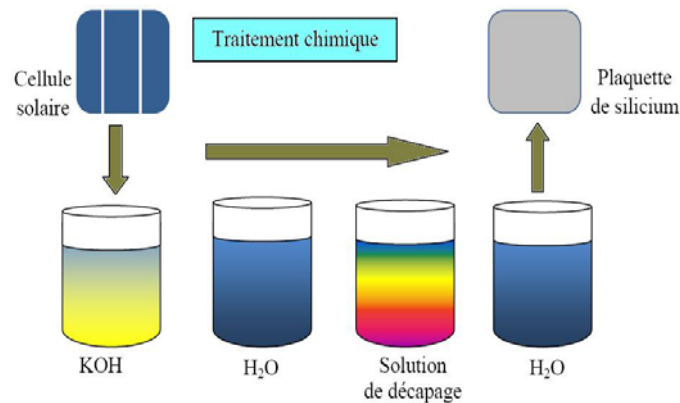
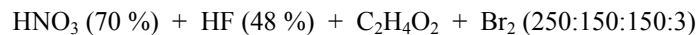
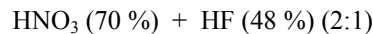


Fig. 14: Processus de traitement chimique des cellules solaires

Le problème majeur de cette méthode est de choisir la composition optimale des solutions utilisées dans le décapage, ainsi que leur concentration et la température qui leur convient.

Ci-après, est présentée quelques spécifications de certaines solutions utilisées pour le décapage des plaquettes de silicium [10].



4. COÛTS DE RECYCLAGE DES MODULES PHOTOVOLTAÏQUES

La particularité des applications des systèmes photovoltaïques, en plus de leur aspect modulaire, réside dans leur distribution dans l'espace. Les applications ont lieu dans le passé surtout sur les sites isolés, en zones de montagnes ou comme pour l'Algérie, dans le grand sud.

La structure des calculs des coûts de recyclage de modules photovoltaïques fait apparaître, à priori, deux centres importants de coûts:

- Le *premier centre*, représente les coûts de collecte des modules des différents sites. Ces coûts englobent des frais de démontage et de stockage des modules sur les sites des unités intermédiaires et le transport vers l'unité de recyclage.

- Le *deuxième centre*, celui des coûts engendrés par le stockage des modules entrant à l'unité de recyclage, le traitement thermique et le stockage des matériaux traités sortant de l'unité de recyclage.

Une méthodologie développée par 'School of Environmental Studies' et le 'Department of Mechanical and Materials Engineering, Queen's University, Canada', est utilisée dans le calcul de la rentabilité de recyclage. Cette analyse montre que le recyclage des modules photovoltaïques à base de CdTe et de silicium n'est pas rentable.

Cependant est afin de protéger l'environnement et de préserver les ressources naturelles, la responsabilité des producteurs doit être engagée. Ces derniers doivent mettre en place des programmes de recyclage, tels que le programme établi par 'First Solar'.

Cette dernière a mis des fonds suffisants et nécessaires à l'estimation du coût futur de la collecte et du recyclage des modules photovoltaïques, ou bien le programme développé par la société 'Solar World AG', conçu pour recycler les modules de toutes formes et tailles qui auraient subi tout type de dommages (bris de verre par exemple, défauts durant le laminage, ou des défauts électriques).

Les coûts de recyclage peuvent être inclus dans le prix de la vente des nouveaux modules photovoltaïques.

4.1 Coût de collecte des modules photovoltaïques

Les coûts intervenant lors de la collecte des modules photovoltaïques sont:

- le coût de démontage
- le coût de stockage dans des unités intermédiaires
- le coût de transport.

4.2 Coût de recyclage des modules photovoltaïques

Les coûts intervenant lors du recyclage des modules photovoltaïques sont:

- le coût de stockage des modules entrant à l'unité de recyclage
- le coût de traitement (coût de traitement thermique, coût de traitement chimique...)
- le coût de stockage des matériaux recyclés sortant de l'unité de recyclage.

Pour calculer ces différents coûts, beaucoup de paramètres interviennent, à titre exemple:

- les types des modules à recycler
- les quantités des modules à recycler
- la valeur des matériaux récupérés dans le marché
- la technologie du processus de recyclage
- le coût de travail et des recherches laboratoires.

La méthodologie développée précédemment par 'School of Environmental Studies' et le 'Department of Mechanical and Materials Engineering', Queen's University Canada, est utilisée dans le calcul de la rentabilité de recyclage [13].

L'analyse comparative, réalisée pour le processus de recyclage des différents types de cellules solaires, détermine d'abord la quantité de matériaux semi-conducteurs dans un module de un mètre carré (1 m²) de surface et trouve la quantité de matériaux semi-conducteurs récupérables par le recyclage du module. Les matériaux semi-conducteurs concernés sont: l'Indium (In), le Gallium (Ga), le Silicium (Si), le Sulfure de Cadmium (CdS), le Cadmium (Cd) et le Tellure (Te).

Le processus de recyclage des cellules monocristallines et multi-cristallines est identique, donc les deux types de module ont été regroupés pour l'analyse. Il a

également été supposé que tous les modules utilisent un substrat de verre standard qui peut être recyclé, et sont, sans cadre. Il convient de noter que dans le cas où un module a un cadre (aluminium par ex.), il peut être mécaniquement séparé du module et recyclé en utilisant des techniques bien établies.

4.3 Modèle de calcul des coûts

En déterminant l'épaisseur et la densité des semi-conducteurs dans chaque module, la masse de matériaux semi-conducteurs récupérés, après le recyclage de chaque module, est calculée par l'expression suivante:

$$m_{rs} = A \times t_s \times \rho_s \times z_s \quad [\text{g/module}] \quad (1)$$

Où A , est la surface du module en cm^2 , t_s , l'épaisseur du matériau semi-conducteur en cm , ρ_s , la densité de matériau semi-conducteur en g/cm^3 , et z_s , le pourcentage de matériau semi-conducteur qu'on peut récupérer d'un module photovoltaïque.

En se basant sur la quantité de semi-conducteur récupéré de chaque module et les données sur les coûts de recyclage, le profit P_s , fait de la vente de ces matériaux semi-conducteurs, est donné par:

$$P_s = m_{rs} \times V_s \quad [\$/\text{module}] \quad (2)$$

d'où, m_{rs} est déterminée par l'équation (1), V_s est la valeur de revente de matériau semi conducteurs en $\$/\text{gramme}$.

En outre, la masse de verre récupérée est donnée par:

$$m_{rg} = A \times t_g \times \rho_g \times z_g \quad [\text{g/module}] \quad (3)$$

Où A , est la surface du module en cm^2 , t_g , l'épaisseur de tout le verre du module photovoltaïque en cm , ρ_g , la densité du verre en g/cm^3 , et z_g , est supposé ici la récupération du verre en totalité, soit 100 %. Le profit du recyclage de verre est donné par la relation suivante:

$$P_g = m_{rg} \times V_g \quad [\$/\text{module}] \quad (4)$$

Où V_g , est la valeur de la revente de verre en $\$/\text{gramme}$, donnée par l'équation 3.

Le coût d'enfouissement des déchets a été trouvé pour chaque type de module solaire. Ces résultats prennent en compte le coût de l'élimination de l'ensemble du module photovoltaïque, y compris le verre et les semi-conducteurs.

La masse totale des déchets par module a été calculée en utilisant:

$$W = \frac{A \times E \times \omega}{N_p} \quad [\text{kg/module}] \quad (5)$$

Où E , est la puissance par unité de surface de chaque module en W/m^2 , ω , le poids du module photovoltaïque en kg et N_p , la puissance nominale du module photovoltaïque en W .

Le coût de l'élimination finale a été trouvé en utilisant l'expression suivante:

$$D = W \times T \quad [$/module] \quad (6)$$

Où W , est la masse des déchets par module calculé par l'équation (5). T est la charge de livraison des déchets pour une unité de recyclage déterminée dans une référence bibliographique.

Enfin, le profit total trouvé du recyclage est donné par l'expression suivante:

$$P_T = (P_s + P_g) + D - C = P_t + D - C \quad [$/module] \quad (7)$$

Où C est le coût de recyclage en \$/module et P_t est la somme de P_s et P_g .

4.4 Résultats- profit et coût de recyclage des modules photovoltaïques

Une analyse comparative a été effectuée afin de déterminer le bénéfice potentiel du recyclage des types de modules photovoltaïques. Dans la première étape de cette analyse, la masse de matériau semi-conducteur dans un module photovoltaïque a été déterminée et comparée à la quantité qui peut être récupérée à partir du recyclage. Les paramètres d'entrée est la masse du matériau semi-conducteur récupéré après le processus de recyclage pour un module de 1 m^2 de l'équation 1 sont décrits dans le **Tableau 1** pour les quatre types de modules solaires, CIGS, CdTe, a-Si et x-Si.

Tableau 1: Quantité récupérée des matériaux semi-conducteurs pour les quatre types des modules photovoltaïques

	CIGS		CdTe		a-Si	x-Si
	Ga	In	Cd	Te	Si	Si
A (cm ²)	10,000		10,000		10,000	10,000
t _s (cm)	0.0004		0.0003		0.00005	0.02
ρ _s (g/cm ³)	N/A	N/A	6.2		2.33	2.33
m _s (g)	6.54	10.77	9.07	9.53	1.165	4.66
z _s (%)	80		99	96	N/A	60
m _{rs} (g)	5.23	8.62	9.98	9.15	< 1.17	279.6

La quantité de verre récupéré après recyclage a été déterminée et les résultats sont présentés au **Tableau 2**.

Tableau 2: Quantités de verre récupérées des modules PV, CIGS, CdTe, et c-Si

	CIGS	CdTe	c-Si
A (cm ²)	10,000	10,000	10,000
t _s (cm)	0.68	0.64	0.64
ρ _s (g/cm ³)	2.6	2.6	2.6
m _{rg} (g)	17.680	16.640	16.640

Comme on peut le voir dans le **Tableau 2** pour tous les types des modules photovoltaïques, la masse du verre récupérée est comprise entre 16 et 17 kg par mètre carré.

L'utilisation des équations (2) et (4) servent à déterminer et à comparer les coûts du recyclage des trois types des modules photovoltaïques et le retour financier de la revente des matériaux semi-conducteurs et le verre récupérés.

Les résultats de cette analyse sont présentés dans le **Tableau 3**.

Tableau 3: Quantité de verre récupérée dans les modules PV, pour CIGS, CdTe, et c-Si

	CIGS		CdTe		x-Si
	In	Ga	Cd	Te	Si
V_S (\$/g)	3.00	3.00	0.026	0.22	0.027
m_{RS} (g)	5.23	8.62	8.98	9.15	279.60
P_S (\$/module)	15.70	25.85	0.23	2.02	7.54
V_S (\$/g)	3.72×10^{-6}	3.72×10^{-6}	3.72×10^{-6}	3.72×10^{-6}	3.72×10^{-6}
m_{RG} (g)	17.680		16.640		16.640
P_S (\$/module)	0.07		0.06		0.06
P_t (\$/module)	41.62		2.31		7.54
C (\$/module)	20.24		9.00		32.11

Le **Tableau 3**, montre que le profit, réalisé de la vente des matériaux semi-conducteurs et du verre récupérés des modules de type CIGS, dépasse largement le coût de recyclage de ces modules. Toutefois, dans le cas des modules photovoltaïques de type CdTe et de x-Si, le coût du recyclage des modules est plus que le montant provenant de la revente des matériaux récupérés.

L'équation (6) est utilisée pour calculer le coût d'élimination des modules photovoltaïques, aussi la rentabilité totale de recyclage. Les résultats sont présentés sur le **Tableau 4**.

Tableau 4: Coût d'élimination des modules PV et rentabilité totale de recyclage

	CIGS	CdTe	c-Si	p-Si	a-Si
E (W/m ²)	100	108	144	138	90
Poids (kg)	28	12	15.4	19.4	19.1
Puissance Nom.(W)	160	77.5	180	230	128
W (kg/module)	17.5	16.72	12.32	11.64	13.43
T (\$/kg)	0.05	0.39	0.05	0.05	0.05
D (\$)	0.87	6.45	0.61	0.58	0.67
$P_T = P_t + D - C$ (\$)	22.25	-0.24	-23.96	-23.99	-0.73

A partir des tableaux précédents, on remarque bien que le recyclage des modules photovoltaïques à base de CdTe et de silicium n'est pas rentable. Cependant et afin de protéger l'environnement et de préserver les ressources naturelles, la responsabilité des producteurs doit être engagée.

Ces derniers doivent mettre en place des programmes de recyclage, tels que le programme établi par 'First Solar'. Cette dernière a mis des fonds suffisants et

nécessaires à l'estimation du coût futur de la collecte et le recyclage des modules photovoltaïques.

5. ASPECTS ECOLOGIQUES ET JURIDIQUES DU RECYCLAGE

5.1 Aspects écologiques du recyclage

Les modules en fin de leur durée de vie, peuvent causer des impacts négatifs sur l'environnement et sur la santé humaine. S'ils ne sont pas correctement éliminés, le cadmium, à titre exemple, a une toxicité très élevée, ainsi qu'un potentiel de forte accumulation chez l'être humain.

L'influence de l'élimination des modules photovoltaïques sur l'environnement cristallins a été évaluée à l'aide d'écobilans.

Trois variantes ont été analysées [14].

- Recyclage de Haute Valeur: Récupération de silicium et de tous les matériaux.
- Processus Simplifié: Broyage, Incinération de matières plastiques en MWI, Elimination des composants inorganiques.
- Incinération des modules sans séparation des matériaux avant.

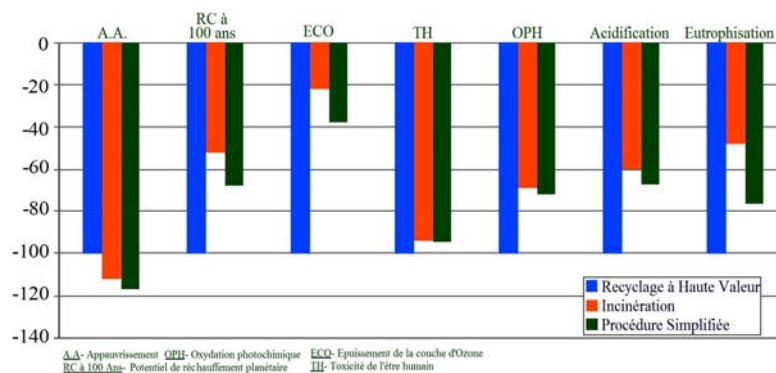


Fig. 15: Comparaison des trois des effets des méthodes d'élimination des modules photovoltaïques [14]

L'évaluation sera sur:

- L'appauvrissement abiotique: Epuisement des ressources en kg Sb-éq.
- Le potentiel de réchauffement planétaire: Effet de serre en kg CO₂-éq.
- L'épuisement couche d'ozone: Appauvrissement de la couche en kg de CFC-11-éq.
- La toxicité pour l'être humain: Toxicité pour l'être humain en kg1.4-DB éq.
- L'oxydation photochimique: Près du sol la couche d'ozone en kg C₂H₄éq.
- L'eutrophisation: Eutrophisation en kg Phosphates éq.

5.2 Aspects juridiques de recyclage des déchets en Algérie

L'Algérie a connu un développement économique et démographique sans précédent. Le taux élevé d'accroissement de la population a engendré une urbanisation galopante et une croissance non contrôlée de l'industrie, cela ne s'est pas fait sans conséquence sur l'environnement.

De ce fait, le pays affronte aujourd'hui de nombreux problèmes liés à l'industrie et la protection de l'environnement et en particulier le problème de déchets. Pour ces raisons, l'Algérie a mis en place des lois pour l'organisation du recyclage des déchets, et parmi ces lois, il y a la loi N°01-19 du 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets [15].

6. CONCLUSION

L'utilisation de l'énergie solaire en Algérie a commencé en 1985. L'initiation par la Wilaya de Batna d'un programme pilote a permis à l'Université de Batna d'être un pionnier dans ce domaine. Aujourd'hui, les installations photovoltaïques réalisées à l'époque, sont arrivées à la fin de leur durée de vie. Il n'est pas possible pour des considérations de protection de l'environnement de les abandonner sur les sites d'utilisation. Aujourd'hui le recyclage des modules photovoltaïques est une technologie en développement.

Dans le cadre de ce travail, nous avons procédé à des mesures sur les performances des modules photovoltaïques et leurs causes de dégradation. Aussi nous avons procédé à une analyse des différentes techniques de recyclage des modules photovoltaïques utilisées dans le monde, présenté leur efficacité en terme d'impact sur l'environnement. Comme nous avons à l'aide d'une étude bibliographique, présenté un modèle de calcul des coûts de recyclage.

Ce travail nous a permis d'appréhender l'importance du recyclage des modules photovoltaïques, aussi bien un côté environnemental que du côté économique où l'entreprise doit prendre ses responsabilités et établir des programmes de collecte et de recyclage des modules photovoltaïques.

REFERENCES

- [1] A. Wagner, '*Photovoltaik Engineering, Handbuch für Planung, Entwicklung und Anwendung*', Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [2] E.R. Weber, '*Entwicklung des PV-Marktes aus Sicht der Forschung*', Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg, Photovoltaik Symposium, Staffelstein, 2009.
- [3] Document du Ministère de l'Énergie et des Mines, '*Programme des Energies Renouvelables et de l'Efficacité Énergétique*', Alger, Algérie, mem.org.dz, 2011.
- [4] C. Hamouda, '*Maîtrise de la Performance Industrielle*', Cours, 2011
- [5] Report, Q-Cells, '*Multi Crystalline Solar Module Q.PRO-G2 230-245, Mechanical Specification and Electrical Characteristics*', www.q-cells.com
- [6] Rapport Technique, Centrotherm Photovoltaics, Rouiba Eclairage, '*Ligne de Production Intégrée*', 116 MWc, 01F1106, 2011.
- [7] Fabrication des panneaux Photovoltaïques, <http://energies2demain.com/photovoltaique/fabrication-dun-panneau-solaire-photovoltaique>

- [8] H.G. Wagemann and H. Eschrich, '*Photovoltaik, Solarstrahlung und Halbleitereigenschaften*', Solarzellenkonzepte und Aufgaben, Edition Teubner, Juny 2007.
- [9] A. El Amrani, A. Mahrane, F.Y. Moussa et Y. Boukennous, '*Procédé d'Encapsulation des Modules Photovoltaïques Type Mono-Verre*', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 9, N°1, pp. 37 – 42, 2006.
- [10] E. Radziemska, P. Ostrowski, A. Cenian and M. Sawczak, '*Chemical, Thermal and Laser Processes in Recycling of Photovoltaic Silicon Solar and Modules*', Ecological Chemistry and Engineering, Vol. 17, N°3, pp. 385 – 391, 2010.
- [11] Fabrication d'un module photovoltaïque,
<http://www.energie douce.com/conseils-faq-panneaux-solaires-photovoltaïques-faq>
- [12] O. Papathanasiou, A. Kreutzmann, '*Schrott im grünen Mäntelchen*', Photon das Solarstrom-Magazin, Februar 2008.
- [13] N.C. McDonald and J.M. Pierce, '*Producer Responsibility and Recycling Solar Photovoltaic Modules*', Energy Policy, Vol. 38, N°11, pp. 7041 – 7047, 2010.
- [14] K. Sander et al., '*Study on the Development of a Take Back and Recovery System for Photovoltaic Products*', PV-CYCLE, funded by BMU, co-funded by EPIA, BSW Solar, November 2007.
- [15] Journal Officiel de la République Algérienne, '*Loi N°01-19 Relative à la Gestion, au Contrôle et à l'Elimination des Déchets*', N°77, 12 Décembre 2001.