

**Rapport : 30.2945.0-01**

**Évaluation de la performance et des aspects  
environnementaux, de santé et de sécurité de la  
technologie CdTe PV de First Solar**

**RÉSUMÉ**

<b>Intitulé du projet</b>	<b>Évaluation de la performance et des aspects environnementaux, de santé et de sécurité de la technologie CdTe PV de First Solar</b>	
<b>Client</b>	<b>First Solar Inc.</b>	
<b>Numéro de rapport</b>	<b>30.2945.0-01</b>	
<b>Auteurs du projet</b>	<b>Dr. Christian Hagendorf</b> Directeur Groupe Diagnostics de Solar Cells <b>Dr. Matthias Ebert</b> Directeur Fiabilité des modules et systèmes solaires <i>Responsable de la section <b>Gestion de la qualité et performance sur le terrain</b></i>	
	<b>Dr. Marco Raugei</b> Chercheur <i>Responsable de la section <b>Impacts sur le cycle de vie du déploiement à grande échelle de la technologie CdTe et de la comparaison avec d'autres technologies</b></i>	
	<b>Dr. Daniel Lincot</b> Chercheur <i>Responsable des sections <b>Technologie CdTe de First Solar, des feuilles de route des coûts, ainsi que de la Performance en milieu chaud et humide et dans des conditions spécifiques</b></i>	
	<b>Dr. Jaione Bengoechea</b> Chercheur <b>Dr. María Jesús Rodríguez</b> Directrice de Solar Cells Laboratory <i>Responsable de la section <b>Aspects environnementaux, santé et sécurité de la technologie CdTe de First Solar</b></i>	
<b>Projet coordonné et approuvé par</b>	<b>Dr. Ana Rosa Lagunas</b> Directrice du département photovoltaïque  <i>Responsable de la coordination du projet de la validation</i>	
<b>Dates du projet</b>	Date de début : Avril 2016	Date de fin : Janvier 2017

Les auteurs souhaitent remercier les relecteurs suivants pour leurs questions et leurs commentaires pertinents : Jonas Friege, Ole Soukup et Dr. Peter Viebahn du Wuppertal Institut, ainsi que Nadine Bethge de DUH Umweltschutz-Service GmbH.

Les auteurs sont seuls responsables de leurs contributions à ces travaux.

---

# 1.- RÉSUMÉ

First Solar a d'ores et déjà conduit 14 études soumises à un examen par des pairs à propos de son module photovoltaïque de technologie CdTe. Ces études étaient axées sur les aspects environnementaux, de santé et de sécurité. À ces fins, des spécialistes indépendants originaires du Brésil, du Chili, de la Commission européenne (Centre commun de recherche), de France, d'Allemagne, d'Inde, du Japon, du Moyen-Orient, d'Afrique du Sud, d'Espagne, de Thaïlande et des États-Unis ont été invités à participer.

La présente évaluation par des pairs a été effectuée par des spécialistes de Fraunhofer CSP (Allemagne), CNRS (France) et Oxford Brookes University (Angleterre) dans le cadre d'un projet conjoint coordonné par CENER (Espagne).

L'objet des présents travaux conjoints est d'examiner et d'évaluer, de manière indépendante, la performance et les aspects environnementaux, de santé et de sécurité de la technologie CdTe PV de First Solar. Bien que le rapport soit axé sur le marché de l'énergie photovoltaïque de l'Union européenne, certains aspects de cette étude sont plus largement applicables.

La méthode utilisée pour établir le présent rapport repose sur une recherche approfondie de données provenant de sources publiques. Les sources utilisées furent des articles et des rapports publiés par des scientifiques de renom, des agences internationales et des établissements de recherche et de développement, ainsi que des informations confidentielles fournies par First Solar à propos de sa technologie et de ses procédures de gestion. Les informations ont fait l'objet d'une analyse critique, reposant sur l'expérience et le savoir-faire des experts ayant rédigé cette étude de pairs. En outre, les experts de chaque établissement ont visité l'installation de First Solar à Perrysburg (États-Unis) et ont rencontré certains membres clés de l'usine et de la direction. Lors de cette visite, plusieurs présentations comprenant des informations confidentielles ont été partagées et abordées. Cette visite a permis un échange d'informations et un examen in-situ pour répondre à des questions techniques ainsi qu'à des questions sur les procédures environnementales, de santé et de sécurité pendant la fabrication et le recyclage, ainsi que sur les systèmes de gestion des déchets. Cette visite a permis l'obtention d'informations supplémentaires à intégrer dans les publications. Les résultats principaux de l'examen de la littérature scientifique et de la visite sur site sont résumés dans les paragraphes suivants.

La technologie CdTe PV à couche mince de First Solar a vu l'efficacité de ses modules augmenter de d'environ 5 points de pourcentage en 5 ans, de 17,3 % aux 22,1 % obtenus en 2015. À moyen terme, la feuille de route technologique de First Solar vise une efficacité cellule de 24 %, ce qui se traduirait par une efficacité de 19 % au niveau du module. Les modules PV de First Solar sont produits dans le respect des normes les plus avancées dans le domaine de la durée de vie du produit, de sa fiabilité, de sa qualité et de sa performance. Un programme de contrôle qualité perfectionné et l'infrastructure pour effectuer des tests de fiabilité sont exploités à proximité des sites de production. Des tests de fiabilité extérieurs sont également menés dans plusieurs sites. Ces derniers représentent des conditions climatiques variées allant d'aride à chaud et humide. Des données précieuses, obtenues par l'observation de la performance des modules sur le

---

terrain, permettent d'améliorer la production de modules photovoltaïques dotés d'une durée de vie prolongée. First Solar est actif au sein de la chaîne de valeur de la technologie CdTe PV. Ceci lui donne une valeur ajoutée indéniable dans le monitoring, l'analyse de la performance, les services de maintenance et les questions d'intégration au réseau des centrales au sol photovoltaïques.

Un volume important et des coûts de fabrication bas permettent de développer des technologies photovoltaïques à grande échelle, ce qui diminue le coût actualisé de l'énergie (LCoE). L'évaluation des technologies photovoltaïques doit reposer sur l'évaluation du cycle de vie (LCA) et doit également tenir compte des avantages socio-économiques. À cet égard, il a été avéré que la technologie CdTe PV se place en position de leader concernant de nombreux paramètres environnementaux parmi les technologies photovoltaïques. En outre, en fonction d'une production cumulée donnée, le facteur de prix des modules CdTe est actuellement inférieur de 4 à 5 fois par rapport au photovoltaïque à base de silicium cristallin conventionnel. Si l'on raisonne uniquement à l'aide du mécanisme de réduction du prix par effet d'échelle, ceci signifie que la technologie CdTe est, de façon inhérente, moins chère que les technologies à base de silicium, ceci grâce au processus de production des technologies à couche mince plus simple, impliquant un nombre moins important d'étapes et où le panneau et la cellule sont produits par le même processus.

En plus de l'impact environnemental le plus faible de toutes les technologies photovoltaïques, la technologie CdTe PV fournit également une voie temporaire de séquestration, sûre et presque intégralement recyclable, à la surproduction de Cd brut prévue, ceci grâce à l'augmentation de la demande de Zn (dont Cd est un dérivé inévitable). La disponibilité du Te à long terme ne représente pas une contrainte significative compte tenu de la disponibilité de la matière première provenant de la récupération et des améliorations à venir en matière de l'intensité des semi-conducteurs et de processus de recyclage. Si l'on tient compte du déploiement à grande échelle futur du CdTe PV, la seule performance environnementale sur le cycle de vie identifiée comme préoccupante est la prévision de la demande de cuivre. Celui-ci est utilisé dans des quantités relativement importantes dans la partie électrique des autres composants de systèmes photovoltaïques et, par conséquent, ne concerne pas uniquement le CdTe PV. Néanmoins, à long terme, cette préoccupation pourrait être atténuée par une fourniture croissante de Cu secondaire dérivé du recyclage en fin de vie des systèmes photovoltaïques démantelés.

Les sites de fabrication et de recyclage de First Solar sont équipés de technologies modernes qui empêchent, contrôlent et minimisent les émissions dans l'air intérieur et extérieur. Les installations comprennent toute la technologie nécessaire pour traiter les effluents de déchets provenant de toutes les opérations de fabrication, notamment le recyclage des modules. Les émissions actuelles locales de cadmium dans l'atmosphère et les effluents liquides sont en deçà des limites des seuils réglementaires locaux. Le Programme de gestion d'hygiène industrielle de First Solar pour le Cd intègre un échantillonnage de l'air dans chaque zone comprenant du personnel et des équipements, ainsi qu'une surveillance médicale des employés incluant des analyses sanguines et d'urine. Les niveaux de cadmium dans l'air intérieur sont bien en deçà des limites d'expositions professionnelles. En ce qui concerne les analyses biologiques de

---

surveillance, les niveaux de Cd dans le sang et les urines sont bien en deçà des critères de l'Administration américaine de la santé et de la sécurité professionnelles.

Dans des conditions de fonctionnement normales, les modules CdTe PV de First Solar ne posent pas de risque pour l'environnement ou la santé car ils ne provoquent aucune émission de substance dangereuse. En cas d'accident prévisible, le risque pour le public a été considéré comme faible. En cas d'incendie, comme la végétation est limitée sur le sol des centrales au sol PV, les incendies d'herbe ont une durée d'existence courte et les températures maximum seront inférieures au point de fusion du CdTe. En cas d'incendie d'une installation sur toit, les résultats des essais d'incendie expérimentaux de Fthenakis *et al.*, BAM et CURRENTA confirment des taux bas d'émission dans l'atmosphère du Cd provenant de modules CdTe PV. De plus, les calculs de l'Agence bavaroise pour l'environnement et de Sinha., *et al.*, confirment que les concentrations de Cd dans le sens du vent sont inférieures aux niveaux fixés dans les consignes sur l'exposition aiguë. Puisque la plupart du Cd n'est pas émis dans l'atmosphère et reste dans le module et les débris du module, il a été recommandé de se débarrasser des résidus contaminés et de remplacer le sol, procédure normale après un incendie de bâtiment. L'eau utilisée pour éteindre les incendies a été déclarée comme contenant des quantités similaires de Cd à celles d'une étude antérieure sur le devenir et le transport. Celle-ci a permis de déceler des impacts non significatifs pour le sol et les eaux souterraines, pouvant être confirmés à l'aide d'une analyse des sols. Sur la base d'enquêtes de devenir et de transport réalisées par des pairs sur la lixiviation des modules CdTe PV brisés ou défectueux, le risque potentiel est minimal selon la modélisation du scénario catastrophe. Ces résultats sont renforcés par les données expérimentales et les pratiques des O&M d'exploitation et de maintenance (inspections de routine et surveillance de la production d'énergie) qui détectent et suppriment les modules défectueux. Une recherche indépendante, publiée dans des revues scientifiques à comité de lecture, contribuerait à soutenir les résultats des expériences de First Solar. Ces études scientifiques devraient aborder aussi bien les modules brisés représentant des expositions sur le terrain que les modules touchés par des problèmes d'intégrité, ressemblant à des situations possibles survenant en fin de vie. Par exemple, des études indépendantes de la lixiviation de module brisé ont été réalisées par le Fraunhofer Institute en Allemagne et par NEDO au Japon sur des modules de CdTe PV plus anciens : ces études démontrent des résultats inférieurs aux limites environnementales et de santé.

La mise au rebut et le recyclage inappropriés ainsi que les utilisations non prévues des modules CdTe PV restent des questions controversées vis-à-vis du déploiement à long terme de la technologie CdTe PV. Le CdTe dispose d'une stabilité chimique et thermique élevée et est insoluble dans l'eau, ce qui limite sa lixivabilité et sa biodisponibilité. L'analyse en profondeur des documents scientifiques disponibles suggère que le risque pour la santé associé à la mise au rebut de modules CdTe PV dans des sites d'enfouissement non-contrôlés est minime compte tenu des taux d'utilisation actuels. De façon plus spécifique, le niveau de criblage de l'indice de danger non carcinogène cumulé pourrait dépasser 1.0 uniquement si le volume de déchet représentait plus de 14 millions de modules sur une durée de 20 ans, ou plus de 5 millions de modules en 1 an (l'équivalent de la mise au rebut d'une installation bien supérieure à 500 MWc

---

en 1 an), en partant de l'hypothèse de la mise au rebut dans un site d'enfouissement unique et non cuvelé. La mise au rebut d'une installation multiple de 100 MW PV dans un seul site d'enfouissement non contrôlé correspond déjà à un scénario de limite supérieure. La mise au rebut non contrôlée d'un tel système est fortement improbable. En effet, une installation de cette taille représente un investissement d'un milliard de dollars et requiert une planification extensive et une évaluation d'impact ainsi que des permis de construction et d'exploitation, qui, dans tous les cas, prévoient des exigences de démantèlement et de mise au rebut.

Le recyclage des éléments à forte valeur (récupération du verre et des matériaux des semi-conducteurs) est idéal pour la gestion de la fin de vie des modules PV, notamment des CdTe PV. Celle-ci doit toutefois être confiée à des entreprises dotées des connaissances requises et des meilleures pratiques environnementales, de santé et sécurité, telles que celles documentées par CENELEC en appui de la Directive DEEE (Projet de Norme EN50625-2.4). Néanmoins, même en cas de recyclage informel, et à la différence des matériels électroniques grand public, seul un nombre limité de composants d'un module à couche mince monolithique pourrait être démantelé, mis à part les boîtiers de jonction et les câbles.

First Solar est chef de file de l'industrie photovoltaïque en ce qui concerne l'établissement de programmes de collecte et de recyclage qui garantissent un recyclage en fin de vie à l'aide d'une technologie éprouvée. Dans l'UE, l'inclusion de toutes les technologies photovoltaïques dans la directive DEEE, qui exige une collecte et un recyclage conformes aux normes minimales, ainsi que l'installation de recyclage de First Solar (à Francfort-sur-l'Oder en Allemagne) créent le cadre législatif et l'infrastructure nécessaires au déploiement durable de la technologie CdTe PV. Hors de l'UE, les services de recyclage de First Solar sont disponibles au niveau international. Ces panneaux en fin de vie sont recyclés par des installations de recyclage à Perrysburg (États-Unis) et Kulim (Malaisie).

Du point de vue de l'analyse du cycle de vie, il est important de mentionner que si la technologie CdTe PV était déployée au point de remplacer la production d'électricité à base d'énergie fossile conventionnelle, les avantages en termes d'émissions de gaz à effet de serre seraient compris entre un et deux ordres de grandeur par kWh d'électricité produite (une réduction de 600 g (Éq. CO<sub>2</sub>) - 800 g (Éq. CO<sub>4</sub>) à moins de 20 g (Éq. CO<sub>6</sub>) par kWh).

Le déploiement de CdTe PV en Europe permettrait également de diminuer les émissions globales de Cd par unité d'électricité générée, associées aux usines électriques à énergie thermique.

S'agissant de la transformation totale des terres par unité d'électricité générée, la performance de la technologie CdTe PV est plusieurs fois supérieure à celle des autres technologies renouvelables, telles que les éoliennes, l'hydroélectricité et, en particulier, la biomasse, tout en restant d'un ordre de grandeur similaire à celui des technologies classiques telles que le charbon et l'énergie nucléaire. En outre, le type de transformation des terres provoqué par les installations de CdTe PV est bien plus « léger » et sa restauration écologique est bien plus simple après le déclassement. Il s'agit d'une différence fondamentale en ce qui concerne ces dernières technologies. En Europe, les usines d'électricité thermique représentent 40 % des prélèvements en eau, alors que la technologie CdTe PV exige peu ou pas d'eau au cours de l'exploitation. Elle

---

présente une demande d'eau au cours du cycle de vie bien inférieure à de nombreuses autres technologies de production d'électricité.

Beaucoup pensent qu'un déploiement à grande échelle de la technologie CdTe PV aurait des effets positifs à long terme sur l'environnement et ne poserait pas de risque pour la santé du public au cours de l'exploitation et en cas d'accident prévisible. Dans l'EU, des politiques de recyclage sont en place permettant de traiter en toute sécurité les modules en fin de vie, et les installations de recyclage de First Solar à Francfort-sur-l'Oder (Allemagne) permettent une gestion responsable et durable de la technologie CdTe PV en fin de vie. Les services de recyclage de First Solar sont également disponibles à l'international hors de l'UE.