

## ISIS Energie solaire photovoltaïque

# Jusqu'où le solaire peut-il être considéré comme 'vert' sur le plan écologique ?

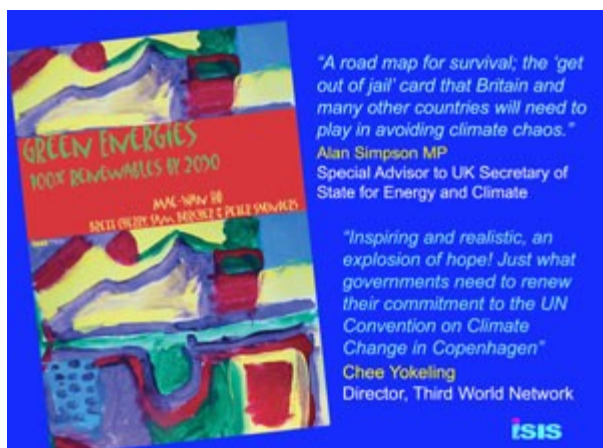
## How Green is Solar?

**Les modules solaires photovoltaïques au tellure de cadmium en couches minces sont sous les feux de la rampe. [Dr. Mae-Wan Ho](#)**

### Rapport ISIS 17/01/2011

L'article original en anglais, avec toutes les références, s'intitule [How Green is Solar](#) : il est accessible sur le site [www.i-sis.org.uk/howGreensSolar.php](http://www.i-sis.org.uk/howGreensSolar.php)

**Le CONTENU DE CE SITE NE PEUT PAS être reproduit sous aucune forme sans autorisation explicite. D'AUTORISATION DE REPRODUCTION ET EXIGENCES, S'IL VOUS PLAÎT [CONTACTEZ-ISIS](#) .Lorsqu'une autorisation est accordée TOUS LES LIENS doivent rester inchangés**



<http://www.i-sis.org.uk/GreenEnergies.php>

*Green Energies 100% Renewables by 2050 - By Mae-Wan Ho, Brett Cherry, Sam Burcher & Peter Saunders - ISIS.*

L'énergie solaire figure en tête de la liste des énergies renouvelables dans le monde, à la fois pour les capacités installées et pour le taux de croissance. Le **solaire photovoltaïque** - produisant de l'électricité à partir de la lumière du soleil - a connu une croissance rapide, tirée par les avancées technologiques qui font baisser les prix, autant que par les politiques gouvernementales telles que les tarifs de rachat de l'électricité ainsi produite [1] ] ([World Reached 25 % Renewable Energy Capacity, SiS 49](#)) \*.

\* La version en français s'intitule "On a atteint une capacité de 25% d'énergies renouvelables dans le monde" par le Dr. Mae-Wan Ho, traduction, définitions et compléments de Jacques Hallard ; accessible sur le site <http://yonne.lautre.net/spip.php?article4658> [Note du traducteur - Attention : cet article a été très contesté.]

Mais l'énergie **photovoltaïque** est-elle vraiment écologique ? Un souci particulier est la toxicité des métaux, comme le **cadmium** qui est utilisé dans les nouveaux matériaux photovoltaïques en couches minces.

La *Silicon Valley Toxics Coalition*, basée à San Jose en Californie aux États-Unis, a mené une enquête au début de l'année 2010 afin de comparer les pratiques en matière de sécurité et de santé environnementale, ainsi que les politiques de recyclage et la prise en compte de la durabilité parmi les 14 principaux fabricants de panneaux solaires qui représentent environ un quart de la part de marché mondial des panneaux solaires [2, 3].

Les entreprises allemandes sont les mieux placées dans l'ensemble : Calyxo, Solarworld et Sovello; Yingli en Chine arrive en quatrième position. Les sociétés First Solar et Abound Solar des États-Unis se suivent dans la liste. Il n'a pas été obtenu de réponse à partir de plusieurs grands fabricants comme Sharp, Miasolé, Best Solar et Solyndra.

Le sondage révèle également les points suivants :

- La moitié des entreprises interrogées se chargent de la reprise obligatoire et du recyclage à la fin de vie de fonctionnement des panneaux. Mais la plupart doivent commencer à économiser et à constituer des réserves financières pour assurer ces programmes futurs.
- Environ les deux tiers des entreprises interrogées n'ont pas réussi à effectuer une analyse du **cycle de vie** de leurs produits
- Les risques liés aux produits chimiques utilisés pendant la fabrication des panneaux solaires ne sont pas pris en compte par la majorité des fabricants qui ont répondu.

Il est important d'effectuer une analyse du cycle de vie ainsi que d'étudier les impacts négatifs, tant environnementaux que sanitaires, des options concernant les énergies renouvelables : le recyclage des matériaux en fin de vie devrait être obligatoire, en particulier pour les composants toxiques, comme le **cadmium** ou le **tellure de cadmium**.

## L'analyse du cycle de vie

Les chercheurs dirigés par Vasilis Fthenakis à l'Université Columbia, New York, aux États-Unis, ont mené l'analyse du cycle de vie des panneaux ou **modules solaires photovoltaïques** ([4] [Solar Power Getting Cleaner Fast](#), *SiS* 39).

Dans la dernière mise à jour complète, l'analyse débute par l'acquisition des matières premières, à travers le traitement des matériaux, la fabrication, l'utilisation, le démantèlement, le traitement ou l'élimination et le recyclage, le cas échéant, la prise en compte comptable des intrants de matières et d'énergie, ainsi que les déchets sous forme d'effluents dans l'air, dans les eaux ou dans les sols [5].

Les intrants de matières et d'énergie, de même que les sorties au cours des cycles de vie des systèmes photovoltaïques de silicium (Si PV) et de tellure de cadmium en couche mince (CdTe) ont été étudiés en détail à partir des mesures réelles effectuées dans les usines de production des équipements photovoltaïques PV entre 2004 et 2006.

Ils ont utilisé les données les plus à jour obtenues par des chercheurs sur l'inventaire du cycle de vie (ICV) pour la production de modules de silicium cristallin en Europe occidentale dans le cadre de la *Crystal Clear*, un grand projet intégré européen qui se concentre sur la technologie du silicium cristallin, co-financé par la Commission européenne et les pays participants.

Les données ICV pour la technologie relative au tellure de cadmium CdTe en couches minces ont été prises à partir des informations provenant de l'usine de First Solar située à Perrysburg, dans l'Ohio, aux États-Unis.

L'épaisseur typique des PV multi- et mono-Silicium est de 270-300 mm, et celle de ruban-Silicium est de 300-330 mm ; 72 cellules individuelles de 156 cm<sup>2</sup> (125 cm x 125 cm) comprennent un module de 1,25 m<sup>2</sup> pour tous les types photovoltaïque au silicium.

Le rendement de conversion des divers modules : ruban, multi- et mono-Silicium est respectivement de 11,5, 13,2 et 14,0 pour cent. Depuis 2006, l'usine de First Solar fabrique des modules de 25 MWp sans cadre, avec double vitrage, en modules au CdTe de 1,2 mètre sur 0,6 mètre, évalué avec une efficacité de 9 pour cent avec une couche active d'environ 3 mm d'épaisseur, soit seulement un centième de l'épaisseur du système photovoltaïque en silicium.

Une partie importante de l'installation des panneaux solaires, qui n'a pas été prise en compte dans l'analyse précédente du cycle de vie, est la '*balance of system*' (BOS), "l'équilibre du système" : sont considérés tous les composants, autres que les panneaux photovoltaïques PV eux-mêmes, qui sont nécessaires pour les supporter et pour permettre leur fonctionnement.

Les modules de silicium nécessitent un cadre en aluminium de 3,8 kg / m<sup>2</sup> pour le montage, tandis qu'un support de verre remplit les mêmes fonctions pour le PV au CdTe. Pour une toiture photovoltaïque, "l'équilibre du système", BOS, comprend généralement des onduleurs, le montage des structures, des câbles et des connecteurs.

Les systèmes solaires à grande échelle équipés au niveau du sol nécessitent des équipements et des installations supplémentaires, tels que les raccordements, les installations de bureau et les fixations en béton. La masse de ce type d'équipement a été estimée à 9 - 10 fois la masse des panneaux, pour une installation de 3,5 MW réalisée à Springville, dans l'Arizona aux États-Unis.

## **Temps de récupération de l'énergie utilisée et émissions des gaz à effet de serre**

Les paramètres les plus fréquemment pris en compte dans les analyses pour la mesure du cycle de vie des systèmes PV, concernant l'environnement, sont l'*energy payback time* (EPBT), le temps de retour énergétique, d'une part, et les émissions des gaz à effet de serre, d'autre part. L'EPBT est la durée nécessaire pour qu'un système donné d'énergie renouvelable arrive à produire la même quantité d'énergie que celle qui a été utilisée pour produire le système lui-même. Le calcul de l'équivalent en énergie primaire nécessite des connaissances relatives aux carburants et/ou combustibles typiques de chaque pays, les matières premières et les technologies qui sont utilisées pour produire de l'énergie.

Les paramètres EPBT, les 'temps de retour énergétique', sont présentés dans la figure 1. Comme on le voit, les photovoltaïques PV au tellure de cadmium CdTe ont, de loin, les plus

faibles valeurs : un an en Europe et un peu plus d'un an aux États-Unis.

*Figure 1 Délai de récupération de l'énergie pour les différents PV solaire*

Les émissions de gaz à effet de serre pendant le cycle de vie d'un système PV sont estimées comme un équivalent de CO<sub>2</sub>, en utilisant une période de temps intégrée de 100 ans; les principales émissions incluses dans les émissions de gaz à effet de serre GES sont le CO<sub>2</sub> (**potentiel de réchauffement planétaire**, PRG = 1), le méthane CH<sub>4</sub> (PRG = 23), N<sub>2</sub>O (PRG = 296), et les chlorofluorocarbones (PRG = de 4600 à 10 600).

*Figure 2 . Les émissions de gaz à effet de serre pour les PV solaires par rapport à certaines sources non-renouvelables*

Encore une fois, les émissions des panneaux photovoltaïques PV au tellure de cadmium CdTe, avec 24 g par kWh, arrivent en tête du classement par rapport aux panneaux photovoltaïques PV au silicium, avec 37 g par kWh. Ces émissions sont bien en deçà de celles du gaz naturel, du charbon et du pétrole. J'ai omis les émissions des gaz à effet de serre de l'énergie nucléaire, données dans le graphique des auteurs à 24 g par kWh, le même que pour le PV au CdTe. Cette valeur était bien inférieure à celle résultant d'une analyse détaillée réaliste, qui a placé les émissions des gaz à effet de serre du nucléaire entre un minimum de 85 g et un maximum de 130 g par kWh ([6] [The Nuclear Black Hole](#), SiS 40).

Les consommations d'électricité, de carburants et de combustibles au cours de la production des matériaux et des modules photovoltaïques sont les principales sources des émissions de gaz à effet de serre pour les cycles de vie du photovoltaïque. En amont, les méthodes de production d'électricité jouent également un rôle important dans la détermination des émissions totales de gaz à effet de serre. Par exemple, le facteur d'émission moyen des gaz à effet de serre concernant le réseau électrique des États-Unis est de l'ordre de 40 pour cent plus élevé que celui qui existe en Europe occidentale (UCTE), ce qui entraîne des estimations de gaz à effet de serre plus élevées pour les modules produits aux États-Unis. Il est clair que les améliorations dans l'utilisation des matières et de l'énergie, ainsi que dans le recyclage, permettront d'améliorer les profils concernant les impacts sur l'environnement.

Une amélioration importante, enregistrée au cours des dernières années, est un processus de recyclage des résidus au cours des opérations de sciage, avec le fluide de coupe qui est utilisé dans la découpe de plaquettes. Ce processus de recyclage récupère 80-90 pour cent du carbure de silicium et du polyéthylène glycol qui étaient auparavant gaspillés comme déchets, ce qui diminue l'*energy payback time (EPBT)*, le temps de retour énergétique, ainsi que les gaz à effet de serre, pour ces technologies, de l'ordre de 10 pour cent. D'autres gaz résiduels ont été comparés. Les émissions de NO<sub>x</sub> et de SO<sub>x</sub> résultant du photovoltaïque avec le tellure de cadmium CdTe, qui sont respectivement de 42 mg / kWh et 79 mg / kWh, soit la moitié des émissions qui sont engendrées pour réaliser les modules photovoltaïques avec le silicium.

## **Les émissions de métaux lourds**

Les émissions toxiques de métaux lourds sont une préoccupation majeure lors de l'extraction, des procédés de fabrication et pendant l'utilisation des équipements.

Le cadmium est un sous-produit du travail sur le zinc et le plomb et il est collecté à partir des

émissions et des flux de déchets au cours de la production de ces principaux métaux. La plus grande fraction de cadmium pur à environ 99,5 pour cent, est sous la forme d'une sorte d'éponge provenant de la récupération électrolytique du zinc. Cette éponge est transférée vers une installation de récupération du cadmium, puis traitée par oxydation et lessivage pour générer une nouvelle solution électrolytique. Après une précipitation sélective des principales impuretés, le cadmium 99,99 pour cent pur est récupéré par extraction électrolytique. Puis il est ensuite purifié par distillation sous vide pour les fabrications des modules photovoltaïques à base de tellure de cadmium.

Alors que les émissions du cadmium peuvent avoir lieu tout au long du processus d'extraction, les émissions au cours de la durée de vie d'un module fini au CdTe sont négligeables, car il est enfermé dans du verre. Seul un incendie pourrait le remettre en circulation s'il venait à survenir. Les expériences menées au *Brookhaven National Laboratory*, qui simulent les conditions réelles d'incendie, ont révélé que le tellure de cadmium CdTe est effectivement contenu dans l'encapsulation entre couches de verre lors de l'incendie, et seules d'infimes quantités (de 0.4 à 0.6 pour cent) de Cd sont libérées. La dissolution du Cd dans le verre en fusion a été confirmée par des études de microscopie à rayons X avec un synchrotron à haute énergie.

Les centrales électriques fonctionnant à partir des dérivés pétroliers et du charbon génèrent systématiquement du cadmium Cd pendant leur fonctionnement, car il est présent à l'état de traces dans ces deux sources énergétiques.

Selon les données de l'*US Electric Power Research Institute*, dans les meilleures conditions optimisées de fonctionnement et d'entretien, la combustion du charbon pour générer de l'électricité rejette entre 2 et 7 g de Cd / GWh. En outre, 140 g / GWh de Cd sont recueillis inévitablement sous forme de poussière fine ou de particules dans les chaudières, les filtres à manches et les précipitateurs électrostatiques (ESP).

Les émissions de cadmium Cd à partir des centrales électriques fonctionnant aux dérivés lourds du pétrole, sont 12-14 fois plus élevées que celles des centrales qui fonctionnent au charbon, même si le pétrole lourd contient beaucoup moins de cadmium Cd que le charbon (0,1 ppm), car ces installations n'ont pas les équipements de contrôle des particules.

Les émissions de cadmium sont également associées aux cycles de vie des équipements fonctionnant au gaz naturel ou avec du combustible nucléaire, en raison de l'énergie utilisée dans les procédés de traitement et de production des matériaux.

Ainsi, en remplaçant les sources d'énergie conventionnelles, le photovoltaïque au tellure de cadmium CdTe, *réduit nettement* la quantité de Cd libérée dans l'air. Chaque GWh d'électricité produite par les modules PV au CdTe permet d'économiser environ 5 g d'émissions atmosphériques de Cd si elle est utilisée à la place ou en complément, en référence avec le réseau électrique de l'Europe occidentale UCTE.

Les émissions directes de Cd au cours du cycle de vie des systèmes photovoltaïques PV au tellure de cadmium CdTe sont 10 fois inférieures à celles des émissions indirectes dues à l'utilisation de l'électricité et de carburant dans le même cycle de vie, et environ 30 fois moins que celles des émissions indirectes provenant des cellules photovoltaïques cristallines. Les résultats sont donnés dans la figure 3.

*Figure 3 Les émissions de cadmium des sources photovoltaïques et des autres sources*

## conventionnelles

Les auteurs ont également examiné les émissions indirectes de métaux lourds dans le cycle de vie des systèmes photovoltaïques PV Si et ils ont constaté que le photovoltaïque PV au tellure de cadmium CdTe occasionne le moins d'émissions de métaux lourds parmi tous les systèmes photovoltaïques ; par ailleurs, les émissions d'arsenic, de chrome, de plomb, de mercure et de nickel sont moindre qu'avec des modules au silicium.

## L'utilité des concentrateurs photovoltaïques

Un système de concentration photovoltaïque, le «PV Amonix à haute concentration» (HCPV) se compose d'unités appelées MegaModules montés sur des trackers à deux axes. Chaque MegaModule est constitué de 48 blocs d'unités de sous-modules évalués à 3,8 kWp-AC chacun, en vertu d'une irradiance directe normale de 850 W / m<sup>2</sup>.

Une technologie reposant sur la concentration de réfraction basée sur des lentilles de Fresnel en acrylique, atteint effectivement un taux de concentration de 250. Un morceau de plaque acrylique, avec 24 lentilles minces de 4 mm d'épaisseur et antireflet, est monté sur chaque sous-module. Un total de 1.152 cellules au silicium mono-cristallin à simple jonction, chacune de 1,2 cm<sup>2</sup>, sont montées au niveau des points focaux d'un MegaModule (voir Fig. 4). Cette cellule solaire mono-cristalline AM-10<sup>TM</sup> fonctionne avec une efficacité de 26,5. L'*Arizona Public Service* a installé et testé plusieurs systèmes Amonix HCPV avec des capacités d'environ 500 **kWp**, le plus important étant de 168 kWp, installé à son usine photovoltaïque près de Prescott, dans l'Arizona.

Les données pour l'analyse ont été obtenues par le système de 24 kW du centre *APS STAR* de Phoenix aux Etats-Unis.

*Figure 4. Le système MegaModule Amonix complet de 24 kW du centre 'APS STAR' centre de Phoenix aux Etats-Unis, <http://www.amonix.com/>*

Les principales composantes du système de 24 kWp '5-MegaModule' comprennent des cadres, l'optique, les cellules monocristallines au silicium Si, des dissipateurs de chaleur, des trackers, des fondations, un entraînement hydraulique, un moteur, un régulateur, un convertisseur, une sonde, un compteur d'électricité et un anémomètre (un indicateur pour l'enregistrement de la vitesse du vent).

Bien que la zone d'ouverture soit de 182 m<sup>2</sup>, la superficie totale du concentrateur est de 230 m<sup>2</sup>, y compris les espaces réservés aux cadres. Les trackers se composent d'un socle de 5,5 m de haut, d'un tube de couplage et d'un entraînement hydraulique avec un contrôleur-régulateur. Les fondations en béton utilisées dans l'installation expérimentale STAR à Phoenix, sont de 5,5 m de profondeur et 1,2 m de diamètre. Chaque système MegaModule de 24 kWp a un onduleur Xantrex de 30 kW et de multiples MegaModules partagent un même transformateur.

Le faisceau de rayonnement solaire direct est en moyenne de 2.480 kWh / m<sup>2</sup> / an à Phoenix, dans l'état de l'Arizona. Fonctionnant avec un taux d'efficacité de conversion AC de 16 pour cent, l'installation devrait idéalement produire 72 MWh (2.480 x 0,16 x 182 m<sup>2</sup>) par an dans des conditions standard de 25° C, la température ambiante avec un vent de 1 m / s). Toutefois, il

n'a généré que 49,2 MWh en 2005, soit 30 pour cent de moins. Les pertes ont été imputées à des salissures, à l'alignement et aux ombres entre les unités et d'autres objets, ainsi qu'à la température et aux pannes des équipements.

Le tableau 1 donne les paramètres du cycle de vie de l'équipement à concentration par rapport à une installation photovoltaïque ordinaire. Comme on le voit, les photovoltaïques PV ordinaires, en particulier ceux au tellure de cadmium CdTe, ont de meilleures performances que l'équipement à concentration, pour les deux paramètres : aussi bien pour l'*energy payback time (EPBT)*, le temps de retour énergétique, que pour les émissions de gaz à effet de serre (*GHG*).

Le matériel photovoltaïque à films en couches minces à base de tellure de cadmium CdTe apparaît clairement, pour le moment, le gagnant du classement. Il montre que des installations de distribution à petite échelle peuvent mieux fonctionner que les équipements de services publics importants. Et il y a certainement de la place pour des améliorations, comme le fait de recycler les matières toxiques et, mieux encore, de trouver des alternatives non-toxiques.

**Tableau 1 - Paramètres du cycle de vie d'un système photovoltaïque à concentration et d'un système photovoltaïque ordinaire**

PV system	Amonix HCPV 24 kW <sub>p</sub> current	Amonix HCPV 24 kW <sub>p</sub> future	Mono c-Si ground-mount	CdTe ground-mount
Module DC efficiency (%)	18	18	14	9
System loss (%)	32	17	20	20
Insolation (kWh/m <sup>2</sup> /yr)	2 480	2 480	2 370	2 370
EPBT (years)	1.3	1.1	1.8	0.8
GHG <sup>c</sup> (g CO <sub>2</sub> e/kWh)	38	31	35	18

© 1999-2010 The Institute of Science in Society

[Contact the Institute of Science in Society](#)

**MATERIAL ON THIS SITE MAY NOT BE REPRODUCED IN ANY FORM WITHOUT EXPLICIT PERMISSION. FOR PERMISSION, PLEASE [CONTACT ISIS](#)**

## Définitions et compléments en français

**Cadmium** – Extraits d'un article de Wikipédia

Le **cadmium** est un [élément chimique](#) de [symbole Cd](#) et de [numéro atomique](#) 48.

**Histoire** [[modifier](#)]

Le cadmium fut découvert en 1809 par [Magnus Martin af Pontin](#), mais c'est en 1817 que l'Allemand [Friedrich Stromeyer](#) le prépara pour la première fois.

Le nom de Cadmium vient du latin *cadmia*, « [calamine](#) », ancien nom donné au carbonate de zinc – le cadmium était extrait de ce minerai aux environs de la ville de [Thèbes](#), qui fut fondée

par [Cadmos](#), et dont la citadelle porte le nom de *kadmeia*, en français [Cadmée](#).

.....

### **Toxicité et toxicologie du cadmium** [\[modifier\]](#)

---

Article détaillé : [Intoxication au cadmium](#).

Elle est connue depuis les [années 1950](#). Très toxique sous toutes ses formes (solide, vapeur, sels, composés organiques), le cadmium est l'un des rares éléments n'ayant *aucune fonction connue* dans le corps humain ou chez l'animal. Il faut éviter son contact avec des aliments.

- Chez l'animal, c'est le rein et le foie qui sont principalement touchés. Certains animaux (équiens en particulier) semblent fortement concentrer le cadmium dans leurs reins, d'autant plus que le cheval (cas le plus courant) est vieux. C'est pourquoi des législations spécifiques peuvent concerner les abats des animaux « *tardivement abattus* », de cheval en particulier <sup>9</sup>.  
La teneur moyenne en cadmium des abats d'équidés (cheval, âne, mulet, baudet..) est environ de 10 µg/g de cadmium <sup>9</sup>. La Dose journalière tolérable temporaire [DJTT](#) ayant été fixée à 1 µg.kg-1.d-1, toute commercialisation des abats des équidés tardivement abattus est interdite <sup>9</sup>. Même si ces abats étaient, la seule source de cadmium alimentaire pour les humains, cette interdiction serait justifiée, car une consommation moyenne hebdomadaire de seulement 100 g d'abats, conduit à exposer le consommateur à 1000 µg/semaine, soit pour quelqu'un de 60 kg, plus que le doublement de la DJTT (qui autorise une consommation de 60 µg par jour, soit 420 µg/semaine) <sup>9</sup>.
- Chez l'Homme, il provoque notamment des problèmes rénaux et l'augmentation de la tension. En outre, son inhalation étant dangereuse, des risques potentiels sont à craindre avec les téléphones portables et sans fil : En particulier s'ils sont utilisés peu de temps après chargement (ce qui est moins fréquent avec les portables mais récurrent avec les téléphones sans fil), car les [piles](#) ou [batteries rechargeables](#) sont alors chaudes et dégagent souvent, même neuves, des vapeurs toxiques en faibles quantités, mais facilement inhalées de par la proximité des [voies respiratoires](#).

Face à ces risques et aux autres contaminations environnementales, les piles NiMH moins polluantes et moins dangereuses pour la santé, vont remplacer à partir de 2008 les piles NiCd au sein de l'Union Européenne.

### **Historique** [\[modifier\]](#)

---

Dans les années 1950, au [Japon](#), une intoxication aiguë au cadmium a donné une maladie des reins et des os, nommée « *itai-itai* » (qui signifie « j'ai mal, j'ai mal »), cette phrase étant souvent répétée par les malades.

Le cadmium est concentré par la [chaîne alimentaire](#). Les [mollusques](#) bivalves le concentrent 300 000 fois, voire plus. Celui-ci peut venir de loin ; par exemple, le cadmium présent en excès dans les [huîtres](#) d'Oléron vient d'une source située très en amont (anciens déchets miniers).

### **Norme et sécurité** [\[modifier\]](#)

---

En France, la quantité moyenne annuelle de cadmium ingéré par personne et par an est évaluée à 12 mg. L'absorption par voie digestive de plus de 0,9 g ou par voie respiratoire (de poussières) à des concentrations plus grandes que 200 mg/m<sup>3</sup> peut entraîner des troubles graves.

En France, la valeur limite d'exposition est fixée à 0,05 mg/m<sup>3</sup>, pour les fumées d'oxyde.

La consommation de [tabac](#) peut représenter jusqu'à 75 % de l'absorption alimentaire humaine en cadmium quotidienne. Aujourd'hui, les principaux risques d'intoxication sont liés aux expositions prolongées à de faibles doses de cadmium. Le cadmium est principalement



absorbé par inhalation et se fixe à 30 - 40 % dans les [reins](#) où il entraîne une perte anormale de [protéines](#) par les [urines](#) (protéinurie).

### **Sources d'exposition** [\[modifier\]](#)

---

Le cadmium semble quantitativement absorbé d'abord par inhalation et moindrement par absorption gastro-intestinale. Il n'est pas absorbé par la [peau](#). En dehors de l'exposition professionnelle, on peut y être exposé *via* :

- la fumée et les [poussières](#) perdues par certaines industries ([métallurgie](#), recyclage des batteries au cadmium, [engrais](#) phosphorés) ;
- la [fumée](#) de [cigarette](#) (la source principale de contamination de la population générale) ;
- les [engrais](#) phosphorés de synthèse (ou naturels parfois), qui en contiennent beaucoup et qui polluent le sol et les nappes ;
- les effluents et [boues d'épuration](#) urbaine et/ou industrielles épandues sur les champs ou en [forêt](#) sont des sources parfois importantes de cadmium. Deux cultures expérimentales sur champ suite à un [épandage](#) de boues d'épuration ont montré que ces épandages ont conduit à des teneurs proches des [maxima](#) autorisés<sup>10</sup>;
- certains aliments (dont par exemple les [champignons](#), ou les organes tels le [foie](#) et les reins en contiennent souvent des taux supérieurs aux [normes](#) parce que ces organes ont pour rôle justement de capter et réduire les concentrations de cadmium circulant dans le système. Le blé et certains végétaux (e.g. épinards) semblent pouvoir l'accumuler plus que d'autres. Certains légumes et les céréales peuvent concentrer le cadmium. Les cultures de céréales sur sols acides favorisent la contamination du grain, avec cependant des différences significatives selon les variétés plantées ; Le cheval en absorbe plus que les autres animaux.  
Les animaux sauvages ne sont pas épargnés, et peuvent être une source d'intoxication pour l'homme. En France, les plans de contrôles récents (2008) n'ont porté que sur un petit nombre d'échantillons ; pour le cadmium, ils montraient que c'est uniquement dans les viandes de gibier sauvage (7 échantillon de muscle sur 57 dépassaient la norme, ainsi que 9 échantillons de foie sur 56) que des dépassement de normes ont été constatés (non dans le gibier d'élevage)<sup>11</sup>
- les cendres et résidus d'incinération, après combustion d'objets contenant du cadmium (peintures, [PVC](#), etc.) comme colorant, additif ou catalyseur ;
- [l'air urbain](#) (niveaux parfois très élevés près des centres de production).

Les [lichens](#), les [mousses](#) et les [champignons](#) peuvent en accumuler des doses très élevées, voire mortelles, de même que d'autres [métaux lourds](#), faisant de ces espèces de bons indicateurs de l'état de [pollution](#) de l'[Environnement](#) (quand elles y ont survécu).

### **Intoxications aiguës** [\[modifier\]](#)

---

#### **Fièvre des fondeurs**

L'inhalation de fumées d'oxyde de cadmium (générées lorsque le cadmium métallique est porté à haute température). Il entraîne des symptômes semblables à ceux de la fièvre des fondeurs (état grippal débutant). Le traitement est uniquement symptomatique.

#### **Atteinte pulmonaire**

L'exposition à des niveaux plus élevés peut causer de sérieux dommages [pulmonaires](#) voire la mort. Les fumées d'oxyde de cadmium sont des irritants pulmonaires sévères (dû à la taille de leurs particules), les poussières de cadmium étant moins irritantes car leurs particules ont une plus grande dimension. Les symptômes sont de types soit pulmonaires (les signes cliniques étant le reflet de lésions variant l'irritation naso-pharyngée et bronchique à l'[œdème pulmonaire](#)) soit de type maux de tête, frissons, douleurs musculaires, nausées, vomissements, diarrhée... Les concentrations fatales de fumées varient de 40 à 50 mg/m<sup>3</sup>.

## **Intoxications chroniques[ [modifier](#)]**

---

### **Atteintes rénales**

L'exposition chronique au cadmium, par inhalation ou ingestion, a comme conséquence des atteintes rénales qui peuvent continuer de progresser même après la cessation de l'exposition.

### **Atteinte pulmonaire**

L'exposition de longue durée par inhalation à de bas niveaux peut causer une diminution de la fonction pulmonaire et l'[emphysème](#).

### **Atteinte osseuse**

Même si l'absorption par ingestion est basse, l'exposition chronique à des niveaux élevés de cadmium dans la nourriture peut causer des désordres osseux, incluant l'[ostéoporose](#) et l'[ostéomalacie](#). L'ingestion à long terme, par une population [japonaise](#), d'eau et de nourriture contaminées par le cadmium, a été associée à une condition incapacitante, la maladie « [itaï-itaï](#) » (aïe-[aïe](#)).

Elle se caractérise par des douleurs au [dos](#) et dans les [articulations](#), de l'ostéomalacie ([rachitisme](#) adulte), des [fractures](#) osseuses, et occasionnellement des défaillances rénales. Cette maladie affecte le plus souvent les femmes et les facteurs de risque sont la multiparité et l'alimentation de pauvre qualité.

### **Divers**

Les autres conséquences de l'exposition chronique au cadmium sont l'[anémie](#), la coloration jaunâtre des [dents](#), la [rhinite](#), l'ulcération occasionnelle du [septum nasal](#), les dommages au nerf olfactif et la perte de l'[odorat](#).

**Temps de séjour dans l'organisme** : Le cadmium s'accumule dans les organes au long de la vie pour chez l'homme adulte atteindre 30 à 40 milligrammes, voire plus chez ceux qui y ont été exposés durant leur vie car l'élimination naturelle (urine, excrément, et moindrement règles, éjaculation, perte de phanères (ongles, cheveux) ne compense généralement pas les apports. Il s'accumule provisoirement dans le foie avant de s'accumuler dans les reins où au-delà de 200 mg par kg chez l'adulte, il provoque des lésions irréversibles.

**Santé reproductive** : Les effets testiculaires étaient démontrés chez l'animal à fortes doses expérimentales, avec une altération génétique constatée même à des doses inférieures aux doses toxiques chez la souris <sup>12</sup>. On a récemment montré que le cadmium est aussi un [perturbateur endocrinien](#) ; Chez le rat, il interagit, aux seuils à ne pas dépasser pour l'[OMS](#) avec les récepteurs des [[œstrogène]]s . >À l'université de Washington (USA)<sup>13</sup>, des [rats](#) femelles dont on avait ôté par ablation les [ovaires](#) (afin que l'animal ne produise plus d'[œstrogènes](#)) ont été exposés à une injection hebdomadaire de cadmium à un taux qui est celui que l'OMS recommande de ne pas dépasser (5 et 7 microgrammes par kilo et par semaine). Quatre jours après la première injection, des effets pseudo hormonaux étaient observés. Le cadmium dans le sang produit chez les rats femelles la pousse des glandes mammaires, ainsi qu'une augmentation du poids et de la taille de l'utérus, ainsi qu'un amincissement de la paroi utérine des cobayes. Les femelles enceintes ont des petits dont la puberté survient plus tôt. Cet effet [hormonal](#) pourrait expliquer certains troubles osseux ([ostéoporose](#), fractures précoce...) chez les femmes au Japon lors de la maladie d'Itaï Itaï décrite en 1967. Les conclusions ne peuvent être directement extrapolées à l'Homme, mais la question est posée. Les effets œstrogéniques sont à confirmer par des études sur d'autres modèles animaux et chez l'Homme, notamment parce que le cadmium était injecté aux rats, et qu'il peut être présent sous des formes différentes et moins brutalement chez l'homme par voie orale ou pulmonaire.

Une autre question est celle de la [synergie](#) ou [potentialisation](#) lorsque le cadmium est absorbé - ce qui est souvent le cas - avec d'autres toxiques. Les doses recommandées par l'OMS : 7 microgrammes par kilo et par semaine, et entre 3 à 5 microgrammes par litre pour la boisson pourraient un jour être révisées, comme pour le plomb.

### **Cancérogénèse et mutagenèse** [\[modifier\]](#)

---

Plusieurs composés inorganiques du cadmium causent des [tumeurs](#) malignes chez l'animal. L'exposition professionnelle au cadmium peut être considérée comme responsable d'une augmentation significative du [cancer du poumon](#). Le CIRC ([Centre de recherche international sur le cancer](#)) a déterminé qu'il y a suffisamment de preuve chez l'homme quant à la cancérogénicité du cadmium et de ses composés. Il s'avère également que le cadmium a la capacité de modifier le matériel génétique, en particulier les [chromosomes](#). D'après le directeur du centre de recherche de la fondation "vive la santé" le cadmium serait un des facteurs de stérilité....

Article complet à lire sur le site <http://fr.wikipedia.org/wiki/Cadmium>

---

### **Cycle de vie** - Introduction d'un article de Wikipédia\_

L'**analyse de cycle de vie** (ACV) se base sur la notion de [développement durable](#) en fournissant un moyen efficace et systématique pour évaluer les [impacts environnementaux](#) d'un [produit](#), d'un [service](#) ou d'un procédé.

Le but fondamental, suivant la logique de pensée cycle de vie, est de réduire la pression d'un produit sur les ressources et l'[environnement](#) tout au long de son cycle de vie, de l'extraction des [matières premières](#) jusqu'à son traitement en fin de vie (mise en décharge, [incinération](#), [recyclage](#), etc), cycle souvent qualifié de *berceau au tombeau* (« cradle to grave » en anglais). Un effet secondaire est qu'en limitant les besoins en ressources et en [énergie](#), la chaîne de valeur du produit peut s'en trouver améliorée.

Cette méthode, apparue dans les années 1970, commence à entrer dans les méthodes couramment utilisées en gestion de l'environnement, notamment depuis sa normalisation avec la série des normes ISO 14040 (la [série des normes ISO 14000](#) concernant la gestion de l'environnement).

L'analyse de cycle de vie est à la fois :

- une procédure, c'est-à-dire une suite d'étapes standardisées ;
- un modèle de transformations mathématiques permettant de transformer des flux en impacts environnementaux potentiels.

---

Malgré le nom de cette méthode, il est important de comprendre que l'analyse du cycle de vie s'occupe d'étudier la fonction du produit. En effet, en n'étudiant que le produit en lui-même, il deviendrait difficile de comparer des produits remplissant la même fonction mais de manière différente comme la voiture et le transport en commun dont la fonction commune est de déplacer des personnes. Article complet sur le site : [http://fr.wikipedia.org/wiki/Analyse\\_du\\_cycle\\_de\\_vie](http://fr.wikipedia.org/wiki/Analyse_du_cycle_de_vie)

**KWp** - De l'anglais ***kWpeak*** francisé en ***kWpic*** ou ***kW pic*** C'est une unité de puissance considérée à un maximum possible

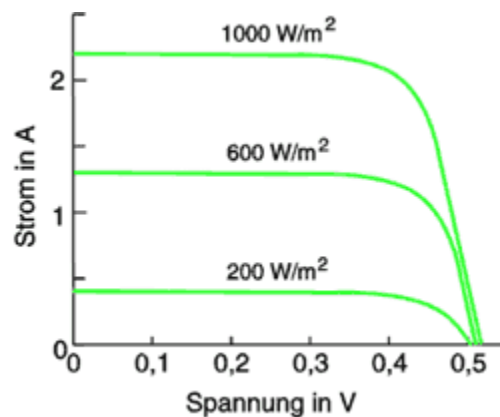
Abbreviation for kilowatt-peak, a measure of the [peak output](#) of a [photovoltaic](#) system, for example.

The electric characteristics of [Solar Cells](#), and therefore of the entire [Generator](#), vary with respect to various general conditions, especially the radiation intensity. In [Photovoltaics](#), the maximum possible output of a solar generator operating under standard conditions is defined as its peak output, which is measured in watts or kilowatts and stated as either **Wp** (watt,

peak) or **kWp**, respectively.

An optimal Solar Radiation of  $1000 \text{ W / m}^2$  is defined as the standard condition, and it can be reached early afternoon on a sunny summer day (however, the mean output over the period of a year is only about one tenth of the peak output due to night-time and less than optimal day-time sun conditions). The peak output is so based on measurements under optimal conditions, and, specifically, the peak output (some Manufacturers also designate this as the nominal or rated value: rated power, rated output, nominal power, nominal output) results from the product of the nominal voltage and the nominal current.

More enlightening information over the properties of solar cells or generators can be found on the current/voltage curve at the right. When planning a photovoltaic system, its Performance Ratio (conversion Efficiency) is important as it describes which part of the radiation energy is converted into useable electric current.



Current/Voltage curve of a solar cell (current in A; voltage in V).

Source : <http://www.solarserver.com/knowledge/lexicon/k/kwp.html>

## Module solaire photovoltaïque – Un article de Wikipédia

Un **module solaire photovoltaïque** (ou *panneau solaire photovoltaïque*) est un générateur électrique de courant continu constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques reliées entre elles électriquement, qui sert de module de base pour les installations photovoltaïques et notamment les centrales solaires photovoltaïques .

### **Caractéristiques** [[modifier](#)]

Les panneaux sont généralement des parallélépipèdes rectangles rigides minces (quelques centimètres d'épaisseur), dont la longueur et la largeur sont de l'ordre du mètre, pour une surface de l'ordre du  $\text{m}^2$ , et une masse de l'ordre de la dizaine de kg. Divers éléments (branchements électriques, fixations, éventuel cadre pour assurer une étanchéité) sont inclus.

Il existe également des modules sous forme de membranes souples et résistantes, ainsi que des panneaux à concentration, plus complexes mais exploitant mieux l'élément le plus cher du panneau, la cellule photovoltaïque.

Leur rendement est un peu plus faible que celui des cellules qui les constituent, du fait des pertes électriques internes et des surfaces non couvertes, mais reste d'environ 10 à 15%. La puissance crête<sup>1</sup> d'un panneau photovoltaïque est de l'ordre de 100 à 200 watts par mètre carré (soit un rendement de 10 à 20%, les fabricants annonçant environ 15 % pour leurs meilleurs panneaux), ce qui donne une puissance crête de 50 à 250 W par panneau, selon ses caractéristiques, notamment sa taille. Cette puissance est livrée sous forme de courant.

[continu](#), ce qui est parfait pour un branchement sur une [batterie](#) et pour de nombreuses applications, mais implique une transformation en [courant alternatif](#) par un [onduleur](#) s'il s'agit de l'injecter dans un réseau de distribution. La [tension](#) délivrée dépend du type des panneaux et du branchement des cellules. Elle est de l'ordre de 10 à 100 volts.

Outre sa puissance et sa surface, un panneau a trois caractéristiques importantes :

- l'écart à la puissance nominale, de l'ordre de +/- 5%
- la variation de puissance avec la température (plus de détails dans le paragraphe "pertes de production")
- la stabilité dans le temps des performances (les fabricants garantissent généralement au moins 80% de la puissance de départ au bout de 20 à 25 ans)

Le prix pour de tels panneaux est d'environ 4 €/Wc (watt crête) (ce prix baisse régulièrement, la cible étant de 1 €/Wc, prix où l'énergie photovoltaïque devient compétitive avec les ressources fossiles<sup>2</sup>)

L'[énergie](#) réellement captée par un module dépend de la surface et de la puissance nominale du panneau mais aussi de l'[ensoleillement](#), variable selon la [latitude](#), la saison, l'heure de la journée, la météo, le masquage subi, etc. En Europe, chaque Wc permet la production d'environ 1kWh d'énergie sur l'année, le double dans des zones bien ensoleillées et avec un [héliostat](#).

Un module photovoltaïque ne génère aucun déchet en fonctionnement, son coût de démantèlement est très faible et ses coûts d'exploitation sont quasi nuls. Étanche, il peut servir de couverture à un [toit](#), sous réserve de bien maîtriser l'écoulement d'eau aux bords avec un montage adapté. La durée de vie d'un tel module est supérieure à 20 ans.

### **Technologie [[modifier](#)]**

---

Article détaillé : [Cellule photovoltaïque](#).

Ce sont les cellules à base de [silicium](#) qui sont actuellement les plus utilisées, les autres types étant encore soit en phase de recherche/développement, soit trop chers et réservés à des usages où leur prix n'est pas un obstacle. On distingue en outre, en fonction des [techniques](#) utilisées :

- [silicium monocristallin](#) : les capteurs photovoltaïques sont à base de [cristaux](#) de [silicium](#) encapsulés dans une enveloppe plastique.
- [silicium polycristallin](#) : Les capteurs photovoltaïques sont à base de [polycristaux](#) de silicium, notablement moins coûteux à fabriquer que le silicium monocristallin, mais qui ont aussi un rendement un peu plus faible. Ces polycristaux sont obtenus par [fusion](#) des rebuts du silicium de qualité électronique.
- [silicium amorphe](#): les panneaux « étalés » sont réalisés avec du silicium [amorphe](#) au fort pouvoir énergisant et présentés en bandes souples permettant une parfaite intégration architecturale.

La technologie évolue rapidement, le prix du kWc (kilo-watt crête) étant beaucoup plus important que le rendement du panneau : un rendement deux fois plus faible signifie seulement qu'il faudra équiper deux fois plus de surface pour collecter la même énergie, ce qui n'est gênant que si la surface disponible est limitée par rapport à la puissance nécessaire (sur un satellite, par exemple...). Par conséquent, si une nouvelle technique permettait de produire des panneaux de faible rendement, mais bon marché, elle aurait de bonnes chances de s'imposer. Le rendement reste néanmoins une composante du prix, ne serait-ce que pour les

frais de manutention et d'installation, d'autant plus faible que le module est petit et léger.

Certains des fabricants de modules solaires dans le monde sont les plus importants:

Sharp (JPN), Kyocera (JPN), Sunpower (USA), Sanyo (JPN), Cuantum Solar (SPA), Solon (GER)

### **Production et pertes [modifier]**

---

Les principales sources de pertes énergétiques sont :

- *Pertes par ombrage partiel* : l'environnement d'un module photovoltaïque peut inclure des arbres, montagnes, murs, bâtiments, etc. Il peut provoquer des ombrages sur le module ce qui affecte directement l'énergie collectée.
- *Pertes par ombrage total ( poussière ou saletés )* : leur dépôt occasionne une réduction du courant et de la tension produite par le générateur photovoltaïque.(~3-6%)<sup>3</sup>
- *Pertes par dispersion de puissance nominale* : les modules photovoltaïques issus du processus de fabrication industrielle ne sont pas tous identiques. Les fabricants garantissent des déviations inférieures de 3% à 10% autour de la puissance nominale.
- *Pertes de connexions* : La connexion entre modules de puissance légèrement différentes occasionne un fonctionnement à puissance légèrement réduite. Elles augmentent avec le nombre de modules en série et en parallèle.(~3%)
- *Pertes angulaires ou spectrales* : Les modules photovoltaïques sont spectralement sélectifs, la variation du spectre solaire affecte le courant généré par ceux-ci. Les pertes angulaires augmentent avec l'angle d'incidence des rayons et le degré de saleté de la surface.
- *Pertes par chutes ohmiques* : Les chutes ohmiques se caractérisent par les chutes de tensions dues au passage du courant dans un conducteur de matériau et de section donnés. Ces pertes peuvent être minimisées avec un dimensionnement correct de ces paramètres.
- *Pertes par température* : En général, les modules perdent 0,4 % par degré supérieur à sa température standard (25 °C en conditions standard de mesures STC). La température d'opération des modules dépend de l'irradiation incidente, la température ambiante et la vitesse du vent (5 % à 14 %).
- *Pertes par rendement DC/AC de l'onduleur* : l'onduleur peut se caractériser par une courbe de rendement en fonction de la puissance d'opération.(~6 %) <sup>4</sup>
- *Pertes par suivi du point de puissance maximum* : l'onduleur dispose d'un dispositif électronique qui calcule en temps réel le point de fonctionnement de puissance maximum (3 %).

L'analyse de 172 installations du programme pionnier en Europe « 1000 toits allemands » a montré des productions de 0,43 kWh/Wc/an à 0,875 kWh/Wc/an avec une moyenne de 0,68 kWh/Wc/an<sup>5</sup>. Une autre analyse de l'Agence Internationale de l'Energie (IEA) montre des valeurs typiques variant entre 0,7 kWh/Wc/an en Allemagne et en Hollande, 0,83 kWh/Wc en Suisse avec une dispersion considérable de 0,4-0,95 kWh/Wc (Allemagne) et 0,5-1,4 kWh/Wc (Suisse).<sup>6</sup>. En outre, des installations avec des caractéristiques similaires installées dans des endroits très proches l'un de l'autre peuvent conduire à des productions très éloignées.

En conclusion, les valeurs moyennes du coefficient de performance PR oscillent entre 0,7 et 0,75. L'analyse de l'Agence Internationale pour l'énergie montre que les PR varient considérablement de 0,25 à 0,9 avec une valeur moyenne de 0,72.

Les kWh/Wc produits par un dispositif photovoltaïque peuvent alors s'exprimer comme le produit de trois facteurs indépendants :

$$\frac{E_{AC}}{P^*} = \left( \frac{G_{def}}{G^*} \right) \times FO \times PR$$

$P^*$  : Puissance nominale produite en conditions STC (W).

$G_{def}$  : Irradiation annuelle effective incidente sur le module (kWh/m<sup>2</sup>).

$G^*$  : Irradiance STC (1 000 W/m<sup>2</sup>).

FO : Facteur prenant en compte les pertes par ombrage.<sup>7</sup>

A partir de là, il est possible d'estimer une productivité électrique annuelle. Les valeurs qui suivent sont indicatives et approximatives, car ce type de mesure est très sensible aux conditions et conventions adoptées : avec ou sans [héliostat](#), avec ou sans les pertes de l'onduleur, en moyenne sur une région ou sur un lieu-dit particulièrement propice, etc. en kWh/Wc/an<sup>8</sup> ; ici le coefficient de performance PR (*Performance Ratio*) adopté est de 0,75 et pour une surface inclinée optimalement.

- Sud de l'Allemagne : ~0,9
- Espagne : ~1,4
- Îles Canaries : ~2,0
- Île d'Hawaii : ~2,1
- Déserts (Sahara, Moyen-Orient, Australie, etc.) : ~2,3
- Maximum pratique terrestre : ~2,4 ([Désert d'Atacama](#), proche de l'équateur et particulièrement sec)

Toutefois, les valeurs réelles peuvent être bien plus faibles.

### **Applications** [[modifier](#)]

---

Les modules solaires photovoltaïques se sont d'abord développés dans des applications très variées non connectées au réseau électrique, soit parce qu'il n'y a aucun réseau disponible (satellites, mer, montagne, désert..), soit parce que le raccordement reviendrait trop cher par rapport à la puissance nécessaire (balises, [horodateur](#), abris-bus, téléphone mobile ...); dans ce cas, on utilise des appareils électriques adaptés au courant continu livrés par les modules.

Pour alimenter en électricité une habitation ou un réseau public de distribution, on intercale un onduleur qui transforme le courant continu en courant alternatif adapté aux appareils classiques. Plusieurs modules sont intégrés dans une [centrale solaire photovoltaïque](#) qui peut être soit un système photovoltaïque autonome soit un système photovoltaïque raccordé au réseau. Ce type d'application n'est rendue possible que par des subventions massives existant dans certains états, car l'énergie ainsi produite reste encore environ 10 fois plus chère que l'électricité nucléaire ou à partir d'hydrocarbures fossiles : la source solaire est certes gratuite, mais l'investissement requis est très élevé.

### **Économie** [[modifier](#)]

---

Les six plus grandes firmes fabriquant des cellules photovoltaïques se partagent 60 % du marché mondial. Il s'agit des sociétés japonaises [Sharp](#) et [Kyocera](#), des entreprises américaines [BP Solar](#) et [Astropower](#), de l'allemande [RWE Schott Solar](#) et du groupe irtalien [Kerself SpA](#). Le [Japon](#) produit près de la moitié des cellules photovoltaïques du monde, mais c'est en [Chine](#) que la grande majorité des panneaux sont assemblés.

Le Japon est lui-même un des plus grands consommateurs de panneaux solaires, mais largement dépassé par l'Allemagne<sup>2</sup>.

### **Prix des équipements (hors taxes) en 2010 d'une installation photovoltaïque** [[modifier](#)]

---

- Modules polycristallins (fabrication) : ~ 1,2 €/Wc

- Modules polycristallins (du grossiste au détaillant) : ~ 2 €/Wc (140 Wc/m<sup>2</sup>)
- Système d'intégration (du grossiste au détaillant) : ~ 0,55 €/Wc
- Onduleur pour injection réseau : ~ 0,5 €/Wc
- Coffrets électriques CC et CA : ~ 0,12 €/Wc
- Câbles électriques : ~ 0,075 €/Wc
- Main d'œuvre (pose des modules + onduleurs + coffrets) : ~ 0,55 €/Wc
- Installation photovoltaïque clé en main : de 4 €/Wc à 6 €/Wc

### **Prix du kWh** [[modifier](#)]

Article connexe : [Énergie solaire photovoltaïque#Prix du kWh](#).

Le prix du kWh produit par un équipement solaire, actualisé sur la durée de vie de l'équipement, peut s'estimer à partir de trois paramètres :

- le prix d'achat de l'équipement, en euros par W de [puissance crête](#)(Wc)
- la productivité (en kWh produit par Wc par an), en fonction de l'insolation du lieu
- la dépréciation annuelle du capital. Pour ce paramètre, on utilisera 10% (correspondant, par exemple, à des frais de fonctionnement et maintenance de 1%, une actualisation financière de 4%, et un amortissement du matériel sur 20 ans soit 5%).

On obtient alors une formule assez simple, puisque une installation qui aurait coûté 1 € par Wc et produisant 1 kWh par an et par Wc aurait alors un coût de base de 0,1 € par kWh<sup>9</sup>, le prix du kWh étant ensuite proportionnel au prix d'achat (e.g., le triple si l'installation a coûté 3 € par Wc) et inversement proportionnelle à la productivité (p.ex., la moitié si l'installation produit 2 kWh par Wc et par an, le double si elle ne produit que 0,5 kWh par Wc et par an).

Ainsi, en Belgique où on peut tabler sur une installation à 4 € par Wc (installation domestique) et une productivité de 0,9 kWh par Wc (Cf. supra), le kWh photovoltaïque revient à  $0,1 \times 4 / 0,9 = 0,44$  €. La même installation dans les meilleures conditions possibles (dans le désert d'Atacama) produirait un kWh à 0,17 €.

### **Prix de vente de l'électricité** [[modifier](#)]

En France, l'arrêté du 10 juillet 2006 fixe « les conditions d'achat de l'électricité produite par les installations utilisant l'énergie radiative du soleil »<sup>10</sup>. Le tarif (en centimes €/kWh hors TVA) est calculé à partir d'autres variables. L'article 2 donne les principales caractéristiques du contrat d'achat :

- nombre et type de générateurs ;
- puissances (puissance crête installée et puissance électrique active maximale de fourniture)
- productivité moyenne annuelle estimée ;
- fourniture moyenne annuelle estimée ;
- tension de livraison.

### **Comparaison du prix de l'électricité photovoltaïque avec le prix d'autres énergies** [[modifier](#)]

Article détaillé : [Énergie solaire photovoltaïque#Prix du kWh](#).

**Bilan énergétique (de la fabrication au recyclage)** [[modifier](#)]



D'après l'EPIA (Association Européenne de l'Industrie du Photovoltaïque), sous la latitude de Lyon, un panneau solaire restitue en deux ans et demi l'énergie qui a été nécessaire pour sa fabrication. Cette association a mis en place une organisation qui prépare le recyclage des panneaux en fin de vie : [pvcycle](#)

Les panneaux ayant une durée de vie supérieure à vingt-cinq ans, la plupart des panneaux installés maintenant ne seront pas recyclés avant 2035. On trouve des temps retours énergétiques entre 1,9 et 4,0 années <sup>11</sup>

### **Notes et références** [\[modifier\]](#)

---

- <sup>↑</sup> puissance sous un ensoleillement de 1000 W/m<sup>2</sup>, une température normalisée de 25 °C et une distribution spectrale AM 1,5 (conditions STC).
  - <sup>↑</sup> <sup>a</sup> et <sup>b</sup> [pdf] [le rapport Trends in photovoltaic applications \[archive\]](#), août 2008 et [pdf] [une présentation \(résumé\) de ce rapport \[archive\]](#)
  - <sup>↑</sup> Solar Energy Material Solar Cells (2001). Ruiz JM., Martin N.
  - <sup>↑</sup> Sistemas Fotovoltaicos (2005). Abella MA.
  - <sup>↑</sup> Performance of 172 grid connected PV plants in Northern Germany (Decker B, Jahn U 1994)
  - <sup>↑</sup> Analysis of Photovoltaic Systems. Rapport IEA-PVPS T2-01:2000 - Disponible sur : [\[1\] \[archive\]](#)
  - <sup>↑</sup> Radiación solar y dispositivos fotovoltaicos (2006) E.Lorenzo.
  - <sup>↑</sup> Voir par exemple [\[2\] \[archive\]](#) qui donne ce genre de résultat en tout point voulu.
  - <sup>↑</sup> la formule correspondante est usuelle, on la trouve notamment dans les tableurs sous le nom VPM (10%;X;1; ; ), X étant un nombre de période "grand" (X = 100 par exemple, soit un siècle ; le résultat ne varie plus si on prend X plus grand)
  - <sup>↑</sup> [Arrêté du 10 juillet 2006 fixant les conditions d'achat de l'électricité produite par les installations utilisant l'énergie radiative du soleil telles que visées au 3° de l'article 2 du décret n° 2000-1196 du 6 décembre 2000. \[archive\]](#)
  - <sup>↑</sup> D'autres info sur ce site : [bilan \[archive\]](#) sur [outilssolaires.com](#).

### **Voir aussi** [\[modifier\]](#)

---

#### **Liens internes** [\[modifier\]](#)

---

- [Cellule photovoltaïque](#)
- [Panneau solaire](#)
- [Panneau photovoltaïque à concentration](#)
- [Sphère de Dyson](#)

#### **Liens externes** [\[modifier\]](#)

---

- [Cours photovoltaïque](#) par GuidEnR, source d'informations techniques sur l'énergie photovoltaïque
- [Fiche technique sur le solaire photovoltaïque par l'association EDEN](#)
- [Site collectant les données de productions d'un grand nombre d'installation pour suivre l'évolution de leur production d'électricité au fil des ans](#)
- [Vidéo de fabrication de panneaux solaires photovoltaïques espagnols](#)

- **(en)** [iea-pvps.org](http://iea-pvps.org) groupe photovoltaïque de l'[agence internationale de l'énergie](#), et notamment [le rapport "Trends in photovoltaic applications" d'août 2008\[pdf\]](#) et [une présentation \(résumé\) de ce rapport\[pdf\]](#)

Source : [http://fr.wikipedia.org/wiki/Module\\_solaire\\_photovolta%C3%AFque](http://fr.wikipedia.org/wiki/Module_solaire_photovolta%C3%AFque)

**Photovoltaïque (énergie solaire)** – Extraits d'un article de Wikipédia

L'**énergie solaire photovoltaïque** est une [énergie électrique](#) produite à partir du [rayonnement solaire](#) qui fait partie des énergies renouvelables. La [cellule photovoltaïque](#) est un [composant électronique](#) qui est la base des installations produisant cette énergie. Elle fonctionne sur le principe de l'[effet photoélectrique](#). Plusieurs cellules sont reliées entre elles sur un [module solaire photovoltaïque](#), plusieurs modules sont regroupés pour former une installation solaire. Cette installation produit de l'électricité qui peut être consommée sur place ou alimenter un réseau de distribution.

Le terme *photovoltaïque* désigne selon le contexte le phénomène physique - l'effet photovoltaïque - ou la technique associée.

**Technique** [\[modifier\]](#)

Article détaillé : [cellule photovoltaïque](#).

Définition simplifiée : Énergie électrique fournie à partir du soleil. Le principe de l'obtention du courant par les [cellules photovoltaïques](#) s'appelle l'[effet photoélectrique](#). Ces cellules produisent du [courant continu](#) à partir du [rayonnement solaire](#). Ensuite l'utilisation de ce courant continu diffère d'une installation à l'autre, selon le but de celle-ci. On distingue principalement deux types d'utilisation, celui où l'installation photovoltaïque est connectée à un réseau de distribution d'électricité et celui où elle ne l'est pas.

Les installations non connectées peuvent directement consommer l'électricité produite. À petite échelle, c'est le cas des calculatrices solaires et autres gadgets, conçus pour fonctionner en présence de [lumière](#) naturelle ou artificielle (dans un logement ou un bureau). À plus grande échelle, des sites non raccordés au réseau électrique (en montagne, sur des îles ou des voiliers, un satellite...) sont alimentés de la sorte, avec des [batteries d'accumulateurs](#) pour disposer d'électricité au cours de périodes sans lumière (la nuit notamment).

Des installations photovoltaïques sont aussi connectées à un réseau de distribution. Sur les grands réseaux de distribution (Amérique du Nord, Europe, Japon...) des installations photovoltaïques produisent de l'électricité et l'injectent dans le réseau. Pour ce faire, ces installations sont munies d'[onduleurs](#) qui transforment le courant continu en courant alternatif aux caractéristiques du réseau (e.g. fréquence de 50 Hz en Europe ou 60 Hz en Amérique du Nord par exemple). Elles n'ont pas besoin d'installation de stockage (batteries), l'électricité est consommée à l'instant où elle est produite par les consommateurs les plus proches sur le réseau.

**Les différentes techniques de modules photovoltaïques** [\[modifier\]](#)

Il existe plusieurs techniques de modules solaires photovoltaïques :

- **Les modules solaires monocristallins** : ils possèdent un meilleur rendement au m<sup>2</sup>, et sont essentiellement utilisés lorsque les espaces sont restreints. Le coût, plus élevé que celui d'une autre installation de même puissance, contrarie le développement de cette technique.
- **Les modules solaires polycristallins** : actuellement c'est le meilleur rapport

qualité/prix et les plus utilisés. Ils ont un bon rendement et une bonne durée de vie (plus de 35 ans), et peuvent être fabriqués à partir de déchets de l'électronique.

- **Les modules solaires amorphes** : ces modules auront un bon avenir car ils peuvent être souples et ont une meilleure production par faible lumière. Le silicium amorphe possède un rendement divisé par deux par rapport à celui du cristallin, ce qui nécessite plus de surface pour la même puissance installée. Toutefois, le prix au m<sup>2</sup> installé est plus faible que pour des panneaux solaires composés de cellules<sup>1</sup>.
- **Les modules solaires en couche mince à base d'absorbeur CdTe** :
- **Les modules solaires en couche mince à base d'absorbeur CIGS** :

### **Influence de l'ensoleillement** [[modifier](#)]

---

Même si la [constante solaire](#) est de 1,367 kW/m<sup>2</sup><sup>note 1</sup>, les pertes de lumière lors de la traversée de l'atmosphère réduisent l'énergie reçue au sol à environ 1 kW/m<sup>2</sup> au midi vrai<sup>2</sup> : 1 m<sup>2</sup> de panneaux exposés en plein soleil reçoivent 1 kW (1 000 watts). C'est cette valeur qui est communément retenue pour les calculs, et en laboratoire pour déterminer le rendement d'une cellule ou d'un panneau solaire, c'est une source lumineuse artificielle de 1 kW/m<sup>2</sup> qui est utilisée. Au final, l'énergie qui arrive au sol dépend de la nébulosité, de l'inclinaison du soleil (et de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser) et donc de l'heure de la journée.

Au cours d'une journée, même sans nuage, la production électrique du panneau varie en permanence en fonction de la position du soleil et n'est à son maximum que pendant un bref passage au plein midi. Le « nombre d'heures d'équivalent plein soleil » (valeur qui concerne le producteur d'électricité photovoltaïque), est moindre que le nombre d'heures où le soleil a brillé (le nombre d'heures d'ensoleillement au sens de la météorologie<sup>3</sup>) dans la journée. La saison joue aussi, dans le même sens. Par exemple, la ville de Rouen est située sur la ligne des 1 750 heures d'ensoleillement par an, alors que le nombre d'heures d'équivalent plein soleil y est proche de 1 100 heures.

Alors que cette question peut être étudiée plus en détail sur le site de l'Institut de l'énergie solaire (INES), il faut aussi tenir compte de l'[albédo](#) du sol, c'est-à-dire de son pouvoir de réflexion de la lumière. Lorsqu'une installation est dans un environnement très réfléchissant (un paysage de neige par exemple), sa production augmente parce qu'elle récupère une petite partie de la lumière réfléchi par la neige alentour. Mais cette variable n'est pas facile à quantifier et se trouve, de fait, incluse dans le nombre d'heures d'équivalent plein soleil.

Avant de s'équiper en panneaux photovoltaïques, il est intéressant de savoir ce qu'on peut en tirer au lieu géographique concerné. L'information se trouve facilement sur internet, par exemple la Communauté Européenne a mis en ligne un logiciel gratuit [PV Estimation Utility](#). Selon cet outil, à [Liège](#) on peut obtenir 840 kWh/kWc/an, [Hambourg](#) 870, [Londres](#) 880, [Colmar](#) 940, [Rouen](#) 950, [Munich](#) 950, [Arca](#) [achon](#) 1 100, [Chamonix](#) 1 110, [La Rochelle](#) 1 140, [Agen](#) 1 150, [Montélimar](#) 1 280, [Perpignan](#) 1 290, [Héraklion](#) 1 310, [Madrid](#) 1 400, [Cannes](#) 1 465, [Séville](#) 1 470, [Malte](#) 1 480, [Faro](#) Portugal 1 550.

L'**énergie solaire photovoltaïque** est une [énergie électrique](#) produite à partir du [rayonnement solaire](#) qui fait partie des énergies renouvelables. La [cellule photovoltaïque](#) est un [composant électronique](#) qui est la base des installations produisant cette énergie. Elle fonctionne sur le principe de l'[effet photoélectrique](#). Plusieurs cellules sont reliées entre elles sur un [module solaire photovoltaïque](#), plusieurs modules sont regroupés pour former une installation solaire. Cette installation produit de l'électricité qui peut être consommée sur place ou alimenter un réseau de distribution.

Le terme **photovoltaïque** désigne selon le contexte le phénomène physique - l'effet photovoltaïque - ou la technique associée.

Article complet à découvrir sur le site suivant [http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie\\_solaire\\_photovolta%C3%AFque](http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_solaire_photovolta%C3%AFque)

## Quelques photos extraites du site en anglais Photovoltaics

From Wikipedia, the free encyclopedia

**[Nellis Solar Power Plant](#) at Nellis Air Force Base in the USA. These panels track the sun in one axis.**

## Photovoltaic system 'tree' in Styria, Austria

World's largest photovoltaic power stations (50 MW or larger)<sup>[41]</sup>

PV power station <sup>ⓘ</sup>	Country <sup>ⓘ</sup>	DC peak power (MW <sub>p</sub> ) <sup>ⓘ</sup>	Notes <sup>ⓘ</sup>
<a href="#">Sarnia Photovoltaic Power Plant</a> <sup>[42]</sup>	<a href="#">Canada</a>	97 <sup>[41]</sup>	Constructed 2009-2010 <sup>[43]</sup>
<a href="#">Montalto di Castro Photovoltaic Power Station</a> <sup>[41]</sup>	Italy	84.2	Constructed 2009-2010
<a href="#">Finsterwalde Solar Park</a> <sup>[44][45]</sup>	<a href="#">Germany</a>	80.7	Phase I completed 2009, phase II and III 2010
<a href="#">Rovigo Photovoltaic Power Plant</a> <sup>[46][47]</sup>	<a href="#">Italy</a>	70	Completed November 2010
<a href="#">Olmedilla Photovoltaic Park</a>	<a href="#">Spain</a>	60	Completed September 2008
<a href="#">Strasskirchen Solar Park</a>	<a href="#">Germany</a>	54	
<a href="#">Lieberose Photovoltaic Park</a> <sup>[48][49]</sup>	<a href="#">Germany</a>	53	Completed in 2009
<a href="#">Puertollano Photovoltaic Park</a>	<a href="#">Spain</a>	50	231,653 crystalline silicon modules, Suntech and Solaria, opened 2008

[Topaz Solar Farm](#) is a proposed 550 MW [solar](#)

## Photovoltaic solar panels on a house roof

### Solar parking meter.

Source : <http://en.wikipedia.org/wiki/Photovoltaics>

## Pouvoir de réchauffement global / PRG

---

### Définition

Le potentiel ou pouvoir de réchauffement global (PRG) est un indicateur qui vise à regrouper

sous une seule valeur l'effet additionné de toutes les substances contribuant à l'accroissement de l'effet de serre.

Conventionnellement, on se limite pour l'instant aux **gaz à effet de serre (GES)** directs c'est à dire aux six gaz pris en compte dans le **protocole de Kyoto**.

Cet indicateur est exprimé en "équivalent CO<sub>2</sub>" du fait que, par définition, l'effet de serre attribué au CO<sub>2</sub> est fixé à 1 et celui des autres substances relativement au CO<sub>2</sub>.

Source : institut français de l'environnement (site : <http://www.ifen.fr>) - Via <http://www.insee.fr/fr/methodes/default.asp?page=definitions/pouvoir-rechauffement-global.htm>

**Pouvoir de Réchauffement Global - PRG** - Selon le CITEPA - Avril 2010

Cet indicateur vise à regrouper sous une seule valeur l'effet additionné de toutes les substances contribuant à l'accroissement de l'effet de serre. Conventionnellement, on se limite pour l'instant aux gaz à effet de serre direct et plus particulièrement aux six gaz pris en compte dans le protocole de Kyoto, à savoir le CO<sub>2</sub>, le CH<sub>4</sub>, le N<sub>2</sub>O, les HFC, les PFC et le SF<sub>6</sub>.

Cet indicateur est exprimé en " équivalent CO<sub>2</sub> " du fait que par définition l'effet de serre attribué au CO<sub>2</sub> est fixé à 1 et celui des autres substances relativement au CO<sub>2</sub>. Cette façon d'exprimer le PRG (Pouvoir de Réchauffement Global) est source de confusion pour certaines personnes non averties qui rencontrent des données de ce type ou des données relatives au seul CO<sub>2</sub>.

L'indicateur est calculé sur la base d'un horizon fixé à 100 ans afin de tenir compte de la durée de séjour des différentes substances dans l'atmosphère.

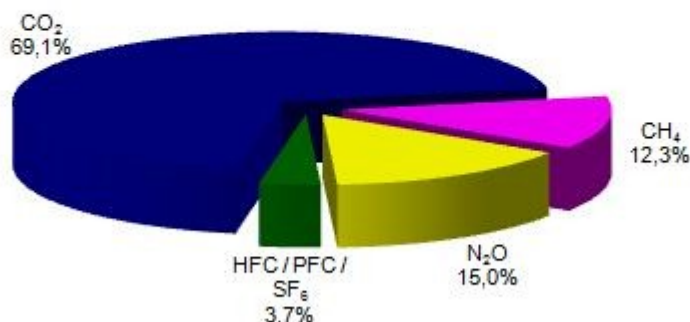
Les PRG de ces différents gaz tels que définis par le GIEC sont ceux de 1995 selon les décisions prises à ce jour par la Conférence des Parties :

- CO<sub>2</sub> = 1
- CH<sub>4</sub> = 21
- N<sub>2</sub>O = 310
- HFC = variables de 140 à 11 700 selon les molécules considérées (valeur pondérée 5 167 en 1990, 7 167 en 1993 et de 1 693 en 2008)
- PFC = variables de 6 500 à 9 200 selon les molécules considérées (valeur pondérée 7 287 en 1990, 7 469 en 1994 et de 7 178 en 2008)
- SF<sub>6</sub> = 23 900

Les contributions des différents gaz dans cet indicateur sont présentées ci-après et très différentes, le CO<sub>2</sub> dominant largement pour environ les deux tiers.

**PRG**

**Contribution des différents gaz à effet de serre au PRG avec UTCF en France métropolitaine pour l'année 2008**  
en %



CITEPA / format SECTEN - avril 2010

Emi\_indic-d/serre.xls

Période d'observation : depuis 1990

### Emissions (avec UTCF\*)

Emissions en 2008 : 443 Mt CO<sub>2</sub>e

Maximum observé : 548 Mt CO<sub>2</sub>e en 1991

Minimum observé : 443 Mt CO<sub>2</sub>e en 2008

### Evolutions

Evolution 2008 / 1990 : -15 %

Evolution 2008 / maximum : -19 %

Evolution 2008 / minimum : 0 %

### Sous-secteurs prépondérants en 2008 (cinq premiers des émissions totales hors UTCF\*) :

- 1 - Résidentiel 12 %
- 2 - Cultures 10 %
- 3 - Elevage 9,3 %
- 4 - Poids lourds diesel 6,9 %
- 5 - Tertiaire, commercial et institutionnel 6,7 %

### Commentaires

En 2008, le Pouvoir de Réchauffement Global (PRG) relatif à la France métropolitaine est estimé à 443 Mt CO<sub>2</sub>e avec UTCF et à 516 Mt CO<sub>2</sub>e hors UTCF.

Tous les secteurs contribuent aux émissions de gaz à effet de serre, qui sont par ordre de prédominance en 2008 :

- le transport routier avec 23,6% du total hors UTCF, du fait du CO<sub>2</sub> essentiellement,
- l'industrie manufacturière avec 21,8%, du fait d'émissions de chacune des six substances contribuant au PRG,
- l'agriculture/sylviculture avec 21,0%, du fait des deux polluants N<sub>2</sub>O et CH<sub>4</sub>,
- le résidentiel/tertiaire avec 19,2%, du fait d'émissions de chacune des six substances contribuant au PRG,
- la transformation d'énergie avec 12,6%, du fait principalement du CO<sub>2</sub>,
- les autres transports (hors transport routier) avec 1,8%, du fait du CO<sub>2</sub> essentiellement.

Sur la période 1990-2008, le PRG hors UTCF a diminué de 7,3%, soit une baisse de 40,8 Mt CO<sub>2</sub>e. En incluant l'UTCF, cette baisse représente 14,9%, soit -77,7 Mt CO<sub>2</sub>e.

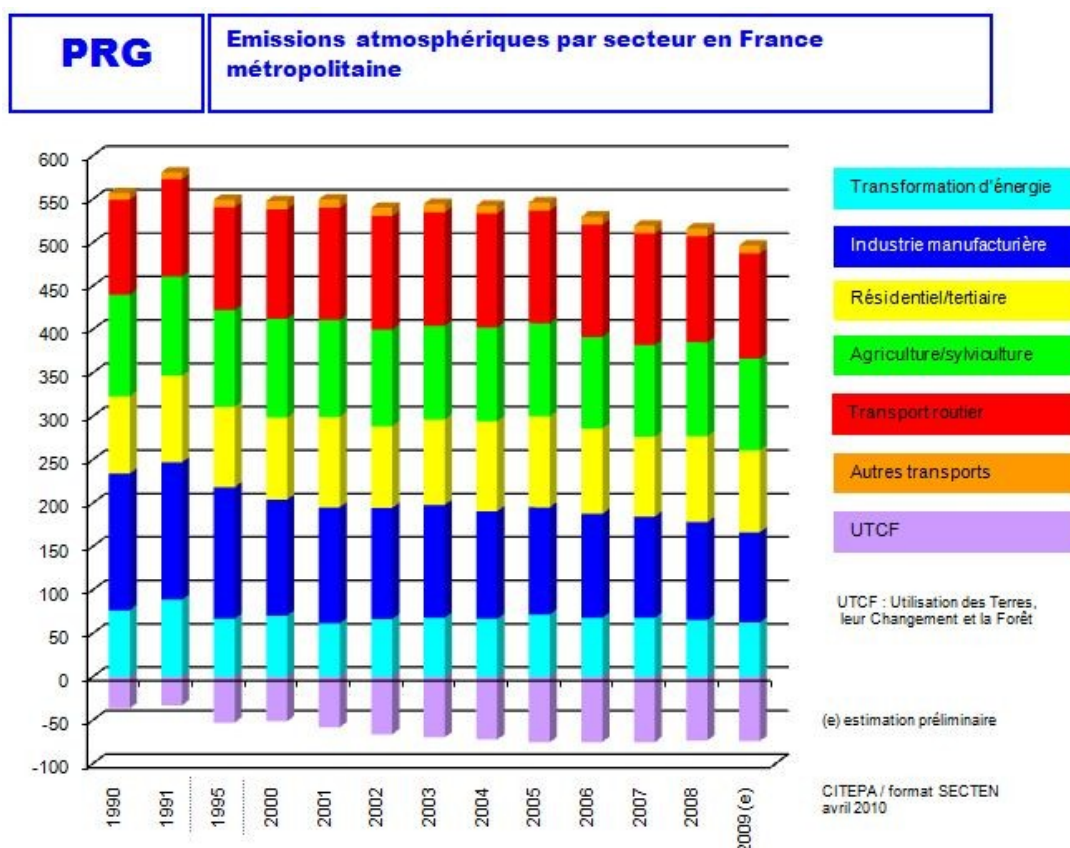
En termes de contribution, le CO<sub>2</sub> participe à hauteur de 69,1% aux émissions de gaz à effet de serre (UTCF inclus). Les autres polluants ont une contribution plus restreinte (le N<sub>2</sub>O : 15,0% ; le CH<sub>4</sub> : 12,3% ; la somme des HFC/PFC/SF<sub>6</sub> : 3,7%).

En termes d'évolution relative (en PRG) depuis 1990, l'augmentation des émissions de HFC est la plus importante (+305 %).

## Note

Le présent total diffère du périmètre de la CCNUCC (Métropole et Outre-mer y compris Pays et Territoires d'Outre-mer (PTOM)) et de celui du Protocole de Kyoto (Métropole et Outre-mer hors PTOM) du fait du périmètre géographique considéré (Métropole seulement).

Cf section "Analyse complémentaire - 7 Emissions de l'Outre-mer" pour plus de détail sur les îles prises en compte



Source : [http://www.citepa.org/emissions/nationale/Ges/ges\\_prg.htm](http://www.citepa.org/emissions/nationale/Ges/ges_prg.htm)

## Puissance nominale

« La puissance nominale est la puissance consommée par l'appareil en fonctionnement normal. Un appareil fonctionne normalement si la puissance qu'il reçoit est égale à sa puissance

nominale ».

<http://www.intellego.fr/soutien-scolaire-3eme/aide-scolaire-physique/puissance-nominale/29811>  
« La puissance nominale est la puissance maximale fournie d'une cellule ou d'un panneau photovoltaïque. La puissance nominale est définie comme la puissance crête au point de puissance maximale ».

<http://www.bati-depot.fr/photovoltaique/definition/puissance-nominale-787.html>

Rappels- **La puissance et la puissance nominale**

### **1) Rappels : la tension et l'intensité nominale**

La tension et l'intensité nominales sont la tension et l'intensité reçues par un appareil quand il fonctionne dans des conditions normales. Quand un appareil est soumis à sa tension nominale, l'intensité est aussi nominale (et réciproquement).

### **2) L'unité de la puissance**

La puissance est une autre grandeur utilisée en électricité  
Elle se note P et son 'unité est le watt (W)

On utilise aussi les unités dérivées:

- le kilowatt (kW):  $1 \text{ kW} = 1000 \text{ W}$
- le megawatt (MW):  $1 \text{ MW} = 1\,000\,000 \text{ W}$
- le gigawatt (GW):  $1 \text{ GW} = 1\,000\,000\,000 \text{ W}$
- etc

Un dipole ou un appareil électrique est caractérisé également par sa puissance nominale.

### **3) Relation entre énergie et puissance**

Définition: la puissance correspond à l'énergie échangée (reçue ou donnée) pendant une seconde. La puissance traduit donc la vitesse et l'importance avec laquelle une énergie est transférée ou convertie.

### **4) Signification de la puissance nominale**

Plus un dipole a une puissance nominale élevée, plus son action est efficace.

Plus la puissance nominale est élevée:

- Plus l'éclat d'une lampe est fort.
- Plus l'aspiration d'un aspirateur est forte.
- Plus le son produit des enceintes peut être fort, etc...

Exemples de puissances nominales : téléviseur plasma : 200 W ; fer à repasser 1 kW ; lave linge 2 kW ; un four : 3 kW.

Si la puissance électrique fournie à un appareil est inférieure à sa puissance nominale, alors son efficacité est inférieure à celle prévue.

Si la puissance électrique fournie à un appareil est supérieure à sa puissance nominale, alors son efficacité est supérieure à celle prévue mais la détérioration risque d'intervenir plus rapidement.

Source : [http://physique-chimie-college.fr/cours-electricite-3eme/ce3\\_41-puissance-nominale.html](http://physique-chimie-college.fr/cours-electricite-3eme/ce3_41-puissance-nominale.html).

## **Solaire photovoltaïque – Situation actuelle et objectifs**

Selon l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie -



Les systèmes photovoltaïques utilisent l'énergie la mieux répartie dans le monde : la lumière du soleil. En France, actuellement, des milliers de réalisations ont mis en valeur les qualités de l'électricité solaire photovoltaïque: sa fiabilité, son autonomie, son influence faible sur l'environnement et sa plus value en tant que composant de construction. Plus de 10 000 foyers bénéficient de l'électricité photovoltaïque en France. Plus de 7000 foyers éloignés du réseau n'ont accès à l'électricité que par le biais de cette technologie et plus de 3 000 particuliers raccordés au réseau vendent leur production d'électricité à EDF.

- **Etat du marché**

Historiquement, le marché photovoltaïque français était un marché orienté vers les applications photovoltaïque en sites isolés. C'est à partir de 1999 grâce à l'implication des acteurs français du photovoltaïque et de l'ADEME au sein du projet européen HIP HIP que le marché français s'est réorienté vers les applications dites raccordé réseau. Même si aujourd'hui les applications en sites isolés représentent toujours la majorité du parc français installé (Figure 1), le volume annuel financé en photovoltaïque raccordé au réseau a été au moins 10 fois plus important que celui installé en sites isolés en 2005 (Figure 2). Pour la première fois en 2005, la puissance cumulée des applications photovoltaïques raccordées au réseau installée en France est plus importante que celle des sites isolés.

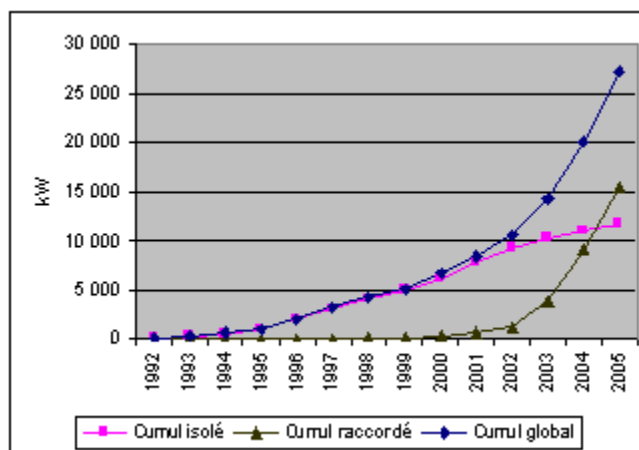


Figure 1 - Puissance photovoltaïque cumulée financée par type d'application et au global sur le marché français

Le décollage du marché du photovoltaïque raccordé au réseau en France est remarquablement rapide (Figure 2), mais concerne des volumes faibles par rapport à nos voisins européens (environ 100 fois moins qu'en Allemagne).

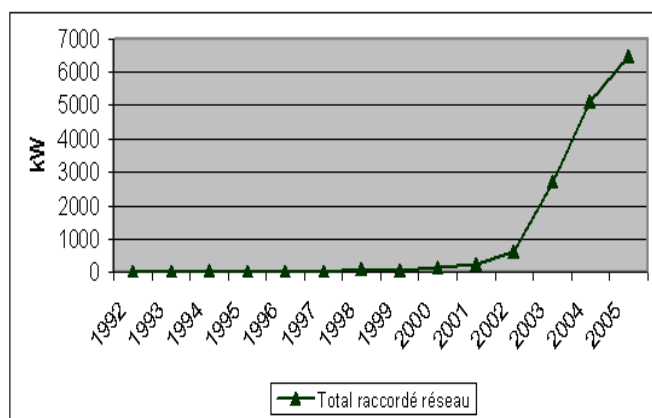


Figure 2 - Puissance photovoltaïque raccordé réseau financée annuellement sur le marché français

### DOM-TOM

Environ la moitié de la puissance financée jusqu'à présent l'a été dans 3 DOM (les TOM, la Corse et la Guyane ayant des volumes marginaux à l'intérieur de ce programme). Ceci est dû à l'efficacité des mécanismes de défiscalisation mis en place, à un tarif d'achat de l'électricité d'origine photovoltaïque 2 fois plus élevé qu'en France continentale, mais aussi à une volonté de l'ADEME et de ses partenaires locaux de concentrer l'installation de générateurs photovoltaïques dans les zones où les coûts de production de l'électricité sont les plus élevés (Tableau 1). Ainsi 3 régions d'outre mer (Martinique, Guadeloupe et Guyane) concentrent plus de puissance installée que les 22 régions de France continentale (8,3 MW contre 7,2 MW).

#### 2006: Un tarif d'achat attractif

La revalorisation du tarif français qui a été actée dans l'arrêté paru au 10 juillet 2006 (voir tableau 1) positionne clairement la France au côté des 3 marchés majeurs en Europe (Allemagne, Italie, Espagne).

Tableau 1 - Tarif d'achat de l'électricité photovoltaïque en France

	Metropole	DOM/Corse/Mayotte/St Pierre
Tarif de base	30 c€/kWh	40 c€/kWh
Prime à l'intégration	25 c€/kWh	15 c€/kWh
Tarif intégré au bâti	55 c€/kWh	55 c€/kWh

Ce tarif qui donne une forte prime à l'intégration au bâtiment ne devrait pas permettre une explosion du marché comme en Allemagne, mais plutôt une croissance robuste et durable du marché français sur un segment (l'intégration "bâti") jusqu'alors peu développé en Europe et qui est fortement créateur de valeur.

- **Perspectives**

Au 31 Novembre 2006, les principales tendances concernant le marché photovoltaïque en France sont :

- une forte augmentation des volumes sur l'ensemble du marché français du PV raccordé au réseau (au moins 12 MW financés),
- une baisse des prix de vente dû à l'accroissement de l'offre concurrentielle

Cependant, même si la profession est hautement satisfaite de l'évolution tarifaire récente, une plus forte implication de l'industrie du bâtiment vers le photovoltaïque est nécessaire afin d'élargir la gamme de produits d'intégration au bâti nécessaire à la popularisation de cette technologie

Source : <http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=13921>

## **Tellure de cadmium** - Extrait d'un article de Wikipédia

Le **tellure de cadmium** (ou « **CdTe** ») est un matériau cristallin à structure cubique (de [groupe d'espace F43m](#)) composé de [cadmium](#) et de [tellure](#).

Il s'agit d'un [semi-conducteur](#) de la famille des II-VI. Le tellure de cadmium est disponible commercialement sous forme de poudre ou sous forme de cristaux.

### **Usages** [[modifier](#)]

---

Le CdTe est utilisé pour de nombreuses applications, dont :

\* les [cellules photovoltaïques](#) à couches minces (construites sur le principe de la [PIN](#); développées depuis les années 60, ce type de cellule présente des avantages (prix inférieur) et des inconvénients (rendement inférieur) par rapport aux cellules à base de silicium<sup>3</sup>

\* l'[optique](#) (pour ses propriétés dans l'[infrarouge](#) notamment) ;

- les [systèmes de détection](#) infrarouge (HgCdTe) ;
- la détection de [rayonnement ionisants](#) (CdTe:Cl, CdZnTe) ;
- [modulateurs électro-optique](#) ;
- [Cellules photovoltaïques](#) (associé éventuellement à un film de [sulfure de cadmium](#) ;

\* les « étiquettes moléculaires » en biologie médicale :

Des nanoparticules [fluorescentes](#) constituées de semi-conducteurs à base de cadmium brillent lorsqu'elles sont frappées par une certaine lumière. Elles sont en train de devenir un outil standard de laboratoire pour étudier le comportement moléculaire de cellules vivantes ou marquer certaines cellules.

La luminosité de leur fluorescence, leur stabilité et la facilité avec laquelle on peut les modifier chimiquement ont aussi incité les chercheurs à explorer leur usage comme agents d'imagerie médicale et pour désigner des tumeurs<sup>4</sup>. Par exemple, un nano-polymère de tellure de cadmium recouvert de sulfure de zinc (CdTe/ZnS) sur lequel sont greffées des copies d'une petite protéine se liant à des protéines caractéristiques des nouveaux vaisseaux sanguins qui alimentent les tumeurs (vaisseaux qui se forment en réponse aux signaux des cellules tumorales) pourraient servir à détecter plus précocement certaines tumeurs et cancers. Ils pourraient aussi permettre aux chirurgiens de bien mieux distinguer (en fluorescence) les bords de la tumeur lors de la chirurgie (délimitation effective environ 20 min après injection chez la souris, en laboratoire)<sup>5</sup>. Reste à vérifier que ces nanopolymères n'ont pas d'effets dans d'autres parties de l'organisme, car le cadmium qu'il contient est a priori un puissant toxique à échelle nanométrique ; Les chercheurs les ont modifiés en les recouvrant d'autres molécules [biocompatibles](#), mais que deviennent ces molécules dans l'organisme ? D'après des

travaux récents, les chimistes devraient mieux s'assurer que ces « revêtements » ne se dégradent pas ni ne puissent libérer leur cadmium dans l'organisme, et surtout après qu'ils ont été excrétés par le corps. Plusieurs études ont montré, par exemple, que les nanoparticules persistent chez la souris durant au moins quatre mois après l'administration... Des produits de ce type pourraient à l'avenir s'ajouter aux nombreux résidus de médicament et de produits à usage médicaux excrétés par les patients traités ou testés dans les hôpitaux (hormones, radiotraceurs, antibiotiques, molécules anticancéreuses, etc.)<sup>4</sup>.

### **Le CdTe et la production de cellules photovoltaïques [modifier]**

---

Panneau photovoltaïque en tellure de cadmium (© NREL).

Depuis quelques années, pour produire un [panneau photovoltaïque](#), un nombre croissant d'entreprises recourent au tellure de cadmium en tant que composé semi-conducteur, à la place du [silicium](#).

C'est en effet un produit très stable. Il accroît le rendement des panneaux, tout en diminuant leur coût, grâce à une meilleure capacité d'absorption de la lumière (maintien d'une bonne performance en cas de faible luminosité, le matin et en soirée notamment) et à un [coefficient thermique](#).

Une couche d'absorption en tellure de cadmium est ainsi placée sur un support de [verre](#) puis couverte par une autre plaque de verre qui scelle hermétiquement le panneau.

Les modes de production et d'utilisation du CdTe ont permis de réduire l'[empreinte carbone](#) des technologies de production de cellules et panneaux photovoltaïques. Dans le domaine des panneaux photovoltaïques, c'est la technique qui a l'empreinte carbone la plus basse pour le [cycle de vie](#)<sup>6</sup>. Ce produit, en tant que dérivé du cadmium, est toxique.

En cas d'incendie et de fusion des panneaux, grâce au fait que le film de tellure de cadmium est placé entre deux couches de verre, grâce à une [pression de vapeur](#) très basse, et grâce à des points d'ébullition et de fusion élevés, les molécules toxiques risquent peu de contaminer l'environnement, et restent piégées dans la matrice de verre fondu <sup>7</sup>, mais le tellure de cadmium, en raison d'une toxicité intrinsèque nécessite néanmoins - en amont et aval de la filière - d'être produit, utilisé et recyclé avec précaution.

Il est récupérable et recyclable, les fières de récupération et recyclage apparaissent dans les années 2000, avec par exemple celle de First Solar annonçait dès 2008 recycler 90 % (en masse) des déchets de fabrication des modules, mais aussi des modules retournés (sous garantie) .....

### **Toxicité du tellure de cadmium [modifier]**

---

Tous les composés du cadmium sont *a priori* supposés toxiques. Ils peuvent l'être plus ou moins que le cadmium seul, selon les propriétés de la molécule, et selon le contexte..

Les données sur la toxicité du CdTe manquant, les autorités et organismes chargés de la réglementation dans les différents pays où ils existent se sont d'abord référés à la toxicité du cadmium (Cd) comme approximation car la toxicité spécifique du tellure est restée longtemps mal connue, jusqu'à ce qu'un usage accru de ce produit, pour les panneaux solaires notamment, fasse s'y intéresser les toxicologues (d'autant que c'est l'un des nombreux produits qui pourraient aussi bientôt être produits sous forme de nanoparticules).

Plus, récemment une étude a comparé la toxicité du CdTe à celle du cadmium (chez le rat, en suivant une méthode standardisée et recommandée par l'OCDE et l'[Environmental Protection Agency](#)) pour mesurer les effets d'un produit sur la santé. La concentration létale de CdTe trouvée était de 2,71 mg·l<sup>-1</sup>, avec une très faible variabilité entre les sexes. La dose létale moyenne attendue était supérieure à 2 000 mg·kg<sup>-1</sup>. Ces résultats, selon leurs auteurs,

montrent clairement que CdTe est moins toxique que le cadmium, au moins en termes d'exposition aiguë <sup>10</sup>.

Le tellure de cadmium est **toxique** s'il est injecté ou ingéré (notamment à cause des acides stomacaux qui libèrent le cadmium en le rendant probablement plus bioassimilable et du tellure d'hydrogène (qui ne semble pas toxique<sup>11</sup>) ou s'il est inhalé sous forme de poussière fine ou de nanoparticules pures (il est alors clairement **cytotoxique** <sup>12</sup>), ou s'il n'est pas manipulé correctement (c'est-à-dire sans gants appropriés et autres mesures de sécurité).

De nouveaux problèmes pourraient être posés, s'il advenait que du Tellure de Cadmium soit diffusé dans l'environnement sous forme non inertée de micropoudre ou de nanoparticules. En effet, aux échelles **nanométriques**, la toxicité ou l'écotoxicité d'un matériau peut souvent être très exacerbée. (Cela semble être le cas pour de nombreux métaux et d'autres molécules ne posant pas de problème sous leur forme « massive », dont l'or et l'argent par exemple). Le CdTe pourrait alors être un polluant potentiel de l'air, mais aussi de l'eau où en laboratoire et sous forme de nanopoudre (particules d'environ 5 nanomètres) longuement mixée dans l'eau, il adopte un comportement différent d'autres métaux ou alliages testés <sup>13</sup>.

Une fois correctement inerté (dans une matrice ou encapsulé ou couvert d'un coating moléculaire s'il s'agit de nanoparticules) et tant qu'il y reste, le CdTe utilisé dans les procédés de fabrication ou médicaux <sup>12</sup>est supposé inoffensif. Cependant, on ignore ce qu'il devient à moyen et long terme dans l'environnement s'il y est perdu. Et en amont des filières de fabrication, quand il est utilisé sous forme de micro-cristaux, poudre ou nanoparticules, il doit être manipulé avec toutes les précautions possibles.

Des études récentes confirment que la surface proportionnellement beaucoup plus réactive du tellure de cadmium pur, quand il est présent sous forme de nanoparticule, le rend plus toxique (phénomène fréquent pour la plupart des nanoparticules).

Sa taille minuscule lui donne alors un comportement proche de ceux des gaz. Il peut alors facilement pénétrer les organismes et y produire d'importants dégâts (par des espèces réactives de l'oxygène) aux cellules <sup>4</sup> ; ajouté sous forme de nanoparticules de CdTe pur, à des cultures de cellules humaines de cancer du sein, il déclenche d'importants dommages aux membranes cellulaires, aux mitochondries et aux noyaux cellulaires. Et le métabolisme cellulaire diminuait proportionnellement au nombre de nanoparticules ayant pénétré les cellules <sup>4</sup>, alors que cette diminution n'était pas corrélée avec le nombre d'ions Cd++ présents dans la cellule <sup>14</sup> .

La nature des dommages observés ne pouvait pas uniquement être expliquée par la seule toxicité chimique intrinsèque du cadmium, dont on pouvait néanmoins légitimement craindre que, sous forme d'ions Cd++ possiblement relargués par les nanoparticules CdTe, il ait des effets délétères sur la cellule. Mais *in vitro*, seuls les dégâts aux **lysosomes** (visibles en microscopie) pouvaient être induits par les ions Cd++ (ainsi que par des espèces réactives de l'oxygène). L'observation des cellules et de leur métabolisme évoquait plutôt un fort **stress oxydatif** pouvant être induit par la surface hautement réactive des nanoparticules de CdTe. Pour tester cette hypothèse, on a ajouté un puissant antioxydant aux cultures cellulaires ; et en effet, cet antioxydant a alors empêché tous les dommages cellulaires observés dans la première série d'expériences. La combinaison de ces deux phénomènes peut en tous cas, *in vitro*, conduire à la mort des cellules<sup>4,15</sup>

Des films très fins de tellure de cadmium pourraient dans certaines conditions recristalliser en un autre composé toxique du cadmium (**chlorure de cadmium**).

## **Ecotoxicité [modifier]**

---

Elle commence à peine à être explorée, mais on a récemment montré au Canada que la grande moule d'eau douce *Elliptio complanata* exposées à des nanoparticules de CdTe peuvent bioaccumuler ces molécules <sup>16</sup>. Dans cette expérience, 14% du Cd initialement introduit sous forme de CdTe a été retrouvé en phase dissoute <sup>16</sup>, ce qui montre que le CdTe est moins stable dans l'eau qu'on ne le pensait. Le CdTe s'est montré aussi bioaccumulable par cette moule que le Cd sous forme ionique. On l'a retrouvé essentiellement dans les branchies et la glande digestive et les taux de métallothionéine (MT, la protéine qui capte les métaux dans les phénomènes naturels de détoxification chez de nombreuses espèces). Chez cette espèce, la toxicité du CdTe a été comparée à celle du Cd sous forme CdSO<sub>4</sub>.

## **Gestion du risque [modifier]**

---

L'un des secteurs utilisant le plus de CdTe est celui de la production de panneaux solaires. La gestion et élimination en toute sécurité à long terme du tellure de cadmium est un problème connu dans la commercialisation à grande échelle de tellure de cadmium et dans ce secteur en particulier. Selon les producteurs et gros utilisateurs, de sérieux efforts ont été faits pour comprendre et surmonter ces problèmes. Dès 2003, un document publié par le US National Institutes of Health <sup>17</sup> incluait le CdTe dans le programme de toxicologie nationale des États-Unis (NTP ; National Toxicology Program), en collaboration avec First Solar Inc., l'une des entreprises productrices de panneaux comptant parmi les plus grands utilisateurs de CdTe, ceci avec le soutien du ministère chargé de l'énergie et du National Renewable Energy Laboratory (NREL). Les chercheurs du laboratoire national de Brookhaven (Brookhaven National Laboratory ou BNL) ont conclu que l'usage à grande échelle des panneaux solaires en contenant ne présentait pas de risques pour la santé et l'environnement et que le recyclage des modules en fin de vie utile résorberait complètement les préoccupations environnementales. Au cours de leur fonctionnement, ces modules ne produisent pas de polluants, et, en outre, en remplaçant des combustibles fossiles ou d'autres sources moins propres et sûres, ils offrent d'importants avantages environnementaux. Les cellules photovoltaïques de ce type semblent même être le plus écologique de tous les usages actuels et connus du cadmium <sup>18</sup>.

L'Union européenne et la Chine sont encore plus prudentes avec le cadmium. L'Europe considère le cadmium et tous ses composés comme cancérigènes toxiques et les règlements en vigueur en Chine ne permettent de produire du Cd que pour l'exportation <sup>19,20</sup>.

Article complet à lire sur le site [http://fr.wikipedia.org/wiki/Tellure\\_de\\_cadmium](http://fr.wikipedia.org/wiki/Tellure_de_cadmium)

## **Traduction, définitions et compléments :**

Jacques Hallard, Ing. CNAM, consultant indépendant.

Relecture et corrections : Christiane Hallard-Lauffenburger, professeur des écoles honoraire.

Adresse : 19 Chemin du Malpas 13940 Mollégès France

Courriel : [jacques.hallard921@orange.fr](mailto:jacques.hallard921@orange.fr)

Fichier : ISIS Energie solaire *Photovoltaïque How Green is Solar ?* French version.2

---