

# LE PHOTOVOLTAÏQUE EN FRANCE

ENERGIE, RISQUES, ENVIRONNEMENT, TECHNOLOGIES, INVESTISSEMENT



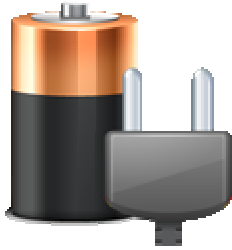
Septembre 2010

<b>I. PHOTOVOLTAÏQUE ET ENERGIE ELECTRIQUE</b> .....	<b>2</b>
I.1. QUE SIGNIFIENT KW ET KWH ? .....	2
I.2. QUE REPRESENTE TRES CONCRETEMENT UN KWH ? .....	2
I.3. QU'EST-CE QU'UN KWC ? .....	2
I.4. ET LES KWH/KWC ? .....	3
I.5. ET LES KWC/M <sup>2</sup> ? .....	4
I.6. L'ELECTRICITE PHOTOVOLTAÏQUE EST-ELLE ADAPTEE AUX MODES DE CONSOMMATION DE L'ENERGIE ? .....	4
<b>II. PHOTOVOLTAÏQUE ET RISQUES NATURELS</b> .....	<b>5</b>
II.1. UN COUP DE FOUDRE PEUT-IL DETRUIRE UNE INSTALLATION SOLAIRE ? .....	5
II.2. LES MODULES RESISTENT-ILS A LA GRELE ? .....	6
II.3. QUE CE PASSE-T-IL EN CAS DE COUPURE DU RESEAU ELECTRIQUE ? .....	7
II.4. FAUT-IL NETTOYER REGULIEREMENT L'INSTALLATION SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE ? .....	7
<b>III. PHOTOVOLTAÏQUE ET CYCLE DE VIE</b> .....	<b>8</b>
III.1. LES PANNEAUX SOLAIRES PHOTOVOLTAÏQUES SONT-ILS RECYCLABLES ? .....	8
III.2. COMBIEN DE TEMPS VA DURER MON SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE ? .....	8
III.3. LES MODULES PHOTOVOLTAÏQUES PERDENT-ILS DE LEUR PUISSANCE AU BOUT D'UN CERTAIN TEMPS ? .....	9
III.4. QUEL EST LE BILAN CARBONE DES PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES ? .....	9
<b>IV. PHOTOVOLTAÏQUE ET AUTRES FORMES D'ENERGIE SOLAIRE</b> .....	<b>10</b>
<b>V. PHOTOVOLTAÏQUE ET TECHNOLOGIES</b> .....	<b>10</b>
V.1. PEUT-ON BRANCHER ET INSTALLER SOI-MEME N'IMPORTE QUELS PANNEAUX SUR N'IMPORTE QUEL ONDULEUR ?	10
V.2. QU'EST-CE QU'UN MODULE MONOCRISTALLIN, POLYCRISTALLIN, THIN FILM ET AMORPHE ? .....	10
V.2.a) <i>Le Silicium Monocristallin</i> .....	10
V.2.b) <i>Le Silicium Polycristallin (ou multicristallin)</i> .....	11
V.2.c) <i>Les cellules à couches minces sans Silicium (CCM CIS ou "Thin film CIS")</i> .....	11
V.2.d) <i>Les cellules Silicium amorphe en couches minces (CCM Si "Thin film Si")</i> .....	12
V.3. A QUOI SERVENT LES DIODES DE CONTOURNEMENT ET DE BLOCAGE ? .....	13
<b>VI. PHOTOVOLTAÏQUE ET INVESTISSEMENT</b> .....	<b>14</b>
<b>ANNEXE 1 : AVENIR TARIFAIRE DU PHOTOVOLTAÏQUE EN FRANCE</b> .....	<b>15</b>
<b>ANNEXE 2 : REFERENCES ET SOURCES</b> .....	<b>16</b>

Note : cette brochure sur le photovoltaïque est la propriété intellectuelle exclusive de Sycomoreen. Elle est diffusable à des fins non lucratives dans le respect de son contenu, notamment dans le cadre d'activités scolaires ou pédagogiques, ou bien d'informations destinées au Grand Public.

# I. Photovoltaïque et Energie électrique

## I.1. Que signifient kW et kWh ?



En physique, il faut bien distinguer la puissance, le temps et l'énergie :

$$\text{Energie} = \text{Puissance} \times \text{Temps}$$

Les unités respectives sont : le Joule (énergie, J), le Watt (puissance, W) et la seconde (temps, s)

Mais pour les consommations domestiques, il est usuel de compter

- \* la puissance en kilowatt (kW) avec  $1 \text{ kW} = 1000 \text{ W}$ ,
- \* et le temps en heures ( $1 \text{ h} = 3600 \text{ s}$ ).



La multiplication de la puissance en kW par le temps compté en heures est une énergie exprimée en kilowattheure (kWh) : le rôle du compteur EDF est de mesurer en kWh la consommation ou la production de cette énergie électrique.

Note : un kWh, c'est aussi  $3\,600\,000 \text{ J} = 3,6 \text{ MJ}$

## I.2. Que représente très concrètement un kWh ?

C'est l'énergie nécessaire pour faire briller une ampoule de 100 W pendant 10h,

ou bien chauffer un four de 1000 W pendant une heure.

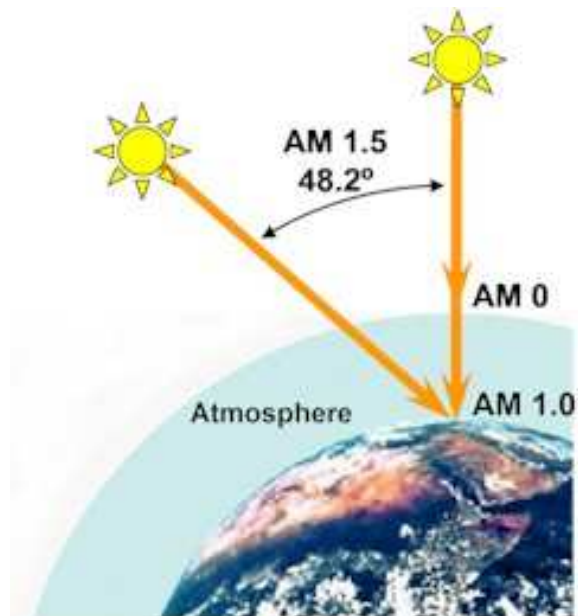


## I.3. Qu'est-ce qu'un kWc ?

C'est un kilowattcètre. On rencontre aussi l'acronyme anglosaxon kWp (kilowatt peak). C'est la puissance de pointe produite par une installation et cette notion n'est pas propre au photovoltaïque.

Mais la notion de puissance crête a besoin d'être normalisée, notamment pour les panneaux photovoltaïques. Ainsi un panneau de puissance 100 Wc (cent wattcètre) délivrera une puissance de 100 W dans les conditions suivantes:

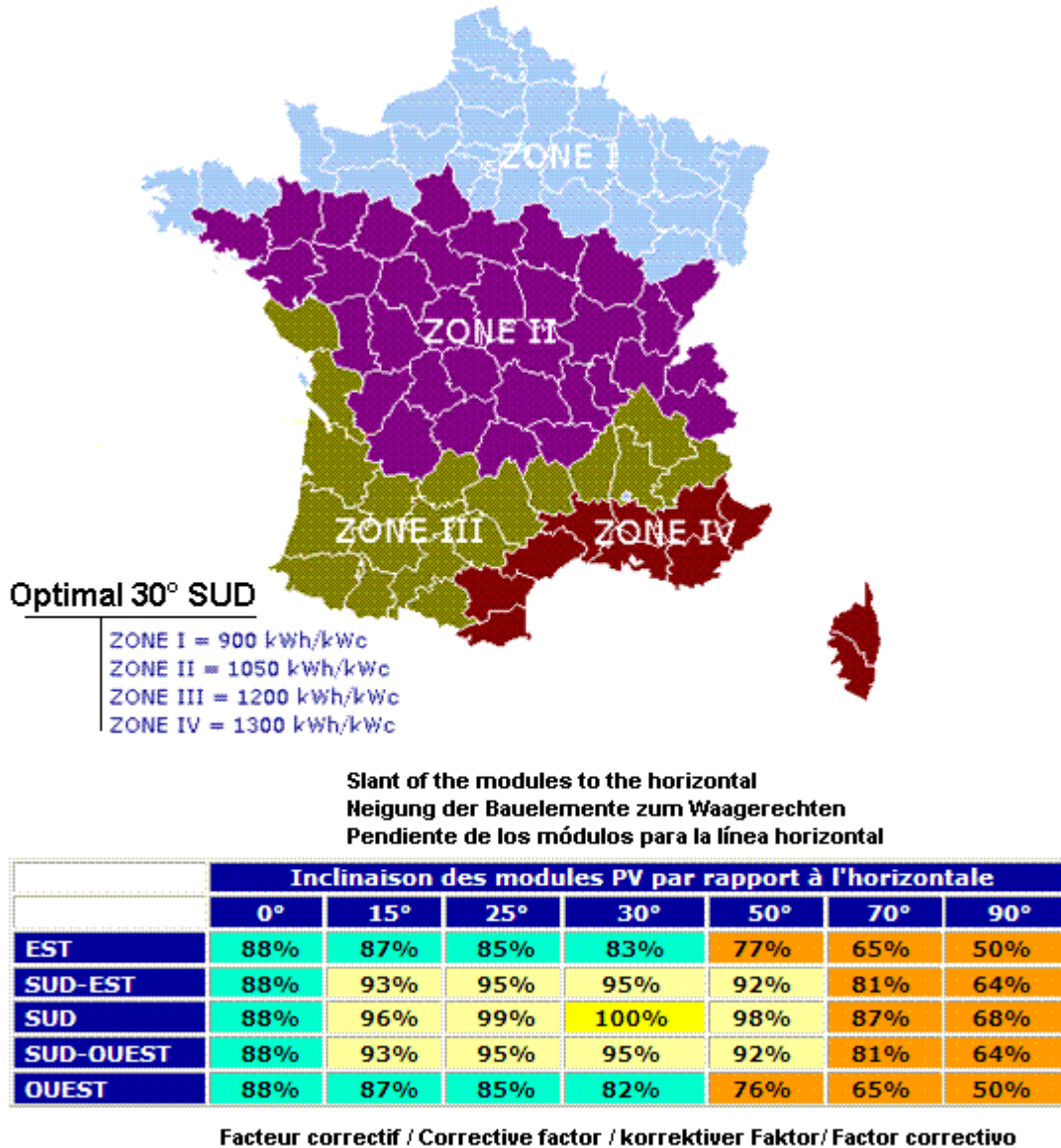
- 1) orientation perpendiculaire aux rayons du soleil, à une température de  $25^\circ\text{C}$ ,
- 2) exposé à un rayonnement AM1.5 : un flux solaire de  $1000 \text{ W/m}^2$  reçu au sol après avoir traversé une masse d'air de 1,5 atmosphères (ce qui atténue le flux et modifie son contenu spectral (les couleurs))



Note : AM0 correspond au rayonnement solaire dans l'espace ( $1360 \text{ W/m}^2$ , spectre solaire avec zéro absorption), AM1 au rayonnement solaire au sol avec traversée la plus courte de l'atmosphère ( $1000 \text{ W/m}^2$ , spectre solaire avec absorptions).

#### I.4. Et les kWh/kWc ?

Les kWh/kWc donnent l'énergie attendue par kWc installé. En fait cette notion est très imprécise car elle dépend à la fois de la zone de l'installation photovoltaïque, de la durée de fonctionnement et des conditions météorologiques. La notion de kWh/kWc est couramment l'énergie typique produite par une installation de 1 kWc pendant un an.



Le kWh/kWc dépend bien évidemment de la zone géographique, mais aussi de l'orientation de l'installation et d'éventuels ombrages. **Si bien qu'en toute rigueur, on devrait parler de kWh/kWc/an avec orientation optimale et sans ombrage.**

Le tableau ci-dessus présente les kWh/kWc optimums en France et les facteurs correctifs à y appliquer en cas d'orientation imparfaite.

Note : il existe des centrales avec suivi solaire (l'orientation des panneaux suit le mouvement du soleil et reste toujours optimale) qui augmente la production d'environ 30 % par rapport aux performances d'un panneau fixe idéalement incliné.

### **I.5. Et les kWc/m<sup>2</sup> ?**

Les kWc /m<sup>2</sup> donnent la puissance crête attendue en installant 1 m<sup>2</sup> de panneaux photovoltaïques. On se place à nouveau dans les conditions normalisées de la puissance crête, et les critères d'exposition optimale des kWh/kWc

Les rendements solaroélectriques progressent doucement et on considère qu'il faut pour des panneaux montés avec leur cadre environ :

- 7 à 10 m<sup>2</sup> de modules cristallins (mono ou polycristallins) pour obtenir 1 kWc,
- 11 à 13 m<sup>2</sup> de cellules à couche mince (CCM ou thin film)
- 16 à 20 m<sup>2</sup> de modules amorphes pour obtenir 1 kWc,

c'est à dire :

- entre 100 à 140 Wc/m<sup>2</sup> pour les panneaux en silicium cristallin (avec avantage au monocristallin)
- entre 75 et 90 Wc/m<sup>2</sup> pour les modules à couches minces (CCM, thin film)
- entre 50 et 65 Wc/m<sup>2</sup> pour les panneaux amorphes

Il existe des rendements "record" de laboratoire bien plus élevés, mais en général, c'est au détriment du coût et/ou de la fiabilité. Bien souvent, ils sont obtenus dans des conditions artificielles et ne sont pas sur le marché.

Note : les derniers (2010) rendements solaroélectriques industrialisés et ramenés aux surfaces de matériaux photovoltaïques réellement productifs sont typiquement 20% pour les panneaux monocristallins, 16% pour les polycristallins, 6 à 10% pour les CCM et 4 à 7% pour les modules amorphes.

### **I.6. L'électricité photovoltaïque est-elle adaptée aux modes de consommation de l'énergie ?**



L'énergie solaire est intermittente, mais elle respecte aussi les cycles jours/nuit de la demande en électricité. Elle n'est donc pas fondamentalement incompatible avec les activités humaines, même économiques ou industrielles.

**Cependant il n'y a pas de réponse tranchée à donner. Il s'agit de distinguer 2 types d'énergie :**

\* Les *énergies "on demand"* : disponibles à tout moment en quantité voulue. Ce sont majoritairement les énergies chimiques de combustions d'hydrocarbures (bois, biomasse, charbon, gaz, pétrole, hydrogène...), les énergies stockées (hydraulique, pneumatique...) ou bien plus marginalement les énergies thermiques naturelles (géothermie, énergie thermique des mers ETM)

\* Les *énergies "not on demand"* : plus ou moins prévisibles temporellement et en quantité non choisie (nucléaires, éolienne, marées...) nécessitent d'être soit consommées immédiatement, soit stockées pour une consommation ultérieure.

*L'équilibre du réseau électrique* (production = demande) induit une gestion complexe et des investissements lourds assurés par les grands fournisseurs nationaux d'électricité : en France, il s'agit d'EDF RTE (réseau de transport de l'électricité) qui en détient le monopole. Il y a même des accords de gestion internationale des réseaux car des synergies apparaissent généralement par la diversité temporelle, géographique et énergétique des différentes sources.





occurrences / 10 000 pour une maison de 100 m<sup>2</sup>) qu'un coup de foudre s'abatte directement sur un bâtiment (voir ci-dessus). En revanche, la foudre induit des surtensions/courants superampériques contre lesquels il est possible de lutter efficacement :

- 1) réaliser le câblage des panneaux avec des boucles de courant de surface réduite
- 2) prévoir des parasurtenseurs pour protéger les onduleurs.
- 3) Soigner les mises à la terre de l'ensemble de l'installation

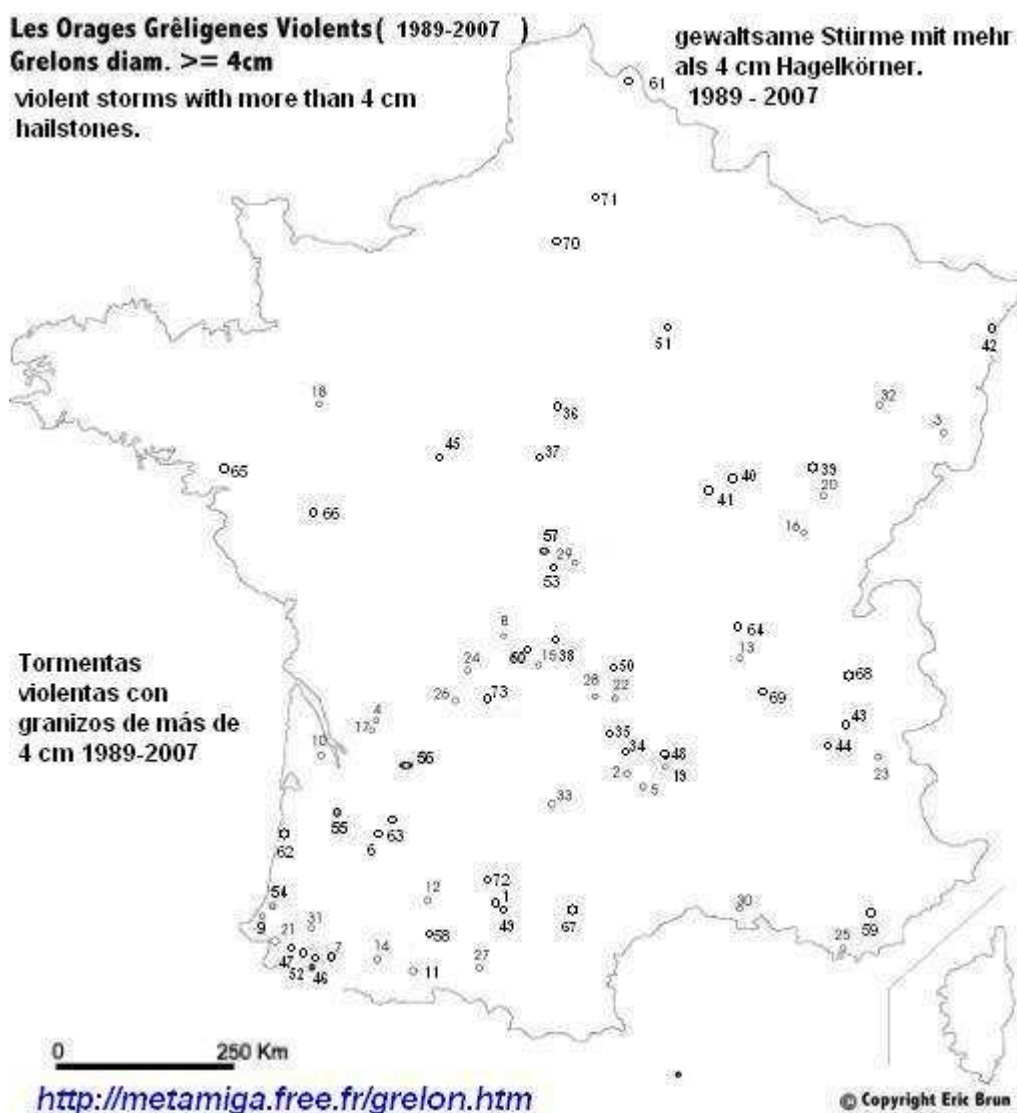
A proximité du champ photovoltaïque, la présence d'un arbre isolé de grande taille, a fortiori celle de parafoudre est à éviter. Il est également conseillé d'assurer l'installation photovoltaïque dans le cadre d'un contrat multirisque habitation.

## II.2. Les modules résistent-ils à la grêle ?

Les modules ont généralement acquis la norme IEC 61215 (cristallins) ou 61646 (film mince) pour être vendus en France. Cette norme définit diverses résistances mécano-physico-chimiques pour les panneaux dont une aptitude à supporter des grêles fortes à modérées. Les panneaux reconnus IEC 61215 ou IEC 61646 ont encaissé avec succès l'impact simultané de 11 grêlons de diamètre 25 mm lancés à 80 km/h verticalement contre le panneau.

D'autres tests se font avec des boules de glace jusqu'à 75 mm de diamètre ou bien des vitesses plus élevées jusqu'à 140 km/h, mais les chocs combinant les plus hautes vitesses et masses peuvent dépasser les limites du panneau. Les panneaux IEC61215 résistent en général mieux à la grêle que des tuiles en terre-cuite.

Le risque de grêle violente est statistiquement beaucoup plus faible que le risque de la foudre. Par contre s'il a lieu, il est très difficile de préserver le champ photovoltaïque. Voici ci-contre une carte des évènements grêligènes violents en France. Les zones les plus exposées sont l'Aquitaine et le Sud / Ouest du Massif Central.



Source : *Observatoire Météo en Provence par Eric Brun*

Pour limiter les impacts, augmenter la pente (50° et plus) du système photovoltaïque est favorable car le grêlon y rebondit en gardant l'essentiel de son énergie qui ira se dissiper sur le sol. En revanche, augmenter cette pente est défavorable pour la production solaire, et bien souvent on ne peut pas choisir la pente du toit. De même que pour le risque foudre, une assurance est fortement recommandée pour le risque grêle.

### **II.3. Que ce passe-t-il en cas de coupure du réseau électrique ?**



La ou les phases du réseau peuvent disparaître en cas de maintenance ou défaillance du réseau. Dans ce cas, les onduleurs perdent leur synchronisation et se mettent en veille automatiquement. L'énergie solaire n'est plus convertie en électricité grâce à un organe de découplage interne aux onduleurs (conformément aux exigences d'EDF en matière de sécurité des biens et des personnes). Ceci permet aux opérateurs EDF de rétablir les lignes en l'absence "d'îlotages", c'est à dire sans injections locales et inconnues d'électricité. Lorsque la ou les phases reviennent, les onduleurs se réinitialisent et la production reprend dans des conditions optimales et sécurisées.

Note : cela signifie qu'en cas de coupure du réseau, une installation photovoltaïque standard n'est d'aucun secours. Il existe cependant des onduleurs très spécifiques, ou bien des systèmes additionnels qui permettent de recréer une phase locale au système et d'injecter l'énergie uniquement dans le réseau domestique même en cas de coupure du réseau extérieur. Le surcoût de cette option et son usage très rare font qu'elle n'est presque jamais choisie.



### **II.4. Faut-il nettoyer régulièrement l'installation solaire photovoltaïque ?**

Le nettoyage des panneaux n'est pas obligatoire, mais il est absolument nécessaire pour maximiser la production. En effet, il faut savoir que le montage en série des panneaux photovoltaïques (appelés "strings") font que *le maillon faible de la chaîne impose son intensité aux autres même si tous les autres maillons sont plus forts* (analogie avec la force mécanique d'une chaîne limitée par son maillon le plus faible). Aussi, les panneaux sont triés au moment de leur fabrication par puissance : la tolérance est assez stricte pour qu'un panneau faible ne freine pas des panneaux plus puissants.

Cette précaution garantit des panneaux quasi-identiques une fois livrés et montés, sauf si l'un d'eux vient à être encrassé. De fait si sa puissance individuelle baisse de 15%, l'ensemble de la chaîne où il se trouve baissera aussi de 15% même si les autres panneaux du string sont parfaitement propres !

L'encrassement des panneaux provient de 4 sources principales :

- les poussières artificielles : pollution atmosphérique, particules de suie, de pneus, bitume...
- les poussières naturelles : particules de biomasse, poussière de terre, sable ou pierre
- les dépôts inorganiques adhérents : le calcaire, précipités divers
- les dépôts organiques adhérents : mousses, lichens (rares), chiures diverses (fréquentes)...



En France, les précipitations naturelles de pluie et neige font que le nettoyage des poussières est assez bon sans intervention. Mais dans certaines zones très exposées (pluies du Sahara, villes polluées, bords de mer, proximité d'activités poussiéreuses (mine, carrière, industrie lourde, autoroutes, agriculture...), il sera préférable de réaliser un nettoyage à l'eau douce, voire légèrement acide (vinaigre) pour dissoudre les dépôts inorganiques, ou légèrement alcoolisée pour dissoudre les dépôts organiques. Le nettoyage peut se faire par ruissellement, ou bien par frottement avec une perche/raclette et un liquide adapté, les deux pouvant être combinés. La fréquence des nettoyages peut être mensuelle, annuelle, pluriannuelle selon l'observation au cas par cas de l'état de surface des panneaux... et une baisse de la production électrique qui est souvent le signe d'un encrassement.



Note : Dans les régions où l'eau est calcaire, il est fortement déconseillé d'utiliser cette eau pour le nettoyage. Une installation idéale récupèrera l'eau de pluie dans une citerne à des fins de nettoyage. Il est aussi déconseillé de marcher sur les panneaux.



### III. Photovoltaïque et Cycle de Vie

#### **III.1. Les panneaux solaires photovoltaïques sont-ils recyclables ?**

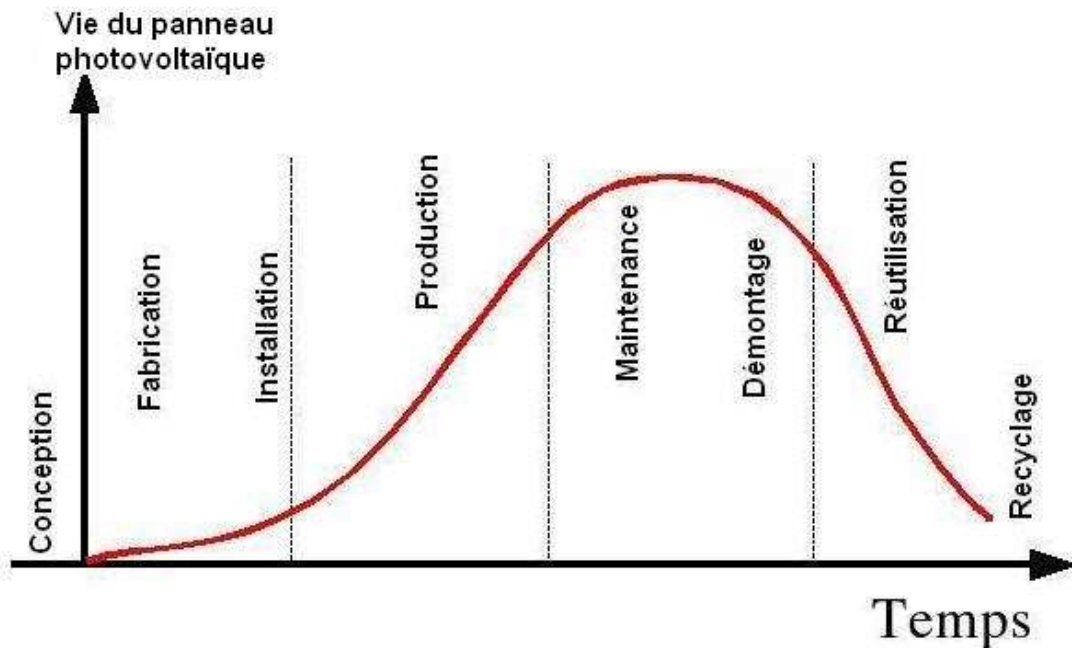
Tous les composants des panneaux solaires photovoltaïques sont recyclables. Il s'agit de séparer les structures en alliage d'aluminium de la partie photovoltaïque. Ensuite, les métaux sont séparés par des procédés physicochimiques pour fabriquer des nouveaux produits, notamment à base de silicium.

#### **III.2. Combien de temps va durer mon système photovoltaïque ?**

En dehors des destructions violentes (climatiques, incendie...), la durée de vie d'un panneau photovoltaïque est au minimum de 3 décennies. Le panneau est un composant sans aucune pièce mobile avec des soudures très bien protégées des intempéries et de la corrosion. Le vieillissement naturel de l'alliage inoxydable et du verre est très lent, probablement plus lent que pour une toiture en tuiles, et il ne gêne pas le fonctionnement électrique. Concernant les onduleurs, leur durée de vie typique est de 10 à 20 ans.







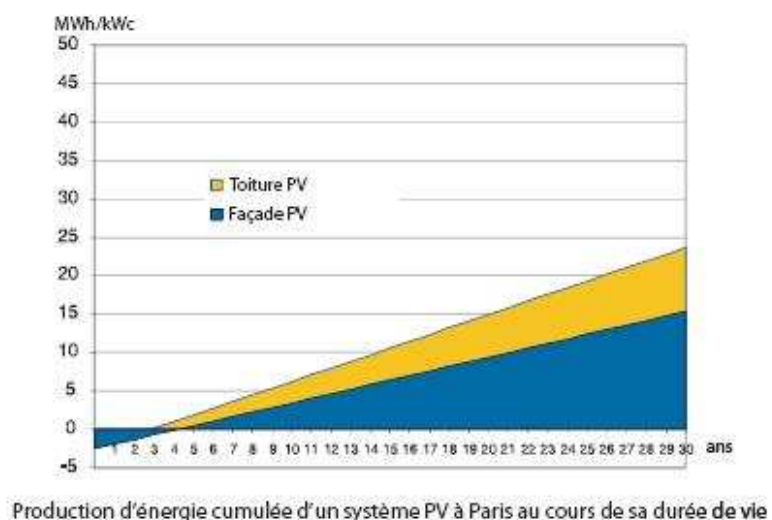
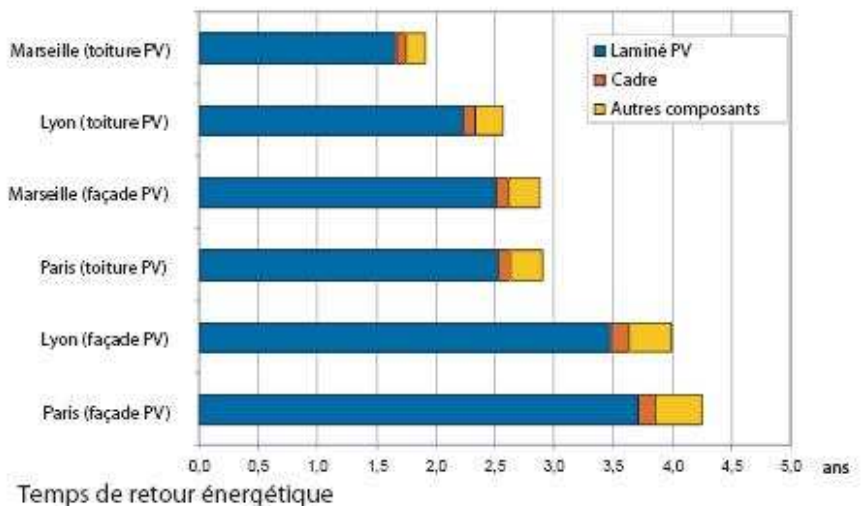
### III.3. Les modules photovoltaïques perdent-ils de leur puissance au bout d'un certain temps ?

Les panneaux sont soumis à des cycles de températures, d'hygrométries, d'agressions physicochimiques prévus par la norme IEC61215. Donc le rendement solaroélectrique diminue. Cependant les fabricants imposent à leurs panneaux des tests de vieillissement accéléré et les performances électriques se maintiennent remarquablement car ils garantissent souvent :

- \* plus de 90% de la performance initiale au bout de 20 ans
- \* plus de 80% de la performance initiale au bout de 30 ans
- \* en cas de panne, la fourniture gratuite de modules de remplacement pendant 20 ans.

### III.4. Quel est le bilan carbone des panneaux photovoltaïques ?

Comme tout produit manufacturé, un panneau photovoltaïque impose de consommer des hydrocarbures (pétrole, charbon, gaz) pour sa fabrication, son installation et son recyclage. Le bilan carbone des panneaux photovoltaïque est toujours très positif, c'est à dire que l'énergie qu'il produit permet



d'épargner une quantité d'hydrocarbures très supérieure à la quantité d'hydrocarbures nécessaire durant son cycle de vie. On raisonne ici en "CO2 Payback time" ou temps de retour sur investissement carbone. Les études les plus récentes (2005/2010) menées par l'ADEME et Hespul pour le compte de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) montrent qu'en France, ce temps ne dépasse pas 4 ans même pour des panneaux placés en façade à Paris.

#### IV. Photovoltaïque et autres formes d'énergie solaire

L'énergie solaire est *une énergie radiative couvrant 10 000 fois les besoins humains. On peut l'exploiter selon divers procédés selon le but recherché.* Il existe essentiellement 3 voies :

- les panneaux solaires thermiques destinés à l'obtention d'eau chaude sanitaire, avec différentes variantes,
- les panneaux photovoltaïques pour l'obtention d'électricité avec des rendements de 10 à 20%, également avec différentes variantes,
- le solaire thermodynamique pour l'obtention d'électricité solaire à haut rendement (20% et plus) qui nécessite la concentration de la lumière, là aussi selon des choix technologiques variés..

A noter qu'il existe des pistes marginales de recherche hybridant par exemple la concentration lumineuse et les cellules photovoltaïques, ou bien des panneaux solaires mixtes (électricité + eau chaude).

Le *photovoltaïque est la seule technologie qui peut créer de l'électricité avec le rayonnement solaire diffus* (lorsque le ciel est nuageux). Mais pour des pays très ensoleillés, le rayonnement solaire direct peut s'exploiter avec un meilleur rendement avec le solaire thermodynamique à concentration: on trouvera des précisions sur ces sujets sur <http://sycomoreen.free.fr> .

#### V. Photovoltaïque et technologies

##### **V.1. Peut-on brancher et installer soi-même n'importe quels panneaux sur n'importe quel onduleur ?**

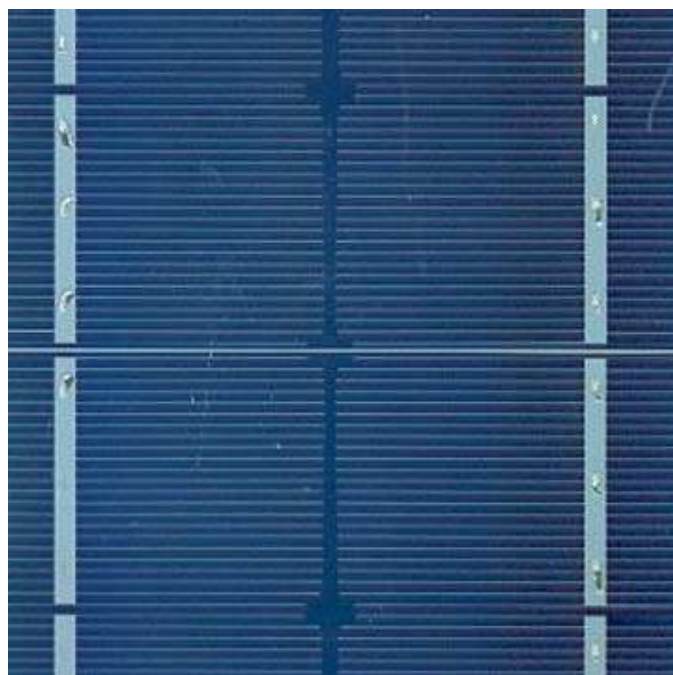
La réponse est clairement Non. Chaque installation solaire est spécifique et nécessite une étude. Des compétences en ingénierie photovoltaïque sont nécessaires pour dimensionner et câbler une installation de manière optimale. Chaque cas est à étudier avec grand soin : surface de la toiture, inclinaison du toit, environnement de l'installation, rendement des panneaux, limite de l'onduleur, budget... De même, l'installation nécessite des compétences en charpente/toiture et en électricité. Il existe en France des agréments photovoltaïques pour les artisans charpentiers et électriciens reconnus en la matière (QualiPV, QualiSol...).

##### **V.2. Qu'est-ce qu'un module monocristallin, polycristallin, thin film et amorphe ?**

Il existe actuellement sur le marché 4 technologies industrialisées :

###### **V.2.a) Le Silicium Monocristallin**

Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme, intense et brillant. Elles sont utilisées, mais ne sont pas majoritaires sur le marché de l'énergie photovoltaïque.



avantages : le meilleur rendement, de 15% à 20% , le meilleur ratio Wc/m<sup>2</sup> (jusqu'à 180 Wc/m<sup>2</sup>) , durée de vie au moins 30 ans.

Inconvénients : coût élevé, rapport puissance/prix médiocre, coins de la cellule souvent arrondis (perte de surface productive), rendement dégradé avec la chaleur. Energie grise importante (nécessite un silicium à très haute pureté).

Applications : celles où le critère prioritaire est la puissance électrique avec encombrement minimal : spatial, installations terrestres avec des surfaces limitées et/ou pour budget conséquent...

### *V.2.b) Le Silicium Polycristallin (ou multicristallin)*

Pendant le refroidissement du silicium dans une lingotière, il se forme plusieurs cristaux. La cellule photovoltaïque est d'aspect bleuté, mais pas uniforme ; on y distingue des motifs créés par les différents cristaux qui se rejoignent pour former un bleu intense avec reflets multiples. Elles sont très largement utilisées sur le marché de l'énergie photovoltaïque.



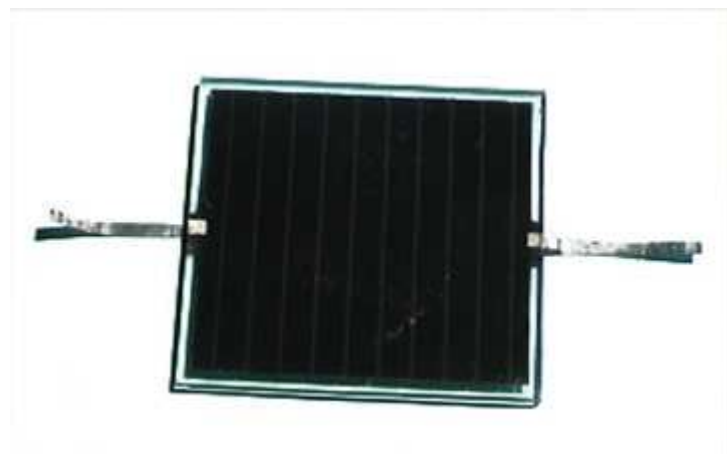
Avantages : durée de vie d'au moins 30 ans, cellule carrée permettant un meilleur foisonnement dans un module, rayonnement diffus mieux converti, bon rendement de conversion (12 à 16% et environ 140 Wc/m<sup>2</sup>), lingot nettement moins cher à produire que le monocristallin qui donne le meilleur rapport puissance/prix.

Inconvénients : rendement un peu dégradé sous un faible éclairage ou chaleur.

Applications : celles où le critère prioritaire est le rapport puissance électrique/prix : maison, centrale photovoltaïque, installation au sol en espace un peu limité...

### *V.2.c) Les cellules à couches minces sans Silicium (CCM CIS ou "Thin film CIS")*

Ces cellules représentent la nouvelle génération de cellules solaires sous forme de films minces, de type cuivre-indium-sélénium (CIS) ou Cadmium Tellure (CdTe). Les matières premières nécessaires à la fabrication des cellules CIS sont plus faciles à se procurer que le silicium utilisé dans les cellules photovoltaïques classiques. De plus, leur efficacité de conversion énergétique est la plus élevée à ce jour pour des cellules photovoltaïques en couche mince.



Avantages : Permet d'obtenir les meilleurs rendements par rapport aux autres cellules photovoltaïques en couche mince, permet de s'affranchir du silicium, cellule possiblement flexible



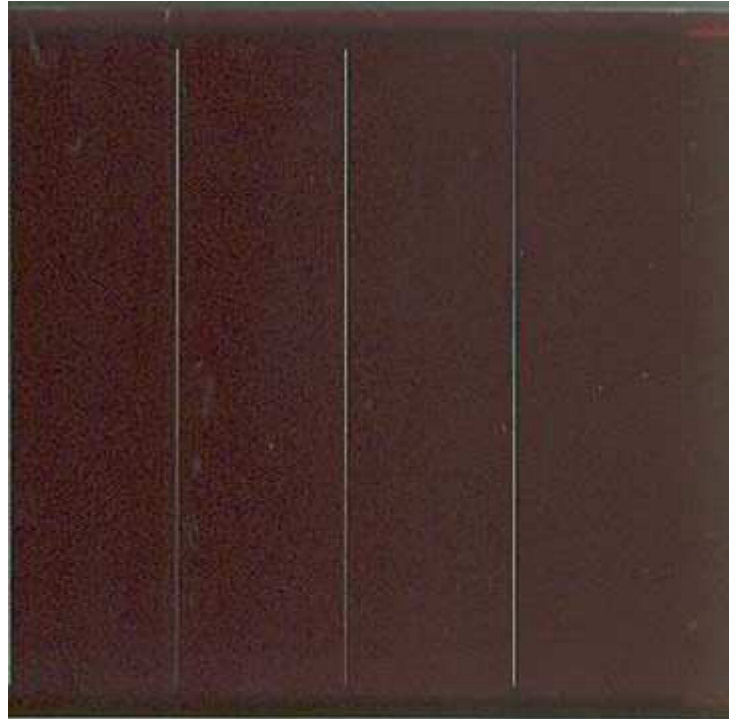
Inconvénients : A cause d'un rendement modeste (6 à 10% et environ 80 Wc/m<sup>2</sup>), les cellules en couche mince (0.01 mm) nécessitent une surface plus importante pour atteindre les mêmes puissances que les cellules épaisses poly ou monocristallines (0.2 mm)

Applications : celle où le critère prioritaire est le prix/Wc avec un souci de puissance/m<sup>2</sup> sans être très limité en surface. Toits d'usine et de supermarché, installation au sol de grande surface.

Note : la recherche CCM sans Silicium est active et d'autres combinaisons métaux/semi-conducteurs pourront être utilisés en CCM (Gallium, Indium, Phosphore, Arsenic, Germanium...). Une piste est aussi le silicium cristallin à couche mince dans l'espoir de tirer les avantages des 2 technologies sans les inconvénients...

#### *V.2.d) Les cellules Silicium amorphe en couches minces (CCM Si "Thin film Si")*

Le silicium lors de sa transformation, produit un gaz, qui est projeté sur une feuille de verre. La cellule est gris très foncé ou marron d'un aspect mat. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites "solaires" (en fait cela recharge une pile)



Avantages : Fonctionnent avec un éclairage faible, assez bon en lumière diffuse, très bon marché par rapport aux autres types de cellules, moins sensibles aux températures élevées, cellule possiblement flexible.

Inconvénients : Rendement faible (4 à 7% et environ 60 Wc/m<sup>2</sup>), les cellules en couche mince nécessitent une surface plus importante pour atteindre les mêmes productions que les cellules épaisses, durée de vie courte (+/- 10 ans), performances qui diminuent sensiblement avec le temps.

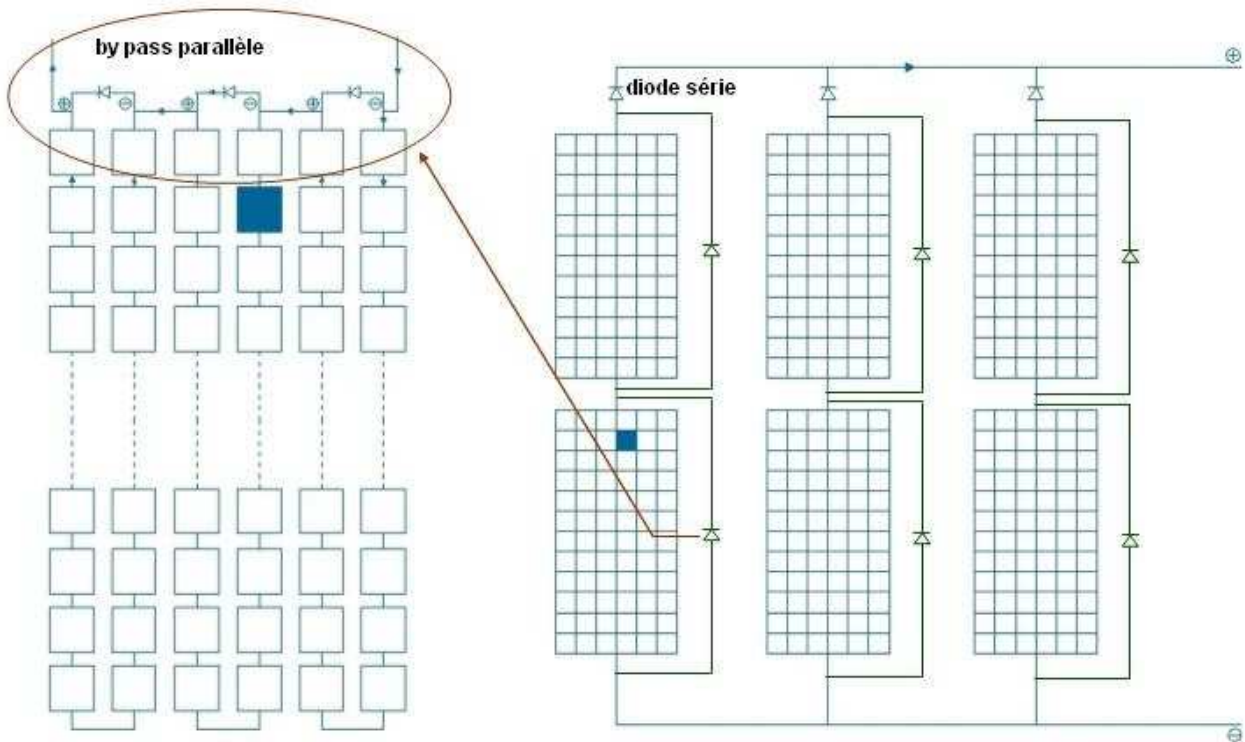
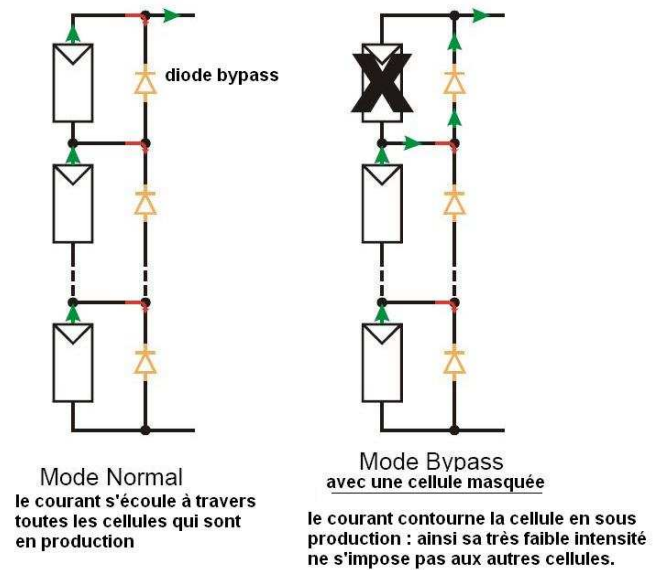
Applications : celle où le critère prioritaire est le prix/Wc sans se soucier de puissance/m<sup>2</sup> ou être limité en surface. Très utilisées pour l'électronique portable ou les installations solaires "low cost" à grande surface.

Note : la recherche est aussi active et tente de combiner plusieurs technologies : cellules multicouches (ou multijonctions) pour mieux exploiter chaque composante du spectre solaire. Mais cela pose des difficultés de fabrication et le rendement solaroélectrique plafonne souvent à 30% en laboratoire.



### V.3. A quoi servent les diodes de contournement et de blocage ?

Des diodes sont montées à l'intérieur d'un panneau photovoltaïque en parallèle ou en série de cellules ou de string *internes* à ce panneau. Leur but est **d'éviter le phénomène de point chaud ou « hot spot »** qui survient lorsqu'une cellule ou un string internes sont improductifs, généralement à la suite d'un masque (par une feuille, une ombre...). En effet, cette partie sous-irradiée du module risque de se trouver polarisée en inverse. Cela signifie concrètement que *la partie sous-irradiée ne se comporte plus comme un générateur électrique mais comme un récepteur qui va dissiper en chaleur l'énergie électrique des autres cellules bien éclairées*, ceci pouvant aller jusqu'à la destruction de la cellule... *Pour contrer cet effet thermique, des diodes peuvent être montées en parallèle (technique de contournement du courant : « by-pass ») comme illustré sur le schéma ci-dessus pour une cellule. Le hot spot sur un string peut être évité avec une diode en série (technique de blocage du courant : « blocking »).* La combinaison des diodes série/parallèle est possible comme illustré ci-dessous à titre d'exemple :



Pour protéger une cellule, la diode by-pass entre en conduction lorsque sa polarisation s'inverse. Pour un string, la diode de série devient bloquante lorsque le courant du string devient négatif. Dans les 2 cas, le courant s'annule dans les cellules ou strings sous-irradiés pour les protéger. **La technique by-pass possède aussi l'avantage de ne pas effondrer le courant sur l'ensemble d'un string lorsqu'une seule des cellules est masquée.** Cependant, dès lors qu'une diode protège une cellule ou un string, une partie de l'installation photovoltaïque est hors service et *la production baisse*. De plus, à partir d'un cahier des charges tension/courant d'un panneau, l'ingénierie du module s'attache à trouver **le meilleur compromis protection / puissance...** car si les diodes sont protectrices, leur multiplication nuit au rendement du panneau même s'il est éclairé normalement...

## VI. Photovoltaïque et investissement

En France, le photovoltaïque demeure encore soutenu par une politique d'achat des kWh photovoltaïques à des tarifs préférentiels. **Ces tarifs se justifient car l'énergie solaire est une énergie responsable qui n'hypothèque pas l'avenir:** les hydrocarbures et le nucléaire offrent en effet aux générations actuelles des prix/kWh dérisoires (1 à 2 cts€) en faisant fi des lourdes conséquences que les générations futures devront assumer (réchauffement climatique et déchets nucléaires). Le photovoltaïque a récemment connu des discours agressifs qui le qualifient de « bulle pour spéculateurs coûtant des milliards d'euros à la collectivité ». Malgré une situation bien plus nuancée que cet argumentaire simpliste, ses objectifs se réalisent en trouvant de solides appuis *via* des influences puissantes : *après avoir subi une baisse conséquente en mars 2010 et un net durcissement réglementaire, les tarifs sont encore amputés de 12% dès le 1<sup>er</sup> septembre 2010 pour les nouveaux arrivants, excepté pour les très petites installations jusqu'à 3 kWc.*

En moins de 8 mois, en sus de lourdeurs administratives et des règles tarifaires d'éligibilité complexes, **ces décisions unilatérales et soudaines** émanant officiellement du gouvernement français **ont rendu le secteur financièrement peu attractif et volatile.** *Le temps de retour typique sur investissement d'une installation photovoltaïque est actuellement de 8 à 15 ans selon les surfaces, la région, la technicité du projet et son tarif « éligible ».* Néanmoins, sur le plan du développement durable et patrimonial, **pour les très petites installations** (dont le tarif d'achat est provisoirement épargné, mais pas les crédits d'impôt relatifs qui viennent d'être divisés par 2), **le photovoltaïque reste une alternative à l'heure des agitations boursières et des monnaies flottantes.**

Malgré tout, sur le plan stratégique, le photovoltaïque apporte une énergie propre chaque année, produite au plus près des consommateurs en totale indépendance de la valeur des hydrocarbures ou des minerais d'uranium. Il crée aussi de nombreux emplois par l'activité qu'il génère (artisans locaux et entreprises), tout en valorisant les bâtiments de tout type.

Cependant, depuis septembre 2010, **le tarif initial et uniforme d'environ 60 cts €/kWh a été définitivement enterré.** Par rapport aux règles qui étaient valides jusqu'au 31 décembre 2009, de nombreuses variantes et exceptions voient le jour modulant *le tarif de rachat photovoltaïque généralement avec des baisses très marquées.* Et dès janvier 2012, les tarifs de base seront amputés de 10%/an pour les nouveaux contrats... Sauf s'il survient encore « un nouvel ordre imprévu ». **Cette grande instabilité réglementaire se combine à une baisse des coûts d'installation potentiellement lente,** car de grands marchés émergent mondialement (la demande) et les capacités de production des cellules photovoltaïques progressent lentement (l'offre) : **des désinvestissements massifs sont possibles (souhaités ?) dans la filière photovoltaïque française,** malgré son retard déjà extrêmement important en comparaison de l'Allemagne, de l'Espagne ou de l'Italie.

Pour conclure, rappelons qu'il faut aussi veiller à diversifier les investissements énergétiques réalisés dans une maison. Le photovoltaïque produit de l'électricité, mais pour du chauffage, l'installation de panneaux solaires thermiques sera beaucoup plus pertinente tout comme des travaux d'isolation thermique... et peut-être tout simplement la réduction des gaspillages d'énergie.

Rédigé par



**Le Mouvement Naturellement Energique !**

<http://sycomoreen.free.fr>



## Annexe 1 : avenir tarifaire du photovoltaïque en France

Implantation du champ photovoltaïque		<i>Jusqu'au</i> 31/08/2010	<i>A partir du</i> 01/09/2010	Remarque
Intégration totale à la toiture du bâti : clos, couvert et étanchéité	Résidentiel <3kW	58	58	Inchangé
	Résidentiel > 3kW	58	51	-12%
	Enseignement & Santé	58	51	-12%
	Autres usages	50	44	-12%
Intégration simplifiée à la toiture bâti	Tout usage Clos couvert, étanchéité, spécifique	42	37	-12%
Montage au sol Modulé du nord au sud par le « coefficient R »	Nord de la France	37.68	33.12	-12%
	Sud de la France	31.4	27.6	-12%
	DOM	40	35.2	-12%
<i>Tarifs garantis sur 20 ans et indexés avec des indices et dans la limite d'une production annuelle maximum</i>				

### Notes importantes :

- 1) Avant le 01/01/2010 existait la « grille de 2006 » avec environ 60 cts€/kWh pour tout bâtiment/surface de toiture et 35 cts€/kWh pour les centrales au sol.
- 2) Depuis le 01/01/2010 (confirmé en mars 2010), pour les bâtiments neufs (sauf ceux à usage d'habitation, enseignement et santé), *le bénéfice des tarifs ci-dessus impose un délai minimum de 2 ans entre l'achèvement du bâtiment et la pose du champ photovoltaïque : en 2010, un grand bâtiment neuf commercial, industriel ou agricole doit poser une toiture classique, puis la remplacer optionnellement en 2012... pour ne bénéficier au mieux que des tarifs 2012 et...*
- 3) A partir de 2012, **tous les tarifs de base pour tous les nouveaux contrats baissent de 10% par an. Ainsi dès 2012, les coefficients suivants sont applicables sur toute la grille :**

Date de demande de raccordement complète ou paiement de la proposition technique et financière (PTF) de ErDF	Coefficient applicable à l'ensemble de la grille tarifaire
01/01/2012 au 31/12/2012	0.9
01/01/2013 au 31/12/2013	0.81
01/01/2014 au 31/12/2014	0.729
01/01/2015 au 31/12/2015	0.6561
01/01/2016 au 31/12/2016	0.59049
01/01/2017 au 31/12/2017	0.531441
01/01/2018 au 31/12/2018	0.4782969
01/01/20XX au 31/12/20XX	$0.9^{(20XX-2011)}$ ----(soit ≈ 0 à long terme)
? Jusqu'à la « parité réseau » (prix kWh elec = prix kWh photovoltaïque) ?	

- 4) Depuis le décret de mars 2010, ErDF ne laisse plus les phases/neutre du réseau spontanément : le passage du CONSUEL, ou à défaut son visa de validation sont à fournir à ErDF pour obtenir les phases du réseau et injecter de l'énergie (mise en service de l'installation). Ceci coûte environ 150 € et la conformité à la norme UTE C15-712. Toute non-conformité induit une contre-visite avec environ 200 € supplémentaires.
- 5) **Pour toute précision et subtilité juridique complémentaire**, il faut (faudra) se reporter à « l'Arrêté du 31 août 2010 fixant les conditions d'achat de l'électricité produite par les installations utilisant l'énergie radiative du soleil », ses annexes et tous les arrêtés/décrets d'application actuels ou ultérieurs relatifs à cette question. (<http://www.legifrance.gouv.fr>)

## Annexe 2 : références et sources

Le texte et la conception de cette brochure d'information sur le photovoltaïque ont été adaptés par SYCOMOREEN (SYstems for CONversion of MOtions and REnewable Energies) à partir de la FAQ Sycomoreen's Photovoltaics : [http://sycomoreen.free.fr/syco\\_PV\\_FAQ\\_fra.html](http://sycomoreen.free.fr/syco_PV_FAQ_fra.html) (des traductions anglaise, allemande et espagnole y sont disponibles). Les liens énumérés ci-après donnent les références des illustrations et les sources scientifiques :

Page	Description	Auteur / Source
1	Toit photovoltaïque	<a href="http://www.sunlightelectricity.eu/upload/Image/photovoltaique.jpg">http://www.sunlightelectricity.eu/upload/Image/photovoltaique.jpg</a>
2	Pile et Cordon électriques	<a href="http://www.clipart-fr.com">http://www.clipart-fr.com</a> énergie
2	Miniature des compteurs EDF	<a href="http://t1.gstatic.com/">http://t1.gstatic.com/</a> (rech google « image compteur EDF »)
2	Miniature compteurs SAGEM	<a href="http://t1.gstatic.com/">http://t1.gstatic.com/</a> (rech google « image compteur EDF »)
2	Ampoule	<a href="http://www.icone-gif.com/gif/lumiere/ampoules/">http://www.icone-gif.com/gif/lumiere/ampoules/</a>
2	Four	<a href="http://www.clipart-fr.com">http://www.clipart-fr.com</a> Micro onde
2	Rayonnement normalisé AM	<a href="http://www.eyesolarlux.com/solar_am1.5_graphic_sm.jpg">http://www.eyesolarlux.com/solar_am1.5_graphic_sm.jpg</a>
3	Facteur correctif d'orientation	<a href="http://www.per-energie.fr/per+energie+calculs+production+pv-108.html">http://www.per-energie.fr/per+energie+calculs+production+pv-108.html</a> adapté par <a href="http://sycomoreen.free.fr">http://sycomoreen.free.fr</a>
4	Champ solaire photovoltaïque	<a href="http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/imagecache/embedded_img_full/image/image_file/smartgrid1.jpg">http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/imagecache/embedded_img_full/image/image_file/smartgrid1.jpg</a> adapté par <a href="http://sycomoreen.fr">http://sycomoreen.fr</a>
5	Smart Grid Thinking / Gestion du réseau	<a href="http://www02.abb.com">http://www02.abb.com</a>
5	Foudre en France et Risque Céramique	<a href="http://www.stielec.ac-aix-marseille.fr/cours/abati/foudre/foudre.htm">http://www.stielec.ac-aix-marseille.fr/cours/abati/foudre/foudre.htm</a> <a href="http://www.stielec.ac-aix-marseille.fr/cours/abati/foudre/pdf/densite.pdf">http://www.stielec.ac-aix-marseille.fr/cours/abati/foudre/pdf/densite.pdf</a>
6	Orages grêligènes violents	<a href="http://metamiga.free.fr/grelon.htm">http://metamiga.free.fr/grelon.htm</a>
6	Test grêlon norme 61 215	<a href="http://www.iec-normen.de/previewpdf/info_iec61215%7Bed2.0%7Ddb.pdf">http://www.iec-normen.de/previewpdf/info_iec61215%7Bed2.0%7Ddb.pdf</a> et la norme résumée <a href="http://www.arsenal.ac.at/downloads/pvst3.pdf">http://www.arsenal.ac.at/downloads/pvst3.pdf</a>
7	Coupure d'électricité	<a href="http://techno.branchez-vous.com/actualite/upload/2007/07/nno%20plug.jpg">http://techno.branchez-vous.com/actualite/upload/2007/07/nno%20plug.jpg</a>
7	Opérateurs de maintenance du réseau électrique	<a href="http://www.ledauphine.com/_cache/_image/photoelement/pj/_857818.jpg">http://www.ledauphine.com/_cache/_image/photoelement/pj/_857818.jpg</a> [435x-1].JPG adapté par <a href="http://sycomoreen.free.fr">http://sycomoreen.free.fr</a>
8	Panneaux propres sur toiture	<a href="http://www.arkitekto.net/P2_solaire_fichiers/Capteur_photovoltaique_cristallin_5.jpg">http://www.arkitekto.net/P2_solaire_fichiers/Capteur_photovoltaique_cristallin_5.jpg</a>
8	Fenêtres sales	<a href="http://mb33470.fond-ecran-image.com/blog-photo/files/2007/10/blog-dsc_9908-fenetre-sale-coeurs.jpg">http://mb33470.fond-ecran-image.com/blog-photo/files/2007/10/blog-dsc_9908-fenetre-sale-coeurs.jpg</a> adapté par <a href="http://sycomoreen.free.fr">http://sycomoreen.free.fr</a>
8	Cycle de vie bouclé d'un panneau PV	<a href="http://www.ellipsos.ca/site_files/Image/cycle%20de%20vie.jpg">http://www.ellipsos.ca/site_files/Image/cycle%20de%20vie.jpg</a>
9	Cycle de vie temporelle d'un panneau PV	<a href="http://www.daskoo.org/upload/images/strategie-liee-au-cycle-de-vie-du-produit.jpg">http://www.daskoo.org/upload/images/strategie-liee-au-cycle-de-vie-du-produit.jpg</a> adapté par <a href="http://sycomoreen.free.fr">http://sycomoreen.free.fr</a>
9	Bilan CO2 Photovoltaïque	<a href="http://www.hespul.org/IMG/pdf/Brochure-indicateurs_France.pdf">http://www.hespul.org/IMG/pdf/Brochure-indicateurs_France.pdf</a> et <a href="http://www.hespul.org/IMG/pdf/resume_rapport_IEA-PVPS_FR.pdf">http://www.hespul.org/IMG/pdf/resume_rapport_IEA-PVPS_FR.pdf</a>
10	Carré Silicium monocristallin	<a href="http://www.ecosources.info/images/energie_industrie/silicium_monocristallin.jpg">http://www.ecosources.info/images/energie_industrie/silicium_monocristallin.jpg</a>
11	Carré Silicium polycristallin	<a href="http://www.ecosources.info/images/energie_industrie/cellule-polycrystalline.jpg">http://www.ecosources.info/images/energie_industrie/cellule-polycrystalline.jpg</a>
11	Carré Silicium Thin Film	<a href="http://www.ecosources.info/images/energie_industrie/cellule_photovoltaique_cis.jpg">http://www.ecosources.info/images/energie_industrie/cellule_photovoltaique_cis.jpg</a>
12	Carré Silicium amorphe	<a href="http://www.ecosources.info/images/energie_industrie/silicium_amorphe.jpg">http://www.ecosources.info/images/energie_industrie/silicium_amorphe.jpg</a>
12	Silicium amorphe en rouleau	<a href="http://www.arkitekto.net/P2_solaire_fichiers/Capteur_photovoltaique_amorphe_1.jpg">http://www.arkitekto.net/P2_solaire_fichiers/Capteur_photovoltaique_amorphe_1.jpg</a>
13	Principe des diodes by-pass	<a href="http://www.ibselectronics.com/pdf/ac/Diotec/applications/solardiodes.pdf">http://www.ibselectronics.com/pdf/ac/Diotec/applications/solardiodes.pdf</a> extrait et adapté par <a href="http://sycomoreen.free.fr">http://sycomoreen.free.fr</a>
13	Association diodes By-Pass et série	<a href="http://photovolt34.free.fr/energie_pv.php">http://photovolt34.free.fr/energie_pv.php</a> adapté par <a href="http://sycomoreen.fr">http://sycomoreen.fr</a>
15	Organigramme tarifaire PV en France	<a href="http://www.photovoltaique.info/IMG/pdf/100101_Tarifs_pv_HESPUL.pdf">http://www.photovoltaique.info/IMG/pdf/100101_Tarifs_pv_HESPUL.pdf</a>

### Thèses internationales sur le « CO2 Payback Time » des panneaux photovoltaïques

[http://www.oilcrisis.com/netEnergy/EnergyPayback4PV\\_NREL.pdf](http://www.oilcrisis.com/netEnergy/EnergyPayback4PV_NREL.pdf) (NREL, USA)

[http://www.clca.columbia.edu/papers/Photovoltaic\\_Energy\\_Payback\\_Times.pdf](http://www.clca.columbia.edu/papers/Photovoltaic_Energy_Payback_Times.pdf) (USA)

[http://www.newenergyindia.org/Energy%20Payback%20time\\_Opinion%20Page.pdf](http://www.newenergyindia.org/Energy%20Payback%20time_Opinion%20Page.pdf) (Inde)

### Base de données et simulations solaires recommandées par Sycomoreen

<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/> (PVGIS : PhotoVoltaic Geographical Information System)

### Sites francophones d'informations et de veille sur l'énergie solaire en France

<http://www.outilssolaires.com/>

<http://www.hespul.org/>

<http://www.photovoltaique.info/>

<http://forum-photovoltaique.fr/>