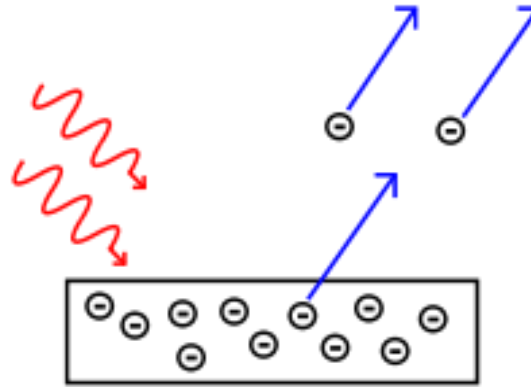


EFFET PHOTOVOLTAÏQUE

Définition : L'effet photoélectrique EPE est l'émission d'électrons par un matériau (généralement métallique) lorsque celui-ci est exposé à la lumière ou un rayonnement électromagnétique de fréquence suffisamment élevée.



L'émission de chaque **électron (ligne bleue)** requiert une quantité minimale d'énergie, laquelle est apportée par un **photon (ligne rouge)**.

Il y a qqs phénomènes électriques d'un matériau provoqués par l'action de la lumière sur un matériau :

- *) des électrons sont éjectés du matériau (émission photoélectrique)
- **) modification de la conductivité du matériau (photoconductivité, effet photovoltaïque lorsqu'il est en œuvre au sein d'une cellule photovoltaïque, effet photoélectrochimique, effet photorésistif).

Pendant que l'EPE se manifeste, toute l'énergie du photon incident se transmet à l'électron périphérique. Une quantité d'énergie minimale est nécessaire pour extraire l'électron de l'atome, l'énergie excédentaire est transmise à l'électron sous forme d'énergie cinétique.

Histoire

- *) 1839 : présentation de l'EPE par Antoine Becquerel et son fils Alexandre Edmond.
- **) 1887 : détails d'une DESCRIPTION SCIENTIFIQUE par Heinrich Rudolf Hertz (revue scientifique *Annalen der Physik* : H. Hertz, *Annalen der Physik*, 33, 1887, p. 983).
- ***) 1905 : 1^{ère} EXPLICATION SCIENTIFIQUE par [Albert Einstein](#) fut le premier, en 1905 (en utilisant le concept de particule de lumière, appelé aujourd'hui [photon](#), et celle du [quantum](#) d'énergie ([Max Planck](#) : 1900 = explication du phénomène d'émission de lumière par un [corps noir](#).)

Einstein a expliqué que ce phénomène: absorption de photons (les quanta de lumière), lors de l'interaction du matériau avec la lumière === Prix Nobel de physique 1921.

- 1- Les électrons ne sont émis que si la fréquence de la lumière est suffisamment élevée et supérieure à la fréquence limite (fréquence seuil).
- 2- Cette fréquence seuil dépend du matériau et est directement liée à l'énergie de liaison des électrons qui peuvent être émis.

La relation de Planck-Einstein traduit le modèle corpusculaire de la lumière (toute onde électromagnétique) en permettant de calculer l'énergie transportée par un photon. Cette relation s'écrit simplement :

$E = h \cdot \nu$; où : E est l'énergie du photon (en Joule) ; h est la constante de Planck dont une valeur approchée est $6,63 \cdot 10^{-34}$ J.s ; ν la fréquence (en Hertz) de l'onde électromagnétique associée au photon considéré.

- 3- Le nombre d'électrons émis lors de l'exposition à la lumière, qui détermine l'intensité du courant électrique, est proportionnel à l'intensité de la source lumineuse.
- 4- La vitesse des électrons émis ne dépend pas de l'intensité de la source lumineuse !
- 5- L'énergie cinétique des électrons émis dépend linéairement de la fréquence de la lumière incidente.
- 6- Le phénomène d'**émission photoélectrique** se produit dans un délai extrêmement petit inférieur à 10^{-9} s après l'éclairage, ce qui rend le **phénomène quasi instantané**.

Définition et principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

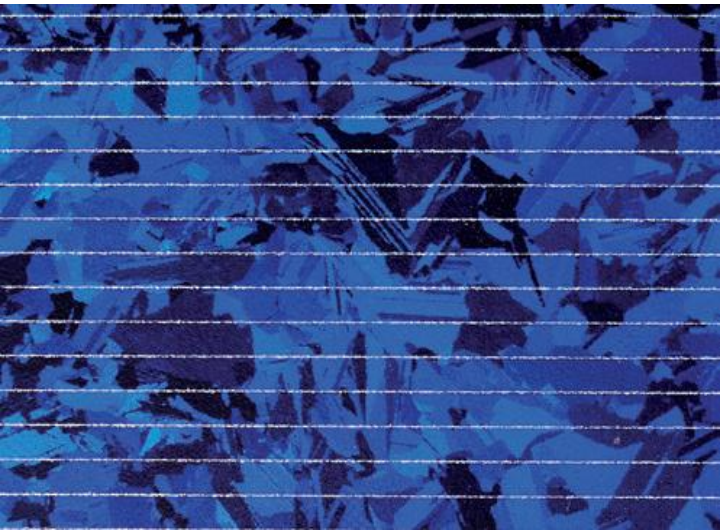
Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui, exposé à la lumière, génère de l'électricité.

Elle peut être utilisée seule (calculatrice, montre...) mais, la plupart du temps, les cellules sont regroupées dans des **modules ou panneaux photovoltaïques**.

Il existe plusieurs familles de cellules photovoltaïques.

Actuellement, les plus répandues sur le marché sont les cellules en silicium cristallin, silicium amorphe, ... les cellules en couches minces.

1- Les cellules en silicium cristallin : constituées de fines plaques de silicium (Si : Z=14 ; 1S² 2S² 2P⁶ 3S² 3P²).



Le silicium est obtenu à partir d'un seul cristal ou de plusieurs cristaux : on parle alors de cellules monocristallines ou multicristallines.

Les cellules en silicium cristallin (90 % du marché mondial) sont d'un bon rendement (rapport entre l'énergie solaire captée et l'énergie électrique produite) :

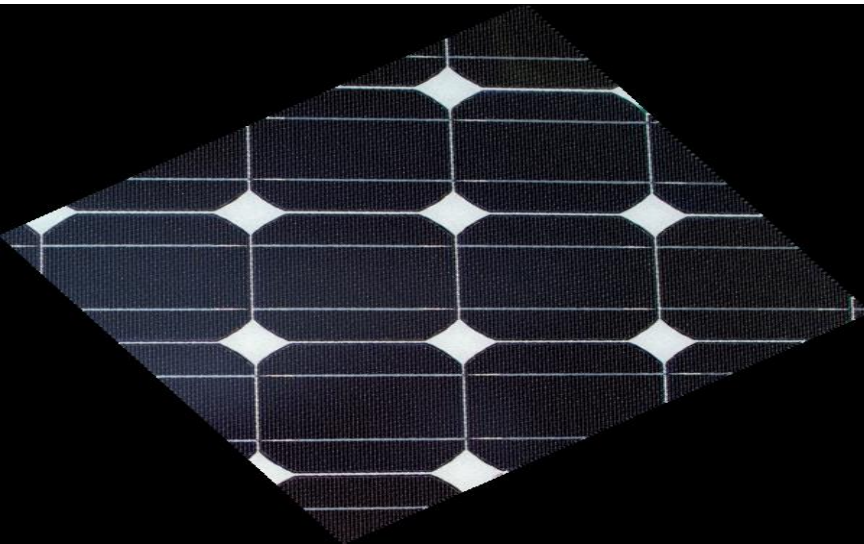
*) 14 à 15 % pour le multicristallin

*) 16 à 19 % pour le monocristallin

Trois principaux types de cellules cristallines peuvent être distingués :

- Monocristallines (Mono c-Si)
- Polycristallines (Poly c-Si)
- Rubans (ribbon c-Si)

2- Les cellules en couches minces : fabriquées en déposant une ou plusieurs couches semi-conductrices et photosensibles sur un support de verre, de plastique, d'acier... (10% du marché mondial).



Coût de fabrication réduit mais rendement inférieur à celui des cellules en silicium cristallin (5 à 13 %).

Les cellules en couches minces les plus répandues sont en silicium amorphe, composées de silicium projeté sur un matériel souple.

Quatre types de modules en couches minces (en fonction de la matière active utilisée) sont actuellement disponibles dans le commerce :

- Silicium amorphe (a-Si)
- Tellurure de Cadmium (CdTe)
- Cuivre Indium/Gallium Diselenide/disulphide (CIS, CIGS)
- Cellules multi-jonction (a-Si/m-Si)

3 – 4 - ...: Les cellules à concentration : elles sont placées au sein d'un foyer optique qui concentre la lumière. Leur rendement est élevé, de l'ordre de 20 à 30 %, mais elles doivent absolument être placées sur un support mobile afin d'être constamment positionnées face au soleil.

Autres types de cellules

Il existe d'autres types de technologies photovoltaïques actuellement commercialisées ou encore à l'étude, les principales étant :

> Photovoltaïque à concentration

Certaines cellules sont destinées à fonctionner avec des rayons solaires concentrés. Elles sont alors placées à l'intérieur d'un collecteur qui concentre la lumière du soleil sur les cellules au moyen d'une lentille. L'idée est d'utiliser **le moins possible de matériau photovoltaïque semi-conducteur, et le plus possible la lumière du soleil**. Leur rendement se situe entre 20 et 30%.



Module photovoltaïque à concentration



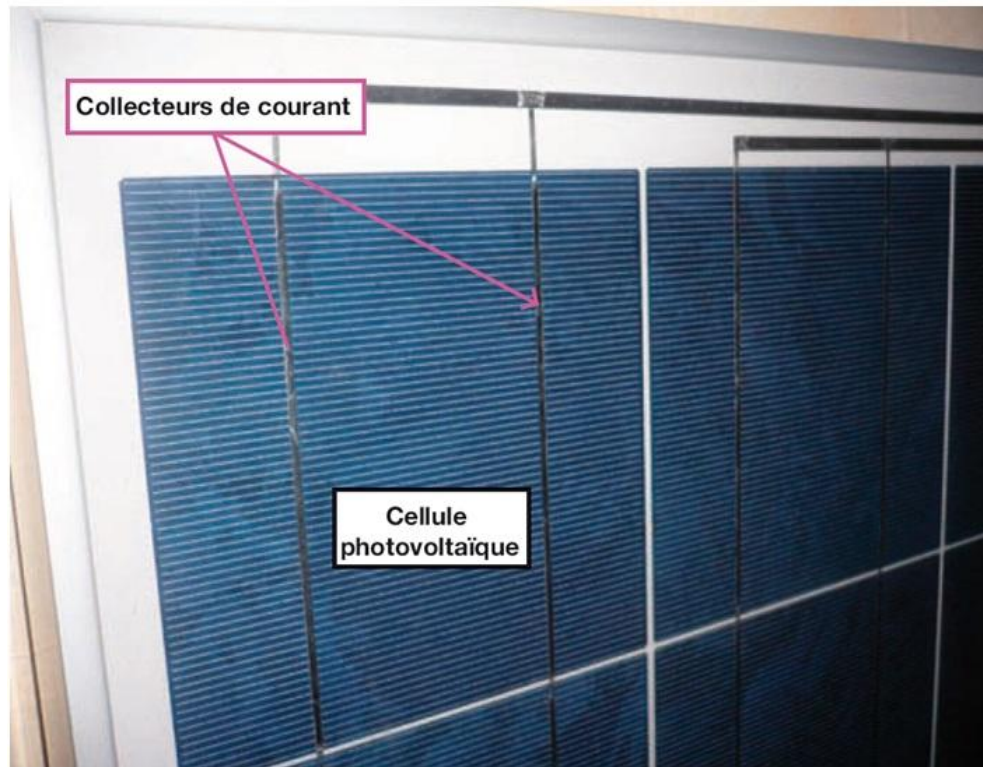
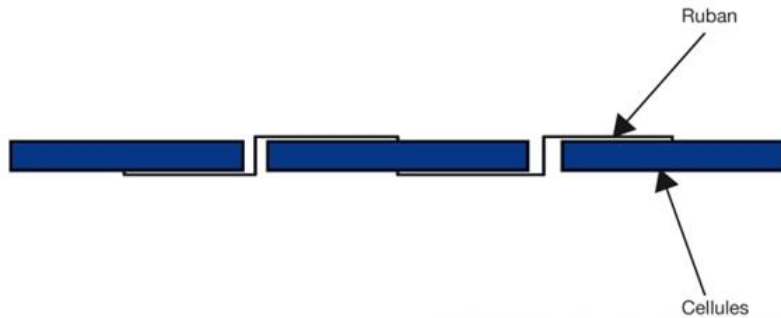
Cellules solaires flexibles, faciles à intégrer

> Cellules flexibles

Basées sur un processus de production similaire à celui des couches minces, ces cellules sont constituées d'un dépôt de matière active sur un plastique fin, rendant le tout flexible. Cela ouvre la voie à une série d'applications, en particulier pour l'intégration aux bâtiments (toiture) et pour les applications domestiques.

Les modules photovoltaïques

Toutes les cellules composant un module photovoltaïque sont identiques.
Les cellules sont soudées deux à deux par un ou plusieurs collecteurs métalliques en forme de ruban.
La connexion se fait du contact en face avant (pôle négatif) au contact en face arrière (pôle positif).
Les rubans adhèrent par soudure à la cellule grâce à une lamelle de cuivre étamé.



LA TECHNOLOGIE PHOTOVOLTAÏQUE

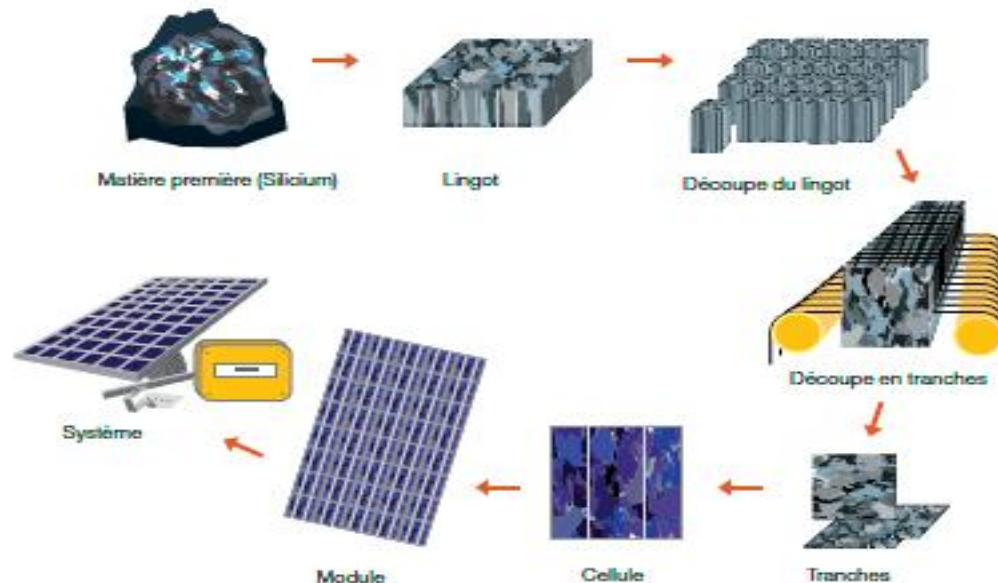
comment ça marche concrètement?

Les éléments les plus importants d'un système photovoltaïque sont les **cellules**, éléments de base de l'unité qui collectent la lumière du soleil; les **modules**, qui rassemblent un grand nombre de cellules au sein d'une unité; et, dans certains cas, les **onduleurs**, qui transforment l'électricité générée en électricité utilisable au quotidien.



. PROCÉDE DE FABRICATION: la Chaîne de Valeur Photovoltaïque

Le schéma suivant décrit les différentes étapes de la production d'un système photovoltaïque (technologie cristalline).



LE SECTEUR PHOTOVOLTAÏQUE

devient un employeur majeur en Europe et dans le monde

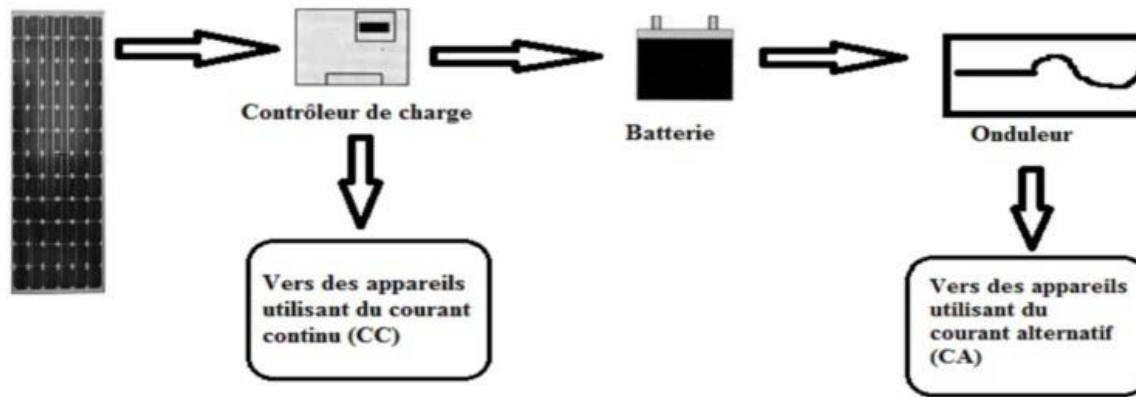
Le secteur photovoltaïque est particulièrement prometteur en termes de création d'emplois et de richesses au niveau local. Le secteur investit massivement dans la recherche et l'innovation technologique et génère dans une très large mesure de l'emploi qualifié et de bonne qualité. De plus, la structure décentralisée du secteur photovoltaïque et des énergies renouvelables permet la création d'emplois dans les zones moins industrialisées.

L'industrie photovoltaïque a créé plus de 75 000 emplois en Europe ces dernières années, en particulier :

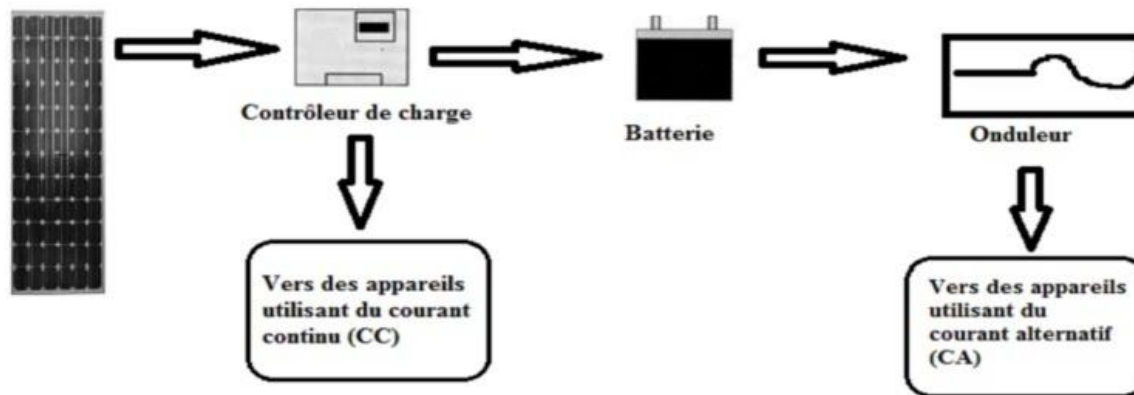
- En Allemagne (premier marché photovoltaïque dans le monde), le nombre de personnes employées dans le secteur photovoltaïque est passé de 1 500 en 1999 à environ 40 000 en 2007.
- En Espagne, 23 000 emplois ont été créés jusqu'en 2007.
- En Italie, au total 1 700 emplois ont été créés jusqu'en 2007.
- En France, environ 2 100 personnes sont aujourd'hui directement employées par le secteur photovoltaïque.

La Plateforme Européenne pour la Technologie Photovoltaïque (European Photovoltaic Technology Platform) estime que l'industrie photovoltaïque peut potentiellement créer plus de 200 000 emplois dans l'Union Européenne d'ici à 2020 et dix fois plus à l'échelle mondiale.

INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE AUTONOME (non raccordée au réseau)



INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE RACCORDEE au réseau

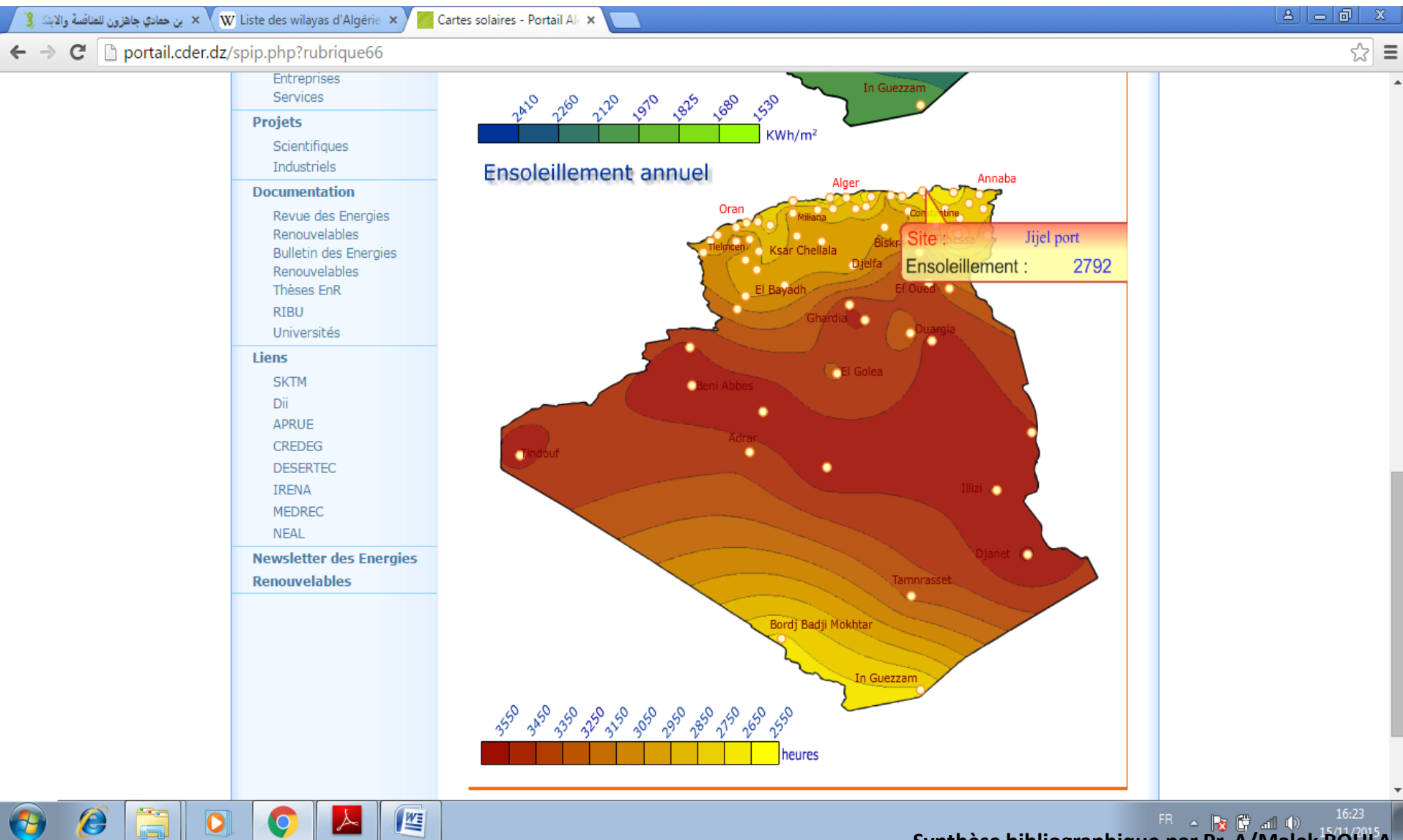


Influence de quelques facteurs sur (le rendement/efficacité)de modules de production de l'EPE

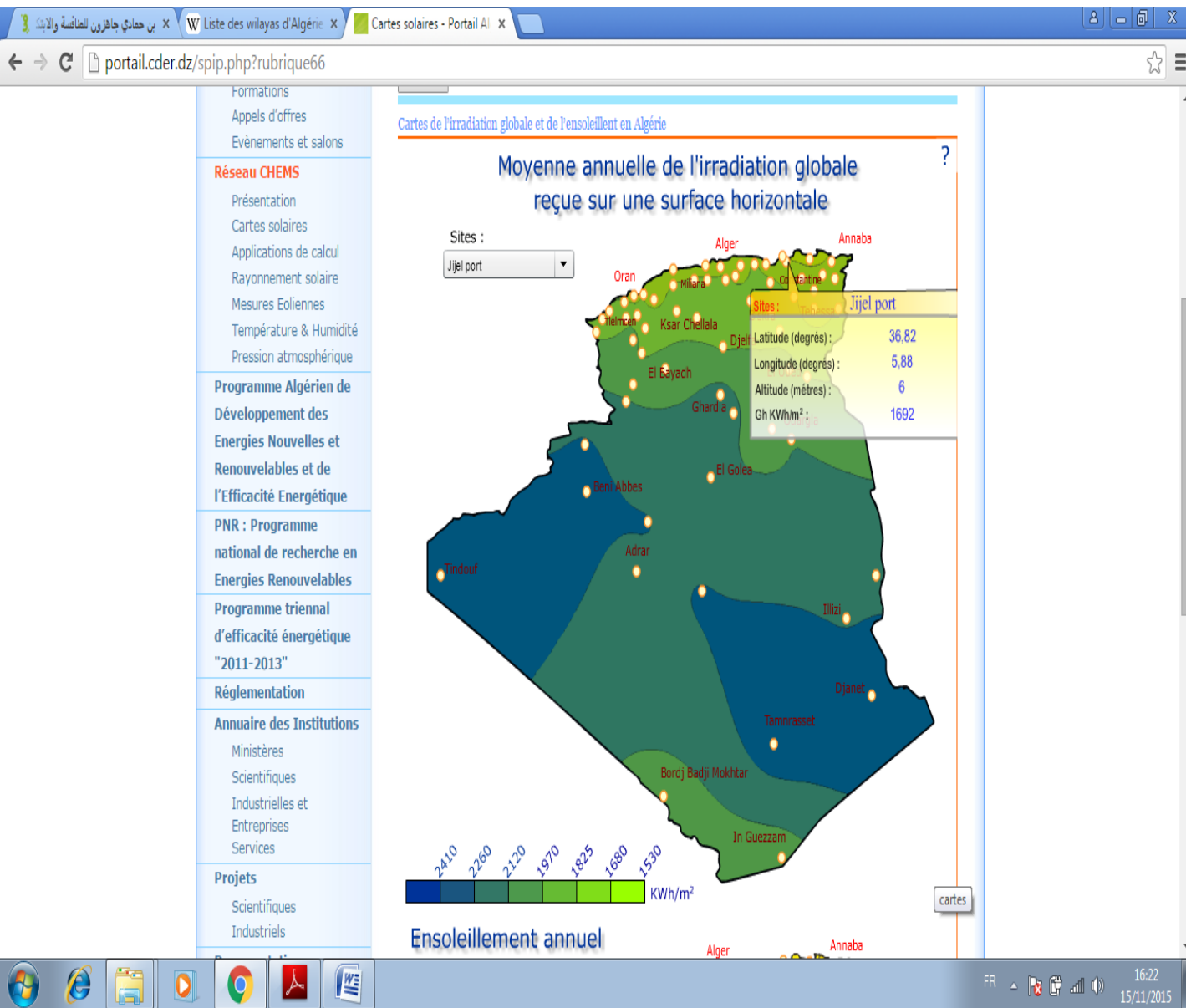
- 1- la latitude (éloignement de la ligne d'équateur);**
- 2- l'inclinaison du module par rapport au soleil;**
- 3- la température /module.**

Influence de quelques facteurs sur l'EPE

1- la Latitude: à Jijel (36-82 °Nord ; 5688 ° Est), il ya une exposition considérable au soleil :
2792heures



Jijel-ville reçoit, en moyenne, une puissance rayonnée de **1692 kWh/m²**



1 W correspond à l'énergie d'1 joule d'énergie fournie pendant 1 seconde.

1 joule est l'énergie qu'il faudrait fournir pour soulever une masse de 1 kg sur une hauteur de 10 centimètres, sur Terre.

Si cette masse de 1 kg est soulevée sur 10 centimètres en 1 seconde, alors la puissance est de 1 W.

Si cette même masse de 1 kg est soulevée sur 10 centimètres en 2 secondes, alors la puissance fournie est de 0.5 W (mais l'énergie fournie est toujours de 1 J).

1 kWh équivaut à la quantité d'électricité nécessaire pour faire allumer 01 ampoule de 100 watts de lumière pendant 10 heures. Synthèse bibliographique par Pr. A/Malek ROULA

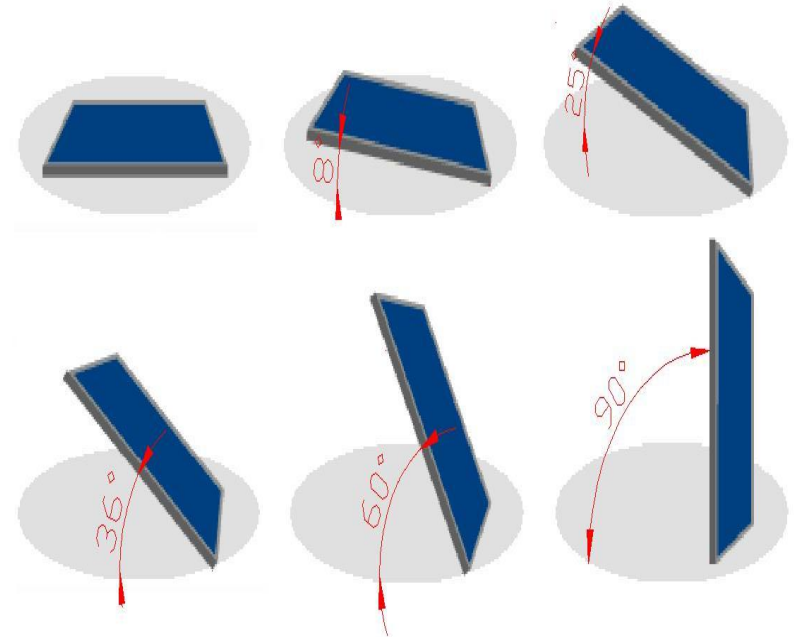
2- Effet de l'inclinaison des modules photovoltaïques

L'inclinaison correspond à la pente du module par rapport à l'horizontale, mesurée en ° :

- Une inclinaison de 0° signifie que le module est à plat.
- Une inclinaison de 90° signifie que le module est à la verticale.

Un module photovoltaïque produit un **maximum d'électricité** lorsque le **rayonnement incident est perpendiculaire** à la surface du panneau.

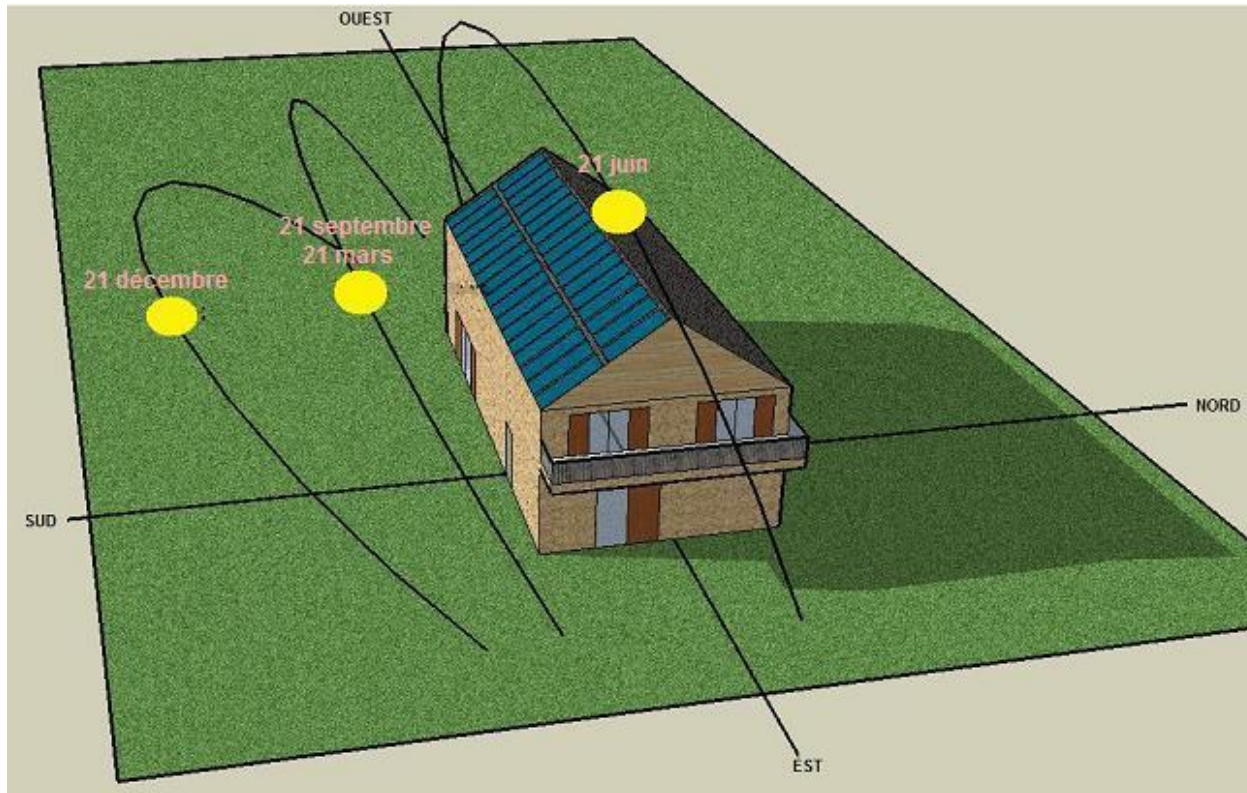
Or la position du soleil varie en fonction de la journée et des saisons.



2- Effet de l'inclinaison des modules photovoltaïques

Seul un système de suivi de la trajectoire du soleil (**SunTracker**) permet de maximiser le production du module.

Sur toiture, le module reste fixe avec une inclinaison et une orientation égales à celles de la toiture.

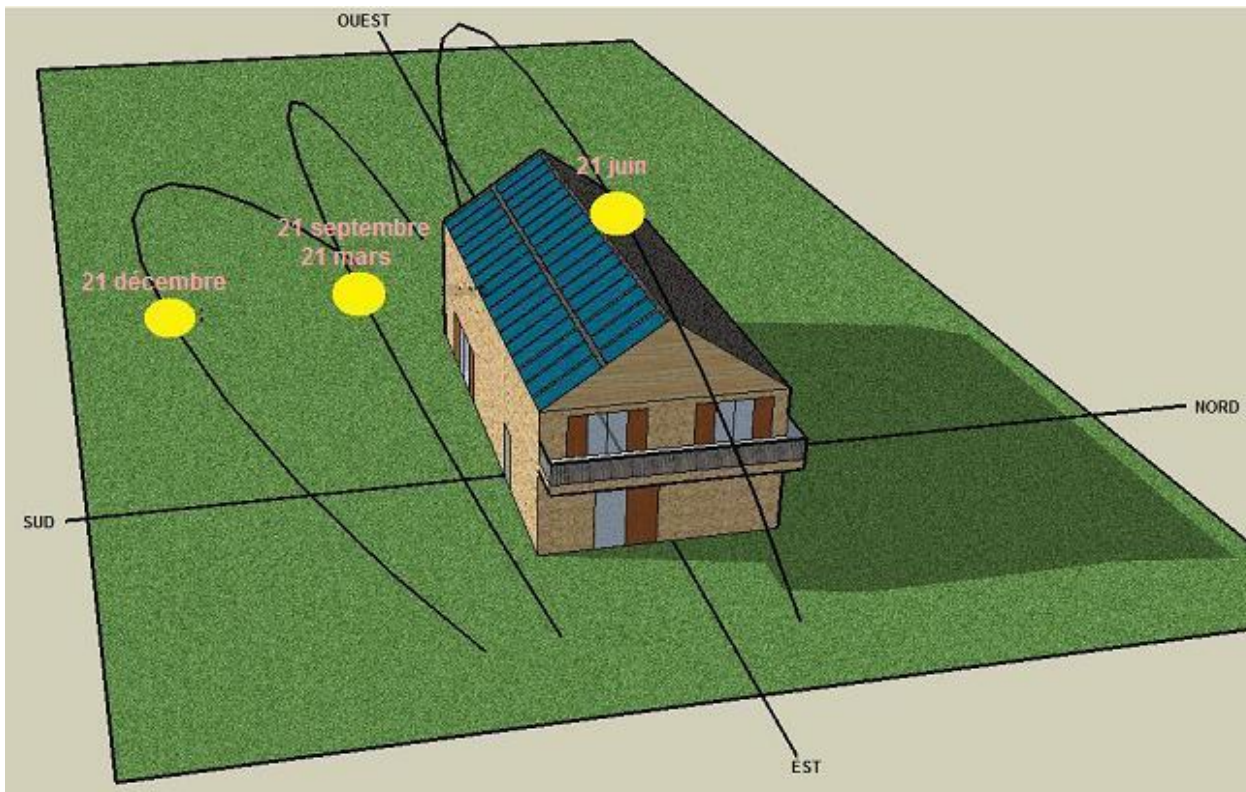


2- Effet de l'inclinaison des modules photovoltaïques

En hiver, le soleil est bas (le soleil est au plus bas le 21 décembre) par rapport à l'horizon, le module produira d'autant plus que son inclinaison est proche de 65° .

Au contraire, en été, le soleil est haut (le soleil est au plus haut le 21 juin) par rapport à l'horizon, le module produira d'autant plus que son inclinaison est proche de 20° .

Ainsi, un module photovoltaïque posé sur une toiture avec une inclinaison de 15° aura une production quasiment optimale pendant l'été et une production très faible pendant la période d'hiver.



Inclinaison optimale des modules suivant les latitudes

Latitude °Nord	Ville	Inclinaison optimale des modules photovoltaïques(°)
58 °	Stockholm	39 °
53 °	Hambourg	36 °
49 °	Paris	35 °
43 °	Marseille	34 °
38 °	Athènes	31 °
36-82 °	Jijel	???

Rq : en se rapprochant de l'équateur, l'inclinaison optimale baisse.

3- Effet de la température sur la cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont soumises à des températures : $[-10 / +70]^{\circ}\text{C}$.

Une cellule photovoltaïque convertit une énergie radiative (rayonnement) en énergie électrique avec un rendement compris en **5 % et 20 % selon la technologie**.

Le reste du rayonnement est convertit en grande partie sous forme de chaleur, la fraction résiduelle étant réfléchie. Ainsi, une cellule photovoltaïque mal ventilée voit sa température monter très rapidement.

Il apparaît que plus la température de la cellule augmente, plus la tension à vide (U_{co}) de celle-ci diminue.

$P = U.I$; la même règle s'applique sur la puissance : plus la température de la cellule augmente, plus la puissance de celle-ci diminue.

3- Effet de la température sur la cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont soumises à des températures : $[-10 / +70]^{\circ}\text{C}$.

En général :

a) **coefficient de température lié à la tension ($K_T(U)$)** : la tension U_{co} à vide diminue de 2 mV si sa température augmente de 1°C ,

soit une baisse de tension = - 0.3 %/ $^{\circ}\text{C}$;

b) **coefficient de température lié au courant, $K_T(I)$** : le courant augmente de 2 mA si la température augmente de 1°C ,

soit une augmentation de courant = +0.04 %/ $^{\circ}\text{C}$ (négligeable) .

Projet : ST2 EEA2 Dec

Caractéristiques du projet

Localisation : Ajaccio

Inclinaison : 17 °

Orientation : 0 °

Puissance photovoltaïque installée : 18 kWc

Mode d'intégration des panneaux en toiture : Allège photovoltaïque



Les tarifs d'achat

Les tarifs d'achat de l'électricité photovoltaïque sont déterminés par la Commission de Régulation de l'Energie (<http://www.cre.fr>). Ils baissent d'environ 2% tous les trimestres. Pour un projet photovoltaïque, le tarif d'achat, applicable pour les 20 ans de la durée du contrat d'achat, est fixé à celui de la date à laquelle la demande de raccordement électrique est effectuée (sous réserve que le dossier soit complet). Nous donnons ci-après les tarifs d'achat valables du 01/07/2015 au 30/09/2015.

<u>Puissance crête</u>	<u>Intégration au bâti</u>	<u>Intégration simplifiée au bâti</u>	<u>Non-intégrés au bâti</u>
Po inférieure à 9 kWc	0.258 €/kWh	0.14 €/kWh	0.063 €/kWh
Po compris entre 9 kWc et 36 kWc	0.14 €/kWh	0.14 €/kWh	0.063 €/kWh
Po compris entre 36 kWc et 100 kWc	0.133 €/kWh	0.133 €/kWh	0.063 €/kWh
Po supérieure à 100 kWc	0.063 €/kWh	0.063 €/kWh	0.063 €/kWh

Pour ce projet, le tarif d'achat applicable à la date du 15/11/2015 est de 0.14 € pour chaque kWh vendu.

Résultats de la pré-étude

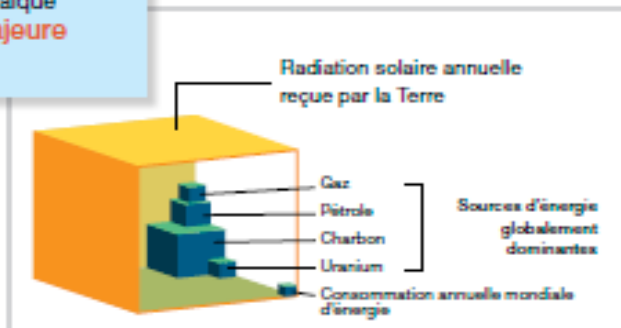
L'installation photovoltaïque produira et injectera dans le réseau électrique environ 20 349 kWh par an.

Les revenus issus de la vente de cette électricité s'élèvent à 2 849 €/an.

10 BONNES RAISONS

de passer à l'électricité solaire photovoltaïque

Grâce à ses nombreux avantages environnementaux et économiques, ainsi qu'à sa fiabilité avérée, le photovoltaïque s'affirme comme **une source majeure d'électricité**.



Source: Eco Solar Equipment Ltd.

1

Son carburant est gratuit.

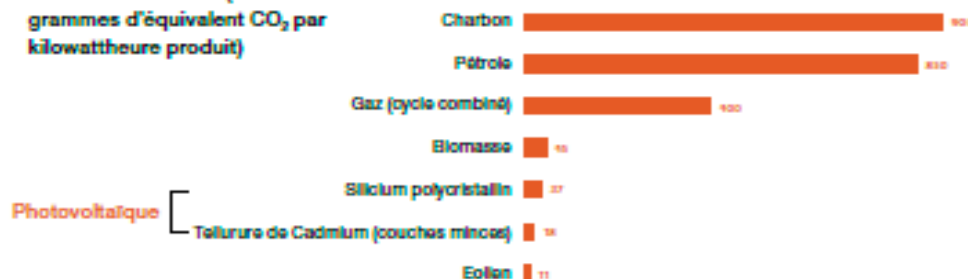
Le soleil est la seule ressource dont a besoin un panneau solaire. Et le soleil brillera jusqu'à la fin des temps. De plus, la plupart des cellules photovoltaïques sont fabriquées à base de silicium, un matériau abondant et non-toxique (second matériau le plus abondant sur Terre).

2

L'énergie solaire photovoltaïque ne génère ni bruit, ni émissions nocives, ni gaz polluants.

La combustion de ressources naturelles pour fabriquer de l'énergie engendre de la fumée, provoque des pluies acides, pollue l'eau et l'air. Cela génère aussi du dioxyde de carbone (CO₂), l'un des principaux gaz à effet de serre. L'électricité solaire utilise seulement l'énergie du soleil comme carburant. Elle ne crée aucun co-produit nocif et contribue activement à réduire le réchauffement climatique.

Gaz à effet de serre (en grammes d'équivalent CO₂ par kilowattheure produit)



Sources: Externet project, 2002; Kim and Dale, 2005; Fthenakis and Kim, 2006; Fthenakis and Kim, 2007; Fthenakis and Alamee, 2006

3

Les systèmes photovoltaïques sont très sûrs et d'une grande fiabilité.

L'espérance de vie d'un module solaire est d'environ 30 ans. La performance des cellules photovoltaïques est généralement garantie par les fabricants pour une durée de 20 à 25 ans. Au-delà, la puissance d'une cellule reste néanmoins supérieure à 80% de la puissance initiale. Le photovoltaïque est donc une technologie fiable sur le long terme. De plus, la fiabilité des produits est garantie aux consommateurs par des standards de qualité très élevés au niveau européen.

4

Les modules photovoltaïques sont recyclables et les matériaux utilisés pour leur production (silicium, verre, aluminium, etc.) peuvent être réutilisés. Le recyclage n'est pas seulement bénéfique pour l'environnement, il contribue également à réduire l'énergie nécessaire pour produire ces matériaux et ainsi à réduire leur coût de fabrication. Plus d'information sur le site www.pvcycle.org



6

L'énergie solaire photovoltaïque fournit de l'électricité aux zones rurales les plus isolées.

Les systèmes photovoltaïques apportent une valeur ajoutée aux zones rurales (en particulier dans les pays en développement où il n'y a pas de réseau électrique disponible). L'éclairage domestique, les systèmes de réfrigération des hôpitaux et le pompage de l'eau font partie des nombreuses applications possibles des systèmes non connectés au réseau. Les systèmes de télécommunications en zones isolées utilisent également des panneaux solaires.

5

L'énergie solaire photovoltaïque exige peu de maintenance.

Les modules solaires ne nécessitent pratiquement aucune maintenance et sont faciles à installer.



7

L'énergie solaire photovoltaïque peut être intégrée de manière esthétique dans les bâtiments (BIPV).

Les modules solaires peuvent couvrir toits et façades, contribuant ainsi à l'autonomie énergétique des bâtiments. Ils sont silencieux et peuvent être intégrés de manière très esthétique. Les législations européennes sur les bâtiments sont en cours de révision afin d'intégrer des impératifs d'énergies renouvelables pour les édifices publics et les logements. Celles-ci permettent d'accélérer le développement des éco-bâtiments et des bâtiments à énergie positive (E+ Bâtiments) et ouvrent la voie vers une meilleure intégration des systèmes photovoltaïques dans le bâti. Plus d'information sur www.pvsunrise.eu



Cellules photovoltaïques utilisées comme pare-soleil dans un bâtiment de bureaux au Royaume-Uni



Système photovoltaïque intégré à une façade



Façade semi-transparente



Système photovoltaïque intégré à une façade

8

Le temps de retour énergétique d'un module diminue constamment.

Cela signifie que le temps mis par un module photovoltaïque pour générer autant d'énergie qu'il en a fallu pour le produire est très court ; il varie entre 1,5 et 3 ans. Sur sa durée de vie, un module produit donc entre 6 et 18 fois plus d'énergie qu'il n'en faut pour le fabriquer.

9

L'énergie solaire photovoltaïque permet la création de milliers d'emplois. Avec une croissance annuelle moyenne de 40% ces dernières années, le secteur photovoltaïque contribue de plus en plus à la création de milliers d'emplois en Europe et dans le monde.

10

L'énergie solaire photovoltaïque contribue à améliorer la sécurité de l'approvisionnement énergétique de l'Europe.

Pour répondre à 100% de la demande européenne en électricité, il suffirait de recouvrir 2% de la superficie totale de l'Europe de panneaux solaires. Le photovoltaïque peut donc jouer un rôle important dans l'amélioration de la sécurité de l'approvisionnement énergétique de l'Europe.

Ressources bibliographiques :

- <http://www.photovoltaique.guidenr.fr/sommaire-cours-photovoltaique.php>
- <http://portail.cder.dz>
- www.energie-developpement.blogspot.com
- Evaluation de l'influence de l'inclinaison des modules photovoltaïques sur la production d'énergie d'un système hybride
- H. Hertz, *Annalen der Physik*, 33, 1887, p. 983
- Manjit Kumar, *Le Grand Roman de la physique quantique*, Flammarion, 2012, 636 p. (ISBN 978-2-0812-8276-6)
- « The Nobel Prize in Physics 1921 [Fondation Nobel](#), 2010 « for his services to Theoretical Physics, and especially for his discovery of the law of the photoelectric effect »)
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Cellule_photovolta%C3%AFque
- Christian Ngô ; *L'Énergie, ressources, technologies et environnement*, Dunod CEA, 2002

• M. Adouane & al., *Revue des Energies Renouvelables SIENR'14 Ghardaïa (2014) 87 – 92* 87

- [1] J.D. Mondol, Y.G. Yohanis and B. Norton, 'Solar Radiation Modelling for the Simulation of Photovoltaic System', *Renewable Energy*, Vol. 33, N°5, pp. 1109 - 1120, 2008.
- [2] <http://www.tpepanneauxsolaires.fr/rentabilite>
- [3] S. Silvestre, 'Review of System Design and Sizing Tools', in *Practical Handbook of Photovoltaics*, Amsterdam: Elsevier Science, pp. 543 – 561, 2003.
- [4] I. Reda and A. Andreas, 'Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications', *Solar Energy*, Vol. 76, N°5, pp. 577 - 589, 2004.
- [5] R. Perez, P. Ineichen, R. Seals, J. Michalsky and R. Stewart, 'Modeling Daylight Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance', *Solar Energy*, Vol. 44, N°5, pp. 271 - 289, 1990.
- [6] M. Capderou, 'Atlas Solaire de l'Algérie, Modèles Théoriques et Expérimentaux', Vol. 1, T1, Office des Publications Universitaires, EPAU, Algérie, 375 p., 1987.
- [7] A. Mefti, M.Y. Bouroubi et A. Khellaf, 'Analyse Critique du Modèle de l'Atlas Solaire de l'Algérie', *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 2, N°2, pp. 69 - 85, 1999. M. Adouane et al. 92 [8] A. Labouret, 'Energie Solaire Photovoltaïque', Ed. Dunod, France, 302 p., 2003. [9] Friedr Vieweg, Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 'Eléments des Projets de Construction', Dunod, Paris, 1996, pour la 7ème Edition Française.
- [10] Y. Himri, A. Boudghene Stambouli, B. Draoui and S. Himri, 'Techno-Economical Study of Hybrid Power System for a Remote Village in Algeria', *Energy*, Vol. 33, N°7, pp. 1128 – 1136, 2008.
- [11] S. Rehman, 'Prospects of Wind Farm Development in Saudi Arabia', *Renewable Energy*, Vol. 30, N°3, pp. 447 – 463, 2004.
- [12] A. Khedim, 'L'Energie Solaire, Utilisation Thermique et Photovoltaïque', ANEP, 359 p., 2005. [
- 13] H.R. Ghosh, N.C. Bhowmik and M. Hussain, 'Determining Seasonal Optimum Tilt Angles, Solar Radiations on Various Oriented, Single and Double Axis Tracking Surfaces at Dhaka', *Renewable Energy*, Vol. 35, N°6, pp. 1292 - 1297, 2010.
- [14] <http://tpe-panneaux-solaires-.e-monsite.com/pages/ii-le-rendement-d-un-panneau-solaire-photovoltaique.html>
- [15] A. M'Raoui, S. Mouhous, A. Malek et B. Benyoucef, 'Etude Statistique du Rayonnement Solaire à Alger', *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 14 N°4 pp. 637 – 648, (2011).