

# Graphes photovoltaïques

Avril 2014

## Objectif

Le rendement réel d'une toiture solaire est intéressant à connaître, ne serait-ce que pour détecter les baisses liées aux salissures.

A raison d'une valeur toutes les 10 minutes, soit 6 valeurs à l'heure, 144 valeurs par jour, 4300 valeurs par mois, 50 000 valeurs par an, il est difficile d'appréhender les variations de l'énergie produite au cours du temps.

L'objectif est de voir d'un seul coup d'oeil les variations sur une journée et les comparer tout au long de l'année, puis d'une année sur l'autre.

Il s'agit donc de représenter visuellement l'énergie produite selon un graphe à 3 dimensions :

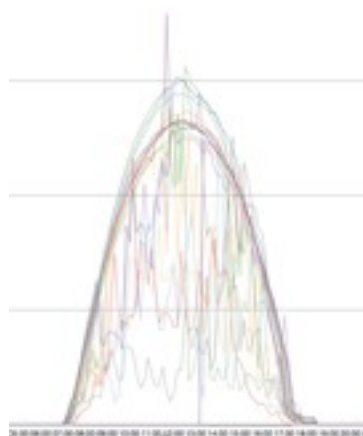
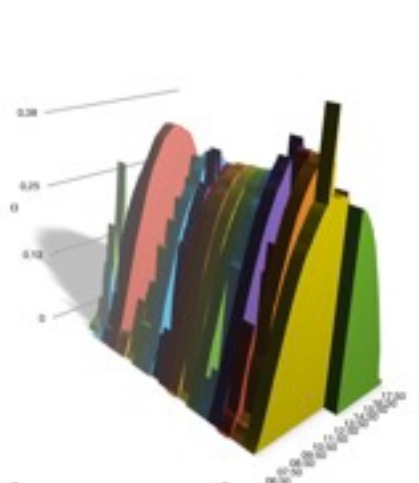
1 : la journée par tranche de 10 minutes

2 : l'année, jour par jour

3 : le nombre de kilowatt produit dans chaque tranche de 10 minutes

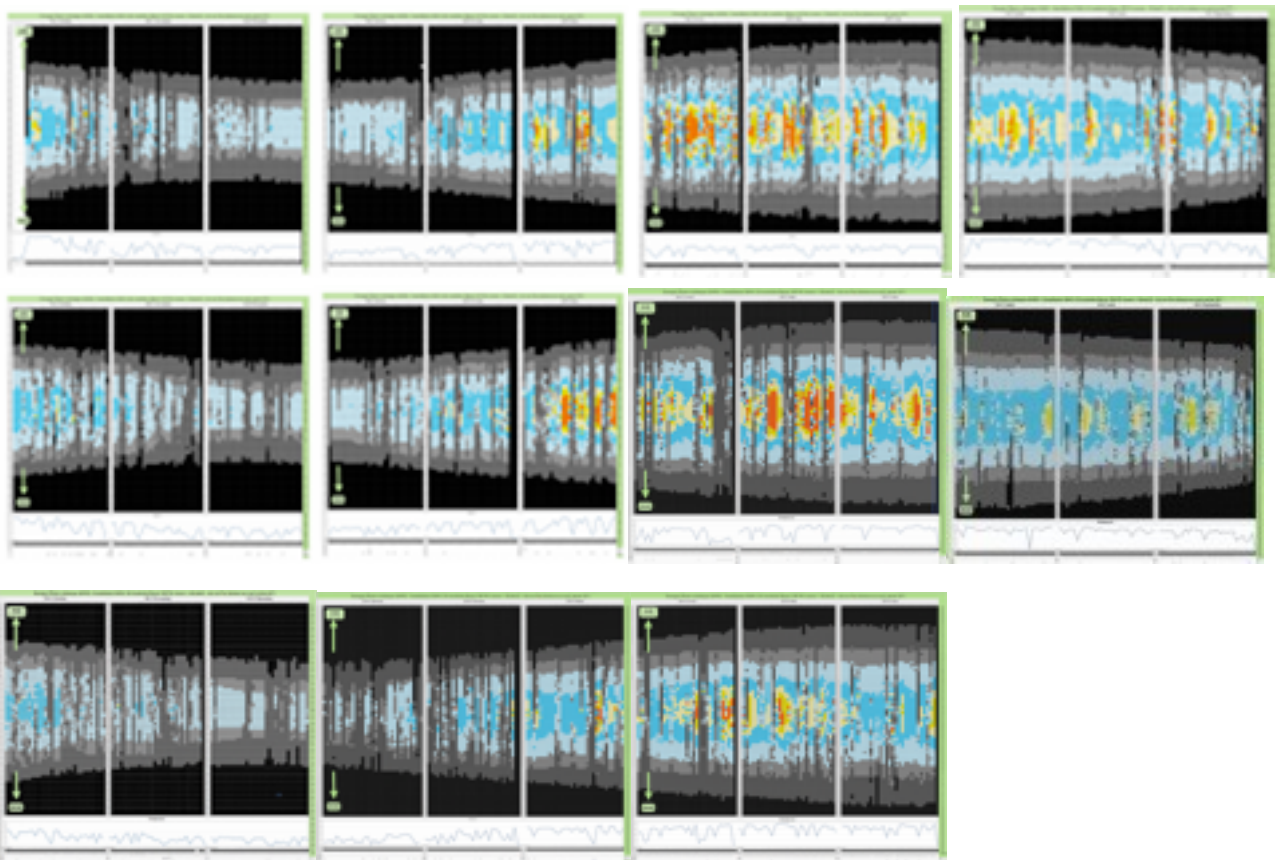
Les données sont prises en sorties de l'onduleur, en valeurs cumulées. Elles sont traduites en valeurs 10 minutes par simple soustraction entre valeurs successives.

Les graphes en 3 dimensions selon 3 axes sont souvent proposés, mais la vue perspective qui en résulte se prête mal à une analyse fine.



Le graphe proposé est un graphe à plat, avec la 3ème dimension sous forme de couleurs apparentées aux couleurs de la journée :

- Noir : pour une production nulle (la nuit)
- Gris foncé :  $P < 100W$  (exemple : lever ou coucher du soleil)
- Gris clair :  $P < 200W$  (exemple : ciel de pluie)
- Bleu clair :  $P < 300W$  (exemple : soleil à  $30^\circ$  de l'horizon)
- Bleu soutenu :  $P < 350W$  (exemple : soleil légèrement voilé)
- Jaune clair :  $P < 380W$  (exemple : soleil au zénith en février)
- Jaune soutenu :  $P < 400W$
- Rouge :  $P > 400W$  (exemple : soleil est au zénith en juin)



Les seuils de couleur pourraient évoluer pour satisfaire une analyse très spécifique, par exemple pour étudier des corrélations avec la pluie. Cependant, les valeurs numériques apparaissent dans chaque cellule.

Le graphe va de 4h du matin à minuit. En bas du graphe apparaît :

- la production totale de chaque jour, complétée par la production du mois et celle du trimestre.
- la pluviométrie (et la neige).

Le graphe trimestriel est sous forme .pdf qui a l'avantage de d'un zoom immédiat. En petit, le graphe peut être accolé aux autres graphes du reste de l'année. Les graphes annuels ainsi obtenus peuvent se superposer.

Les graphes seront complétés dans le futur au fur et à mesure de la production. Bien sûr les données sont disponibles par ailleurs en format .xls trimestriel pour satisfaire d'autres exigences statistiques.

## Analyse

La durée quotidienne de production suit la durée du jour.

L'incidence du soleil a une forte influence. Il faut que le soleil soit environ à 30 degrés au-dessus de l'horizon sud-est pour que l'installation produise significativement. Une inclinaison plus importante de la toiture n'apporterait rien tant que le soleil est hors d'un grand quart sud. Symétriquement, la production cesse lorsque le soleil chute en-dessous de 30° au-dessus de l'horizon sud-ouest. Sur une journée ensoleillée, la production est ainsi quasi nulle 2 heures en début de journée et 2 heures en fin de journée.

Les nuages cassent la production même en plein jour, y compris les traînées blanches des avions. Il serait intéressant d'en faire un bilan précis dans les zones où croisent de nombreux avions de ligne. En première estimation, la perte due aux avions sur une journée ensoleillée est de 1 à 2%.

En Provence, le ciel est rarement plombé par des nuages bas et sombres qui cassent la production.

La pluie un peu forte du 18 mars a lavé l'installation et le mistral des jours suivant a gardé l'atmosphère limpide.

La pluie faible du 23 mars a déposé des salissures sur l'installation. Il serait intéressant d'approfondir le rôle des pluies sales et leur résorption dans le temps (la rosée du matin contribue au nettoyage). En première estimation, ces salissures pourraient coûter 5% chaque jour.

En janvier, la production dure 5h avec un rendement d'environ 2/3 de la puissance sous atmosphère limpide. Le rendement reste très faible très longtemps en début et fin de journée alors qu'il fait en réalité plein jour. Les nuages font s'écrouler la production comme le montre le graphique complémentaire.

***L'enseignement majeur est que les panneaux sont sensibles exclusivement au rayonnement direct du soleil. Le plein jour sans soleil ne produit pas.***

A noter que la neige a occulté totalement le panneau jusqu'à midi le 31 janvier et presque totalement dans l'après midi.

## Rendement maximal

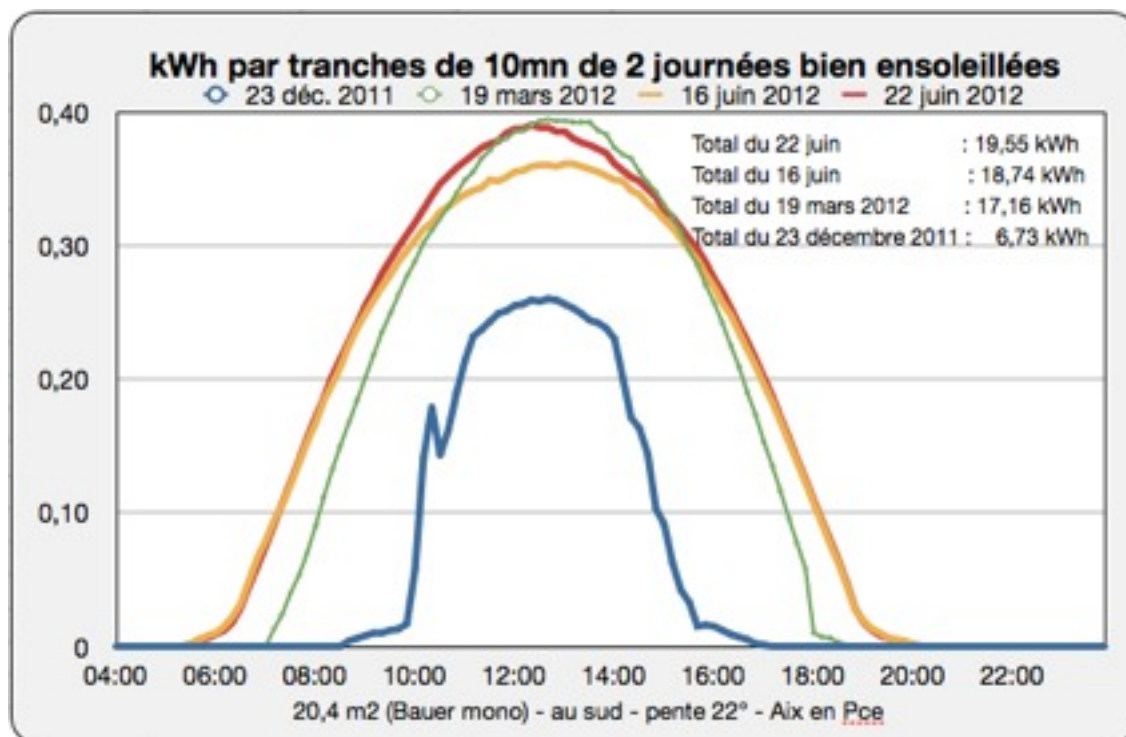
Pour fixer les idées, en cherchant des journées bien ensoleillées, l'installation peut produire au mieux :

7 kWh au solstice d'hiver

17 kWh au début du printemps

21,4 kWh à mi-mai

18,7 kWh au solstice d'été par forte chaleur et salissures



Les nuages de décembre 2012 ont divisé la production possible par 1,4. Si aucun nuage n'était venu à troubler le ciel en décembre, la production du mois aurait dépassé les 230 kWh contre 160 kWh réellement produits. En novembre 2011, elle aurait dépassé les 300 kWh contre 187 dans la réalité.

Sur la base des kWh/jour maxima théoriques respectivement de Janvier à décembre : 9;13;16;18;20;20;19;18;16;14;11;7,5 : Sur une année sans aucun nuage, la production serait d'environ 5500 kWh contre 4400 kWh dans la réalité.

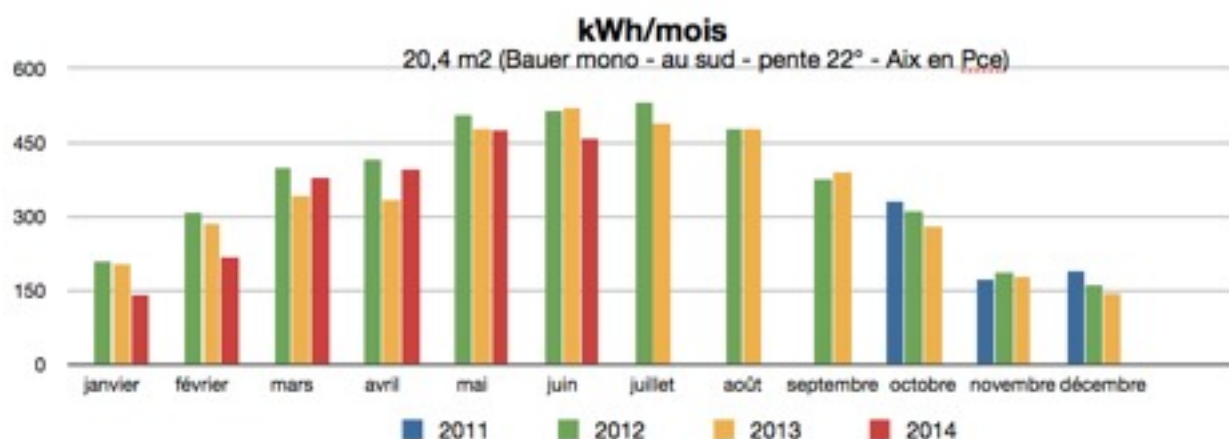
**Le maximum obtenu est de 0,46 kWh sur 10mn, soit 2,76 kW en puissance instantanée, contre 2,96 kWc théorique, soit environ 15% de pertes.**

**La température et les salissures peuvent faire chuter le rendement d'environ 15% au maximum du plein soleil.**

**Les nuages provencaux font chuter la production d'environ 20%.**

## Variation sur l'année

Sur un an, la production suit l'évolution de la durée du jour, en y ajoutant les aléas nuageux. Ici, le mois de novembre a été perturbé, comme on peut le voir sur le graphique général où, par exemple, le 6 novembre, l'installation a produit moins de 2kWh.



Globalement, sur le dernier trimestre 2011, il apparaît que la production commence plus tard qu'elle ne finit plus tôt : 80 mn en moins le matin contre 70mn en moins le soir. Le même phénomène apparaît symétriquement au premier trimestre 2012. La lisière d'arbres provoque des ombres dissymétriques le matin et le soir. Ce rideau empêche l'analyse du rendement en fonction de la température de rayonnement solaire dont la couleur n'est pas la même le matin et le soir.

Le graphique général permet aussi de repérer facilement une défaillance de l'installation, par exemple le 16 novembre, où l'installation a été hors circuit.

D'une année sur l'autre, on note un écart de 18% en décembre et de 16% en mars.

En 2014, janvier et février ont eu une mauvaise météo avec 1/3 d'énergie en moins. L'impact est moindre que si cela avait lieu en milieu d'année, comme au mois de juin, avec 10% en moins (avec probablement des panneaux trop poussiéreux).

## Economie

L'installation 3kWc (2,96kWc, soit 20,4m<sup>2</sup> en réel) a été confiée après devis de 15640 € TTC à l'entreprise Geophoton (Aubagne) et payée comptant.

Le crédit d'impôt a été de 50%, versé sur le rôle de l'année d'installation.

La facture de la première année d'exploitation a été de 2038€ (4430 kWh), dont il faut retirer 60€ de location de compteur, payée au mois anniversaire de la mise en exploitation. Le contrat de rachat par EdF à 0,46€ du kWh est valable pour 20 ans, avec indexation sur l'inflation.

Sauf panne, l'installation devrait donc être amortie en moins de 4 ans. Belle aubaine, on n'en demandait pas tant. Attention cependant, car l'installation est optimisée : orientée au sud, sans ombre dans une région ensoleillée.

Parallèlement, la consommation EdF pour une maison récente (Qualifelec) , chauffage et eau chaude électriques, de 110m<sup>2</sup> sur 2 niveaux, habitée par un couple, et quelques enfants lors des vacances, est de 12500 kWh moyenne annuelle (1100€). Le photovoltaïque couvre environ le tiers des besoins énergétiques de la maison.

A noter qu'un voisin, équipé de façon similaire, a été démarché à domicile sur la base suivante : aucun frais d'installation et transfert de propriété au bout de 12 ans. Devinette : l'installation étant amortie en 4 ans, à qui profite les 8 années d'exploitation dont mon voisin ne verra pas le premier centime (soit environ 16000€). Belle aubaine pour le banquier qui est derrière tout cela.

*Le mécanisme de promotion du photovoltaïque ne semble pourtant pas avoir eu un grand impact sur la filiaire (faillites...).*

*On s'attendrait plutôt à une aide orientée sur la recherche de panneau avec un meilleur rendement, y compris en l'absence de soleil et sur l'optimisation des procédés d'installation sur l'ancien et le neuf (avec la difficulté d'intégration architecturale dans un pays fiers de son patrimoine en ardoise ou en tuile). Si l'on reste très attaché aux toits à double pente, il faut penser à faire évoluer notre sens esthétique vers des toits à simple pente pour doubler la surface installée.*

*En particulier, on pourrait réfléchir à des toitures modulaires assurant la ventilation naturelle arrière des panneaux solaires en même temps que l'isolation (avec étanchéité et respiration) des combles et avec gouttières et outils de nettoyage faciles d'usage.*

*On peut aussi espérer que l'électricité continue puisse être stockée dans les maisons pour que le bon rendement estival serve à la forte consommation hivernale.*



# Hypothèses

## Potentialité d'une maison individuelle

En transformant la toiture à 2 pentes en une toiture à une pente, la surface solaire pourrait être d'environ 130m<sup>2</sup> si on prévoit une visière de 1mX10m et l'augmentation de la surface due à l'inclinaison du toit, soit 6 fois la surface solaire actuelle. En mettant des panneaux d'un rendement 1,5 fois plus élevé pour tenir compte des progrès technologiques, la maison pourrait produire environ 40 000 kWh annuels, largement plus que les 12500 kWh consommés par une maison individuelle normalement isolée (sans VMA double-flux, ni triple vitrage, ni combles, ni isolant externe, et sans renforcement d'isolation dans le vide sanitaire).

## Consommation des transports individuels :

Si une voiture consomme 60kWh à l'heure (environ 7l au 100km), et qu'une famille utilise 2 voitures pendant 1h chaque jour (1 heure de domicile-travail aller-retour pour l'une et 1 heure de déplacements divers pour l'autre), elle consommera 120kWh chaque jour, soit environ 45 000 kWh dans l'année.

Cependant, 1/3 seulement de l'énergie consommée sert à l'avancement (un autre tiers s'en va dans les gaz d'échappement et le dernier tiers dans l'eau du radiateur).

On peut imaginer qu'une paire de véhicules électriques rechargés directement par le soleil (panneaux solaires et batterie interne à haut rendement charge-décharge), consommera annuellement 15 000 kWh, 25 000 kWh en admettant un bon peu de pertes.

Si l'une des voitures est un scooter électrique qui consomme en gros 6 fois moins qu'une voiture, l'énergie consommée en transport ne sera plus que de 15000 kWh

Si c'est un vélo électrique, utilisé une heure par jour, à 200Wh, soit en plus de la santé, 72 kWh par an, l'énergie totale consommée dans la maison et dans ses transports par un foyer sera de l'ordre de 25 000 kWh, largement moins que les 40 000 kWh potentiellement productibles sur le toit d'une maison.

*Un grand toit solaire à simple pente pourrait couvrir les besoins énergétique d'une famille chez elle et lors de ses déplacements en véhicule électrique.*



## Conclusions (en 2013!)

Il s'agit là d'un calcul théorique, réfutable sans doute point par point. Mais on peut demander au sceptique de regarder le problème dans sa globalité et non dans chaque détail. Une toiture solaire pourrait couvrir les besoins en énergie de vie et de transports d'une famille, aux conditions suivantes :

- une toiture à une seule pente totalement solaire
- moins de 2 heures de transport par jour en voiture électrique pour l'ensemble de la famille
- une gestion complexe du système de production-distribution sur une grande échelle géographique.

Le calcul reste à faire pour des petits immeubles, dont l'isolation obéit à d'autres règles et dont les habitants ont un rapport différents à leurs transports. Les appartements mutualisent l'isolation thermique et les déplacements sont (devraient !) être essentiellement de proximité ou en transport en commun.

L'affirmation péremptoire de l'utopie du solaire n'est que péremptoire<sup>1</sup>. Que le solaire soit en 2010 une technologie inadaptée est tout à fait juste. Mais dans tous les domaines technologiques qui fonctionnent aujourd'hui, il y a eu des périodes de tâtonnements. A l'époque du premier véhicule à vapeur, personne n'aurait pu imaginer le trafic automobile d'aujourd'hui, à l'époque de la première bombe nucléaire, qui aurait pu imaginer que 70% de l'électricité française serait produite par la fusion de l'atome. Hubble n'aurait pas existé sans la découverte du laser...

Il reste donc de gros progrès à faire, technologiques et sociaux pour que le soleil couvre nos besoins énergétique.

Sans parler de tous les efforts que l'on peut réaliser sur le cadre de vie : rapprocher le travail du domicile ; remettre les commerces dans les quartiers ; utiliser le vélo ou le vélo électrique de façon habituelle.

Sans parler des autres sources d'énergie solaire :

- l'éolien qui vient du vent, lui-même produit par l'action du soleil qui réchauffe certaines masses d'air plus que certaines autres. On peut encore rester sceptique face à la dégradation environnementale des parcs éoliens actuels et face à l'irrégularité des

---

<sup>1</sup> Tous les foyers n'auront pas 120m<sup>2</sup> de toiture au sud ; tous les travailleurs seront toujours à 10km de leur foyer et aucun n'aura de vélo électrique ; les rendements solaires ne dépasseront jamais 15% et le stockage de l'énergie aura toujours un rendement de 30% seulement... Les pessimistes ne seront jamais de bons futurologues. Les optimistes peuvent espérer changer nos styles et nos cadres de vie et nos chercheurs peuvent trouver des solutions... qui sont autant d'emplois et de façon de faire croître le PIB...

vents qui nécessite des adaptations technologiques complexes pour le stockage et la mise en réseau.

- l'hydrolien qui vient aussi du soleil avec les marées, les courants, le différentiel de température entre fond et surface ou avec le vent qui produit la houle (ou les tempêtes). La mer reste un milieu hostile à l'électricité, dont on sait de mieux en mieux se prémunir. Reste à maîtriser l'acheminement sur de longues distances, de préférence sans pylônes disgracieux et sans rayonnements électromagnétiques dont on a pas encore évalué la nocivité.
- la biomasse, autre forme d'énergie solaire, mais qui ne doit pas concurrencer la production de nourriture, autre source d'énergie solaire bien plus essentielle à l'homme que les kWh.
- les micro-algues productrices d'huiles ou d'hydrogène, autre piste à surveiller.

Enfin, le stockage domestique de l'électricité sera peut-être résolu un jour. En attendant, il faut compter avec le réseau de distribution existant qui reçoit l'énergie solaire non consommée sur place et fournit l'énergie quand le soleil est absent, le tout sans grande perte (a priori. Le calcul du rendement de ce système est délicat, car on en identifie difficilement les paramètres).

L'énergie nucléaire reste pour l'instant incontournable, mais ses contraintes génèrent des coûts en constante ré-évaluation. Même les prometteuses centrales au thorium ne pourront se passer du toxique plutonium nécessaire à leur amorçage.

## Information accessoire

Par ailleurs - sans lien direct avec l'installation solaire - il s'avère que les gouttières alu, profilées et découpées sur place par l'installateur, sont moins chères (installation comprise) et moins laides que le PVC.

1116€ TTC pour 2 gouttières de 10,50m, 2 gouttières de 3m, 1 descente de 6m et 3 descentes de 3m,

soit : 27m horizontal et 15m vertical.

