

# L'énergie solaire - Historique



Découverte de l'effet photovoltaïque en 1839 par le physicien français Alexandre Edmond Becquerel



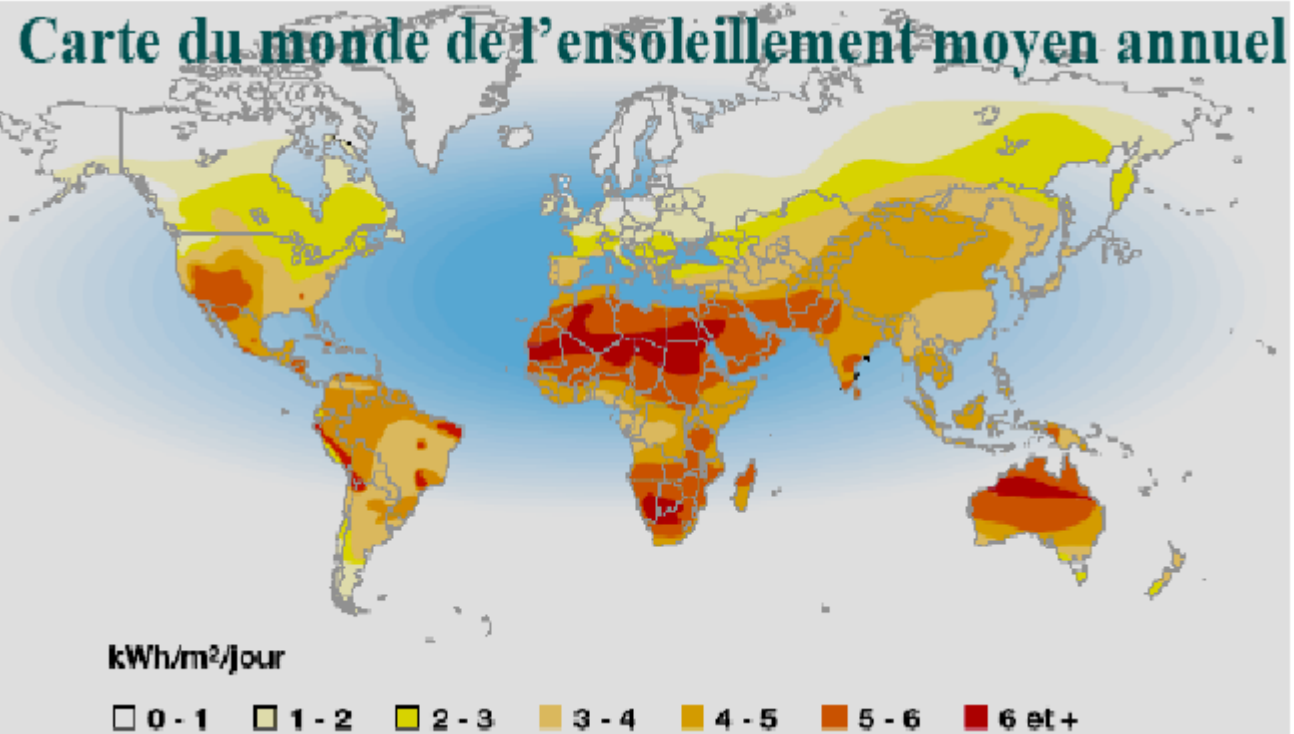
Le premier véritable panneau solaire, avec un rendement de 6%, est développé en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell.



Raisons de son essor

- Environnement, réchauffement climatique
- Crise du pétrole

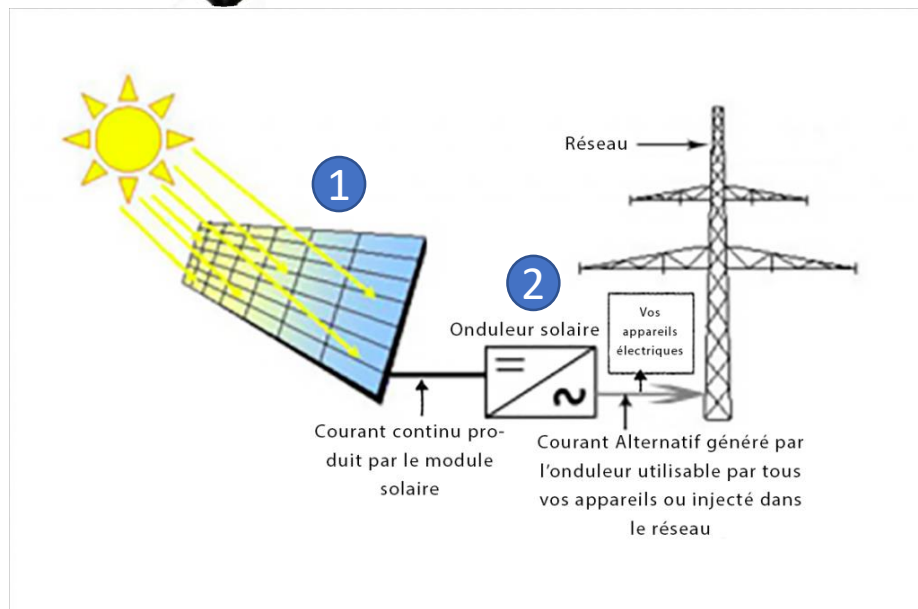
En 1 heure, l'énergie solaire captée par la terre pourrait suffire à couvrir les besoins énergétique mondiaux pendant 1 an.



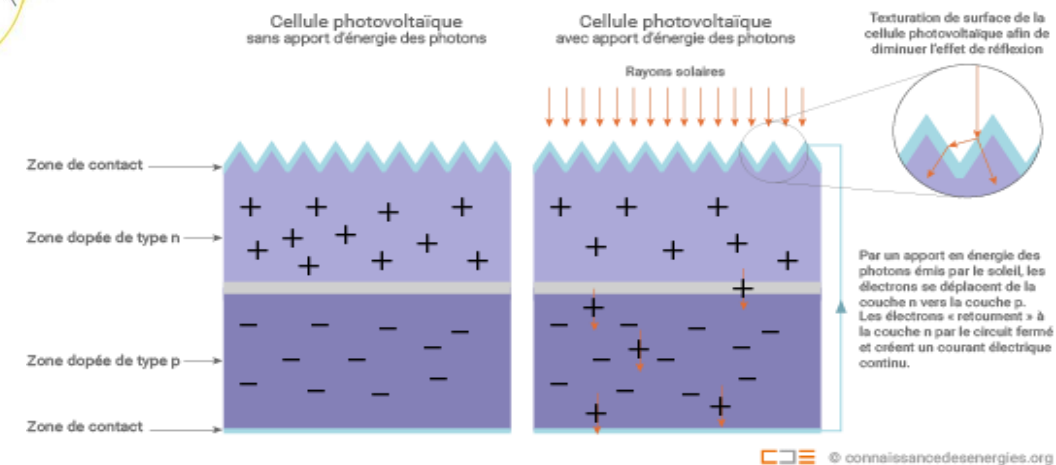
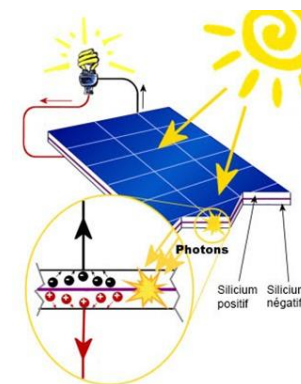
# L'énergie solaire - Principe



L'énergie solaire est propre, n'émet aucun gaz à effet de serre et sa matière première, le soleil bien que distant de plus de 150 millions de kilomètres de nous, est gratuite, inépuisable et disponible partout dans le monde.

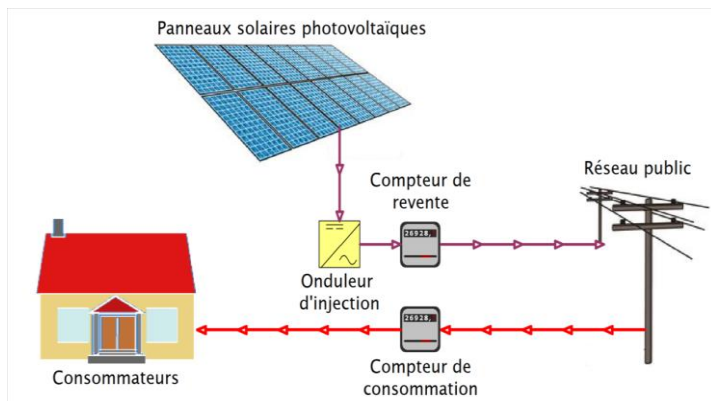


- 1 Les panneaux solaires convertissent directement la lumière en courant électrique continu.
- 2 L'onduleur permet ensuite de transformer l'électricité obtenue en courant alternatif compatible avec le réseau.



Le fonctionnement de la cellule photovoltaïque est fondé sur les propriétés de semi-conducteurs qui, percutés par les photons, mettent en mouvement un flux d'électrons

# Valorisation de la production d'EnR solaire PV



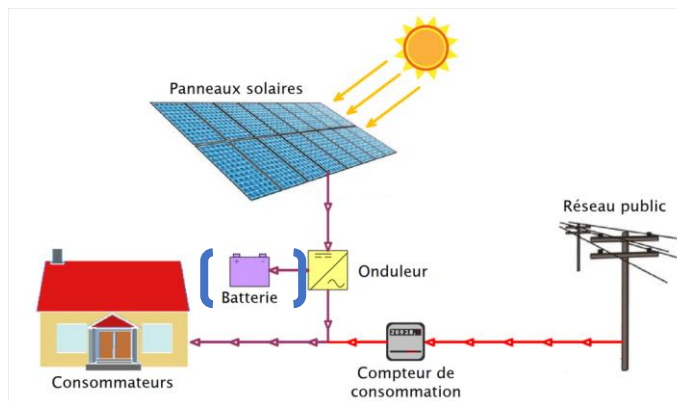
## Production solaire en revente totale

Production totalement revendue au fournisseur d'électricité public.

Production comptabilisé séparément de la consommation au travers d'un compteur dédié.

Le prix de rachat est fixa par contrat entre le producteur (le propriétaire) et le fournisseur d'énergie.

Largement promu par les pouvoir publics par le biais d'incitations fiscales et de tarifications de rachat très élevées dans les années 2000, c'est aujourd'hui moins intéressant.

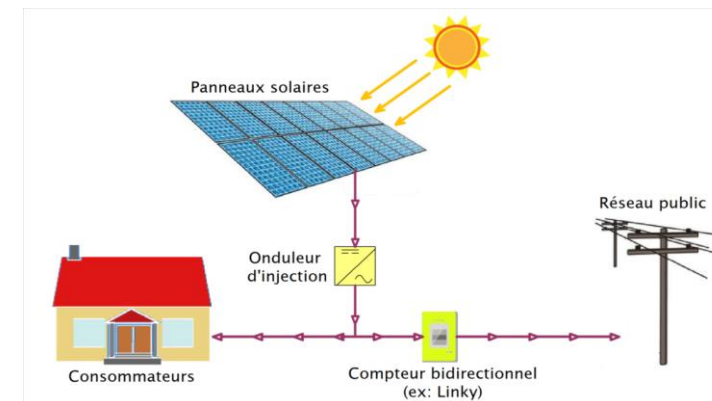


## Production solaire en autoconsommation directe

L'énergie produite sera consommée par l'utilisateur, sous réserve qu'au moment de la production il y ai des consommateurs connectés.

Si à l'instant T les consommateurs tirent une puissance supérieure à la production solaire, alors l'intégralité de la puissance solaire est consommée et le seul le complément provient du réseau public.

Par contre si la puissance consommée par les consommateurs est inférieure à la puissance solaire, alors le surplus de production repartira vers le réseau public gratuitement.



## Production solaire en autoconsommation avec revente

Comme pour l'autoconsommation directe, l'énergie produite sera consommée par l'utilisateur et si à l'instant T les consommateurs tirent une puissance supérieure à la production solaire, le complément provient du réseau public.

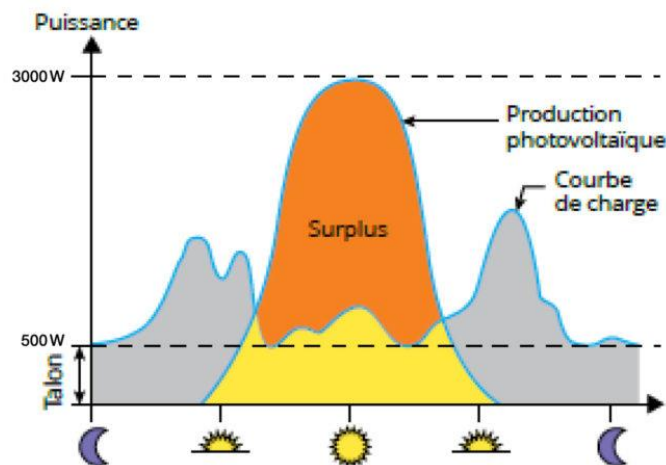
Par contre si la puissance consommée par les consommateurs est inférieure à la puissance solaire, alors le surplus de production est revendu au fournisseur d'électricité public.

Dans ce cas, l'installation est raccordée au réseau avec un seul compteur Linky qui permet de compter dans les deux sens (production et consommation).

# Compatibilité entre production et consommation



La rentabilité d'une installation photovoltaïque en autoconsommation dépend de la capacité à consommer la production photovoltaïque (taux d'autoconsommation) et de l'optimisation de l'éventuel surplus.



$$\text{Taux d'autoconsommation} = \frac{\text{Production utilisée}}{\text{Production totale}} = \frac{\text{Yellow Box}}{\text{Orange Box} + \text{Yellow Box}}$$

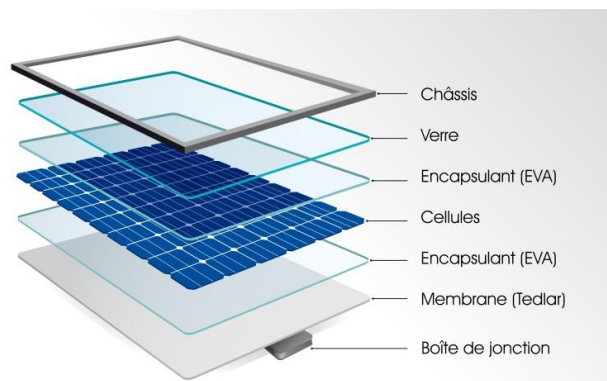
Exemple d'autoconsommation photovoltaïque (Source : AQC) : une maison qui aurait une consommation électrique représentative, avec un talon de consommation minimale d'environ 500W, pourrait autoconsommer environ 30 à 50 % de la production d'une centrale photovoltaïque.

Plusieurs pistes pour optimiser l'installation :

- Diminuer le nombre de panneaux, et ainsi être en autoconsommation totale. *L'installation devient plus simple, sans contrainte de surplus, mais la production s'en trouve d'autant diminuée.*
- Valoriser le surplus : à l'aide de moyens de stockage (batteries, ballon d'eau chaude, ...), ou d'une gestion adaptée de la consommation par rapport au photovoltaïque. *Ces solutions permettent d'améliorer le taux d'autoconsommation, mais sont souvent très coûteuses.*
- Vendre le surplus : il est possible de vendre à tarif fixé, inférieur au tarif d'électricité, la production photovoltaïque. *Ainsi les panneaux produiront au maximum de leur utilisation, et électriquement, la production ira au plus court*
- Vendre la totalité de l'électricité produite, via un deuxième compteur. *Lorsque le taux d'autoconsommation est faible, il est parfois plus intéressant de valoriser l'ensemble de la production à un tarif fixé pendant 20 ans.*
- Diminuer la consommation, car l'énergie la moins chère est celle que l'on ne consomme pas !



# De quoi sont composés les panneaux PV ?



**1- Le cadre métallique en aluminium assure la solidité de la structure.**

*Ce dispositif est léger, avec une bonne résistance. La jointure d'étanchéité en caoutchouc permet d'éviter l'infiltration de l'eau de pluie.*

**2- Le vitrage est une plaque de verre, destinée à protéger la surface contre les chocs extérieurs comme la grêle.**

*Le verre peut recevoir un traitement anti-reflet pour augmenter l'absorption des rayons lumineux.*

**3- La couche EVA (éthylène-acétate de vinyle) est une feuille souple transparente et collante**

*Elle permet d'encapsuler la matrice cellulaire sans altérer l'effet photovoltaïque.*

**4- La matrice cellulaire est un assemblage de 3 composants : les cellules solaires (captent la lumière et produisent de l'électricité), les diodes by-pass (régulent le courant continu des cellules) et la grille conductrice (fil plat en cuivre amenant le courant continu).**

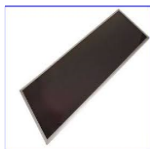
**5- La feuille de fond est un film PVF (polyfluorure de vinyle ou Tedlar).**

*C'est un film de protection avec plusieurs propriétés chimiques, mécaniques et électriques.*

**6- Le boîtier de dérivation en plastique regroupe au dos les fils électriques du panneau et protège contre une surintensité du courant & la boîte de jonction (matériel indépendant) pour relier 2 champs photovoltaïques mis en parallèle.**

# Quels sont les principaux types de cellules PV?

## silicium amorphe



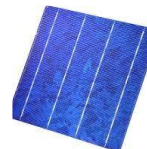
- Le silicium n'est pas cristallisé, il est déposé sur une feuille de verre.
- La cellule est gris très foncé.
- Fonctionne avec un éclairement faible
- Moins chères que les autres.
- Moins sensible aux températures élevées que les cellules mono ou poly cristalline
- Rendement faible en plein soleil, de  $60\text{Wc}/\text{m}^2$ .
- Performances qui diminuent sensiblement avec le temps.

## Silicium monocristallin



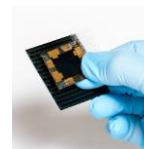
- Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules.
- Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme.
- Très bon rendement, de  $120\text{Wc}/\text{m}^2$
- Coût élevé,
- Rendement faible sous un faible éclairement

## silicium poly cristallin



- Pendant le refroidissement du silicium, il se forme plusieurs cristaux.
- Ce genre de cellule est également bleu, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux.
- Bon rendement, de  $100\text{Wc}/\text{m}^2$
- Moins cher que le monocristallin
- Rendement faible sous un faible éclairement.

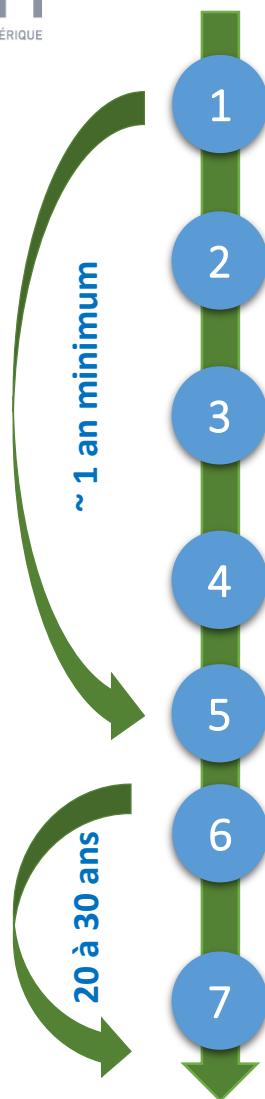
## Tandem pérovskite



- Empilement monolithique de deux cellules simples (en combinant couche mince de silicium amorphe sur silicium cristallin) :
- Sensibilité élevée sur une large plage de longueur d'onde.
- Bon rendement 40.7% d'efficacité (déc. 2006).
- Représente le futur (avec un maximum théorique de 87%).
- Coût élevé dû à la superposition de deux cellules



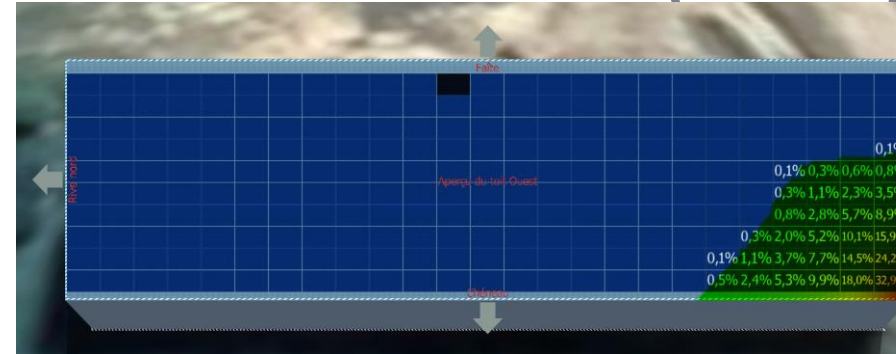
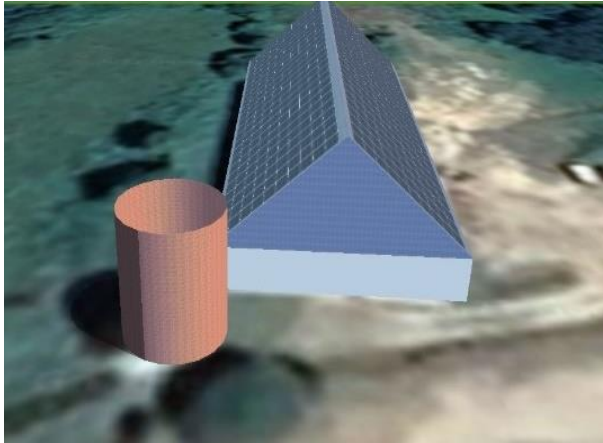
# Rappel du déroulé d'un projet



Phase	Objet
<b>Phase 1 : Présentation du projet</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>Contexte, objectifs et réflexion de la collectivité sur son projet.</li><li>Présentation de la convention encadrant la mission et de la charte déontologique du SYADEN (11) /SYDEEL (66)</li></ul>
<b>Phase 2 : Analyse du projet PV</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>Analyse du projet photovoltaïque, chiffrages des enjeux du projet, évaluation du potentiel économique du projet</li></ul>
<b>Phase 3 : Cahier des charges du projet</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>Définition du projet photovoltaïque selon les besoins définis par la commune.</li><li>Rédaction d'un cahier des charges et consultation, explication et suivi des différentes études</li></ul>
<b>Phase 4 : Etude de faisabilité (développement)</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>Obtention du permis de construire ou de ma déclaration préalable</li><li>Signature de la convention de raccordement avec Enedis</li><li>Obtention d'un tarif de rachat de l'énergie photovoltaïque</li></ul>
<b>Phase 5 : Phase de construction</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>Suivi du chantier de construction et des essais de fonctionnement</li></ul>
<b>Phase 6 : Exploitation</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>Suivi de la mise en conformité et mise en service du site</li><li>facturation de la production photovoltaïque à EDF-OA ou autres organismes agréés</li></ul>
<b>Phase 7 : Fin de vie</b>	<p><u>2 choix en fin de vie :</u></p> <ul style="list-style-type: none"><li>Soit la continuité de l'activité et la modernisation des installations ;</li><li>Soit la cessation d'activité qui requiert le démantèlement des installations (recyclage) et la remise en état du site.</li></ul>

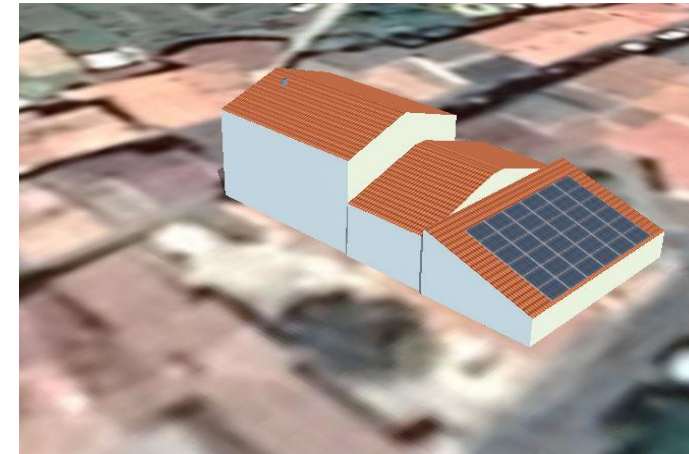
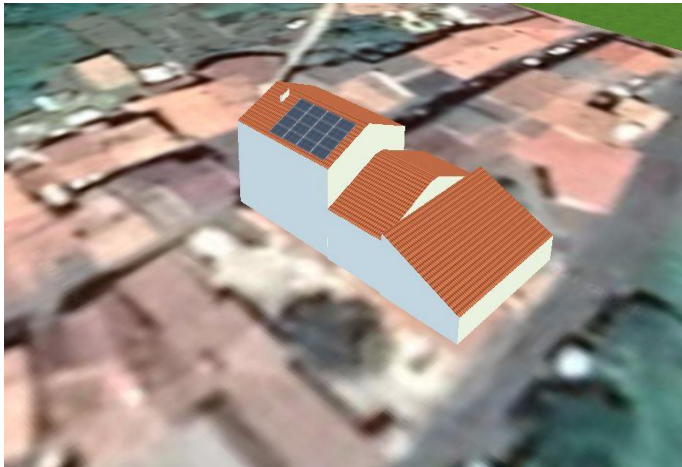
# Etude du productible sur PV SOL (ou équivalent)

- Etude fine des pertes par ombrages



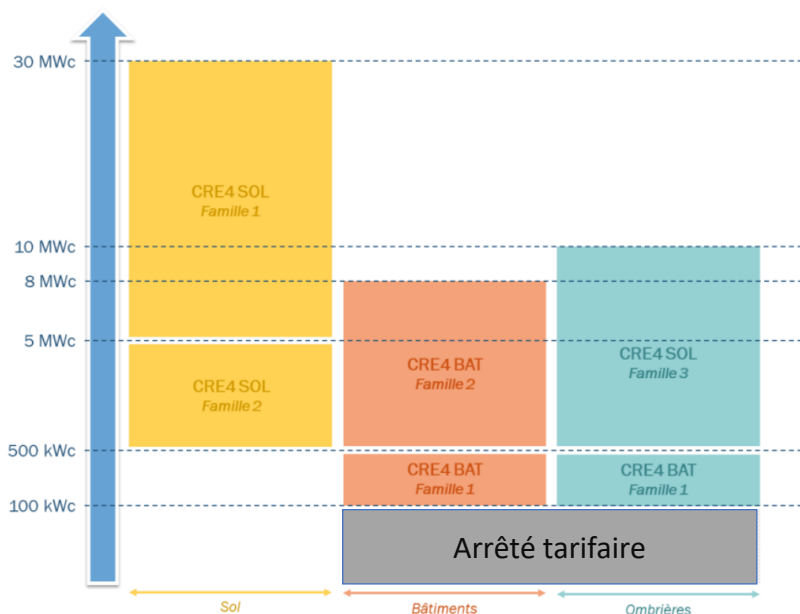
Ombrage lié à la tour

- Modélisation de différents scénarii





# La vente de l'électricité en revente totale



- Tarif de rachat par palier de puissance
- Depuis le 6 octobre 2021, un décret permet d'avoir un tarif de rachat de l'électricité jusqu'à 500kWc (bâtiments et ombrières) + prime d'intégration paysagère

Puissance totale (P + Q)	Du 01/07/21 au 30/09/21	Du 01/10/21 au 31/12/21
≤ 3 kWc	0,1789 € / kWh	0,1789 € / kWh
≤ 9 kWc	0,1521 € / kWh	0,1521 € / kWh
≤ 36 kWc	0,1089 € / kWh	0,1089 € / kWh
≤ 100 kWc	0,0947 € / kWh	0,0947 € / kWh
≤ 500 kWc	Pas d'obligation d'achat	0,0980 € / kWh (jusqu'à 1100 kWh / kWc puis 0,040 € / kWh)
> 500 kWc	Pas d'obligation d'achat	Pas d'obligation d'achat

# Photovoltaïque en toiture (ordres de grandeur)

- Hypothèses : Productible de 1300 h, panneaux de 340 Wc unitaires, revente totale

	9kWc	36 kWc	100 kWc
<b>Surface de toiture</b>	<b>50 m<sup>2</sup></b>	<b>190 m<sup>2</sup></b>	<b>525 m<sup>2</sup></b>
Investissement global (HT)	≈16 000 €	≈45 000 €	≈105 000 €
<b>Bénéfice €/an</b>	<b>1 149€</b>	<b>3 509 €</b>	<b>9 311 €</b>
Bénéfice 20 ans €/an	21 600 €	66 000 €	177 000 €
<b>Temps de retour</b>	<b>14 – 16 ans</b>	<b>13 -15 ans</b>	<b>11 – 13 ans</b>
<b>Tonnes équivalent Co2</b>	<b>2,8 T/an</b>	<b>11,3 T/an</b>	<b>31,7 T/an</b>
Nombre de foyer alimentés (équivalence)	2 foyers	9 foyers	26 foyers

# Synthèse des enjeux et contraintes

## Urbanisme

- SCOT, PCAET
- PLU

## Patrimoine

- Sites classés/historique, Architecte des Bâtiments de France

## Risques naturels

- Inondation, mouvement de sol

## Réseau électrique et faisabilité technique

- Etat de la toiture
- Raccordement électrique

## Rentabilité du projet

- Investissement, temps de retour. Difficulté potentielle pour la maintenance

# Options avec l'autoconsommation

- Revente totale, avec tarif d'achat fixe sur 20 ans
- Autoconsommation, avec revente du surplus avec tarif d'achat fixe sur 20 ans
- Autoconsommation 100%
- A venir : Autoconsommation collective

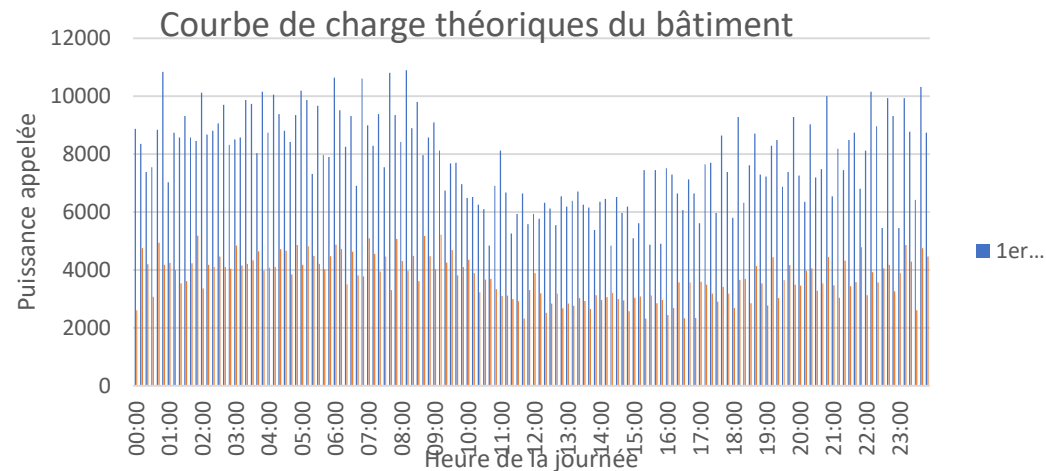
## Mémo :

- Taux d'autoproduction = Energie autoconsommée / Consommation électrique du bâtiment
- Taux d'autoconsommation = Energie autoconsommée / Energie totale produite par la centrale photovoltaïque

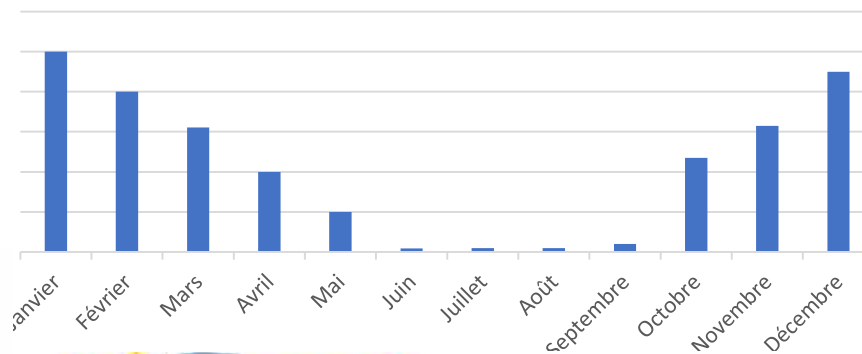


# Options avec l'autoconsommation

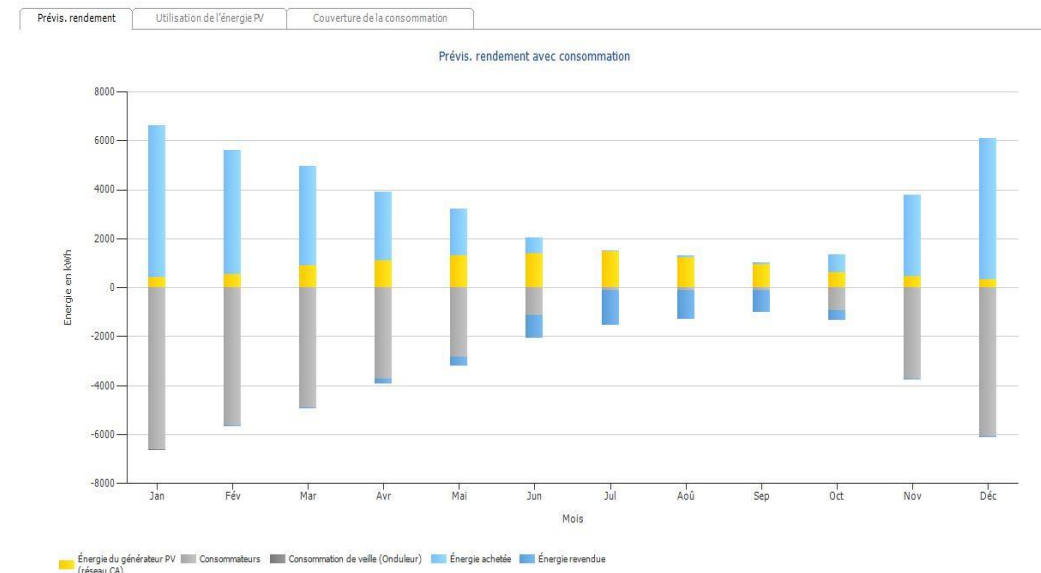
## Courbe de charge du bâtiment



## Evolution de la consommation en fonction du mois



## Taux de production et taux d'autoconsommation



# Possibilités d'investissement

1 – Etude technique, mission d'accompagnement SYADEN (délibération)

Choix du montage, portage du projet :

A - Rédaction d'un appel à manifestation d'intérêts (AMI) permettant de définir les besoins de la commune et mettre en concurrence les développeurs de projet ENR.

B - Investissement de la commune dans le projet (actionnariat)

**C - Impliquer les citoyens du territoire dans le projet (concertation, participation/portage financier)**



# Saint Louis et Parahou

## Photovoltaïque en toiture (31,75kWc)



Séminaire de Tautavel, le 17 novembre 2021





# Saint Louis et Parahou

## Photovoltaïque en toiture (31,75kWc)

- Maitrise d'ouvrage (investissement et réalisation des travaux) fait par la commune
- 3 toitures équipées (église, presbytère, mairie) avec réfection globale des couvertures et charpentes
- Mise en service en juin 2020
- Investissement lot PV = 57 800 euros HT
- Subvention exceptionnelle du SYADEN = 22 000 euros
- Calendrier de réalisation:
  - Octobre 2017 = Lancement marché
  - Janvier 2018 = Notification marché
  - Novembre 2018 = notification d'un avenant
  - Juin 2020 = Mise en service



Séminaire de Tautavel, le 17 novembre 2021



# Comment recycle-t-on un panneau solaire ?

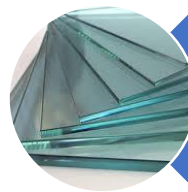
Un panneau photovoltaïque est composé :

- D'un cadre en aluminium ;
- De verre (75%-80%) ;
- De cellules ;
- De plastiques ;
- De connexions en cuivre et/ou en argent
- Et de silicium, de type cristallin pour 90 % des panneaux solaires.

Le quota moyen de recyclage d'un panneau solaire photovoltaïque est de **94,7 %**

La principale difficulté du recyclage des panneaux solaires cristallins réside dans la séparation des différents constituants :

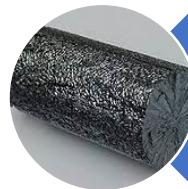
1. On commence par retirer le cadre en aluminium mécaniquement, ainsi que le boîtier de jonction et les câbles.
2. Les panneaux sont ensuite découpés en lamelles et passent dans une série de broyeurs.
3. Au fur et à mesure des différents broyages, on sépare et récupère (dans l'ordre) le verre, les composites, le cuivre et le silicium.
4. Enfin, chaque élément récupéré au cours du broyage est acheminé dans sa propre filière de recyclage.



Le verre est facilement recyclable à l'infini. On l'utilise pour faire de la fibre de verre, des produits d'isolation, ou encore des emballages en verre (pots et bocaux par exemple).



L'aluminium contenu dans le cadre est également recyclable à l'infini. Il est donc refondu pour constituer de nouveaux objets (canettes alimentaires par exemple).



Le silicium quant à lui peut être réutilisé jusqu'à 4 fois : il est alors utilisé pour fabriquer de nouvelles cellules photovoltaïques ou est fondu et intégré dans un lingot.

Matériau semi-conducteur très performant, les tranches de lingot de silicium sont ensuite utilisées dans la fabrication de tout type d'appareil électronique.



Les éléments présents en plus petites quantités, comme le cuivre et l'argent ont besoin d'un traitement spécifique : ils sont séparés mécaniquement et chimiquement avant d'être fondus et réutilisés.



Le plastique est le seul élément qui n'est pour l'heure pas recyclé.

# Qui recycle les panneaux solaires en France ?

## Cadre législatif du recyclage des panneaux solaires

Le recyclage des panneaux solaires photovoltaïques est prévu par la directive européenne 2002/96/CE relative aux déchets d'équipement électriques et électroniques (DEEE).

Elle est entrée en vigueur en Février 2003 et correspond au décret n° 2014-928 du 19 août 2014 dans le droit français.

Elle étend le principe de la Responsabilité Elargie du Producteur (REP) aux panneaux photovoltaïques.

## La France aux avant-postes

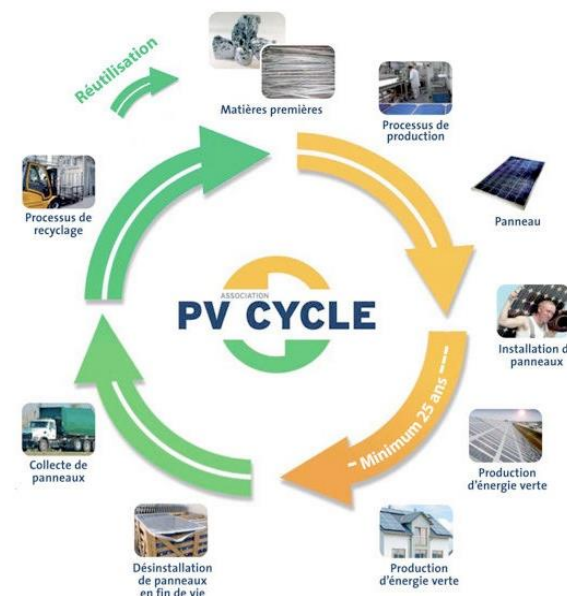
En 2007, les acteurs de l'industrie photovoltaïque ont créé PV Cycle, un éco-organisme à but non-lucratif.

Sa mission ? : Assurer la collecte de tous les types de panneaux solaires photovoltaïques pour les recycler, et ce quelle que soit leur marque ou leur technologie.

PV Cycle met ainsi à disposition plus de 200 points de collecte de panneaux solaires usagés dans toute la France et les achemine jusqu'à son usine dédiée, gérée par Veolia.

Depuis Juillet 2018, après avoir remporté l'appel d'offres lancé par PV Cycle pour « le traitement et la valorisation des panneaux solaires », Veolia a construit près d'Aix-en-Provence un complexe révolutionnaire.

C'est la première usine de recyclage à grande échelle de panneaux solaires utilisant le processus présenté précédemment.



## Ça coûte combien ?

En France, les fabricants, importateurs, distributeurs ou propriétaires de panneaux solaires payent une redevance, liée à l'**éco-participation**.

Son montant diffère selon le type de panneaux solaires ainsi que son poids ; En moyenne, cette redevance est de **0,70 € par panneaux**.

Pour le recyclage des grands parcs photovoltaïques au sol, c'est un peu différent ; Il est intégralement financé (démantèlement et transport compris) par la revente des métaux constituant leur cadre ou structure.



Séminaire de Tautavel, le 17 novembre 2021