

Les installations photovoltaïques

L'état de l'art technique, réglementaire et économique du photovoltaïque (2021)



Les installations photovoltaïques

Aspects techniques

Aspects réglementaires

Aspects économiques

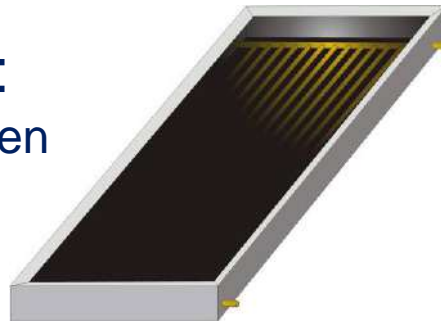
Enjeux du photovoltaïque

Les installations photovoltaïques

Aspects techniques

2 applications de l'énergie solaire

Le solaire thermique :
Energie solaire transformée en
chaleur (chauffe-eau)



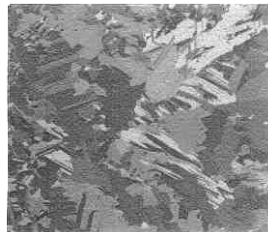
Le solaire photovoltaïque
Energie solaire transformée
directement en électricité



Modules photovoltaïques



Filière photovoltaïque



Silicium purifié

Lingot

Wafer

Cellule

Module

Systèmes

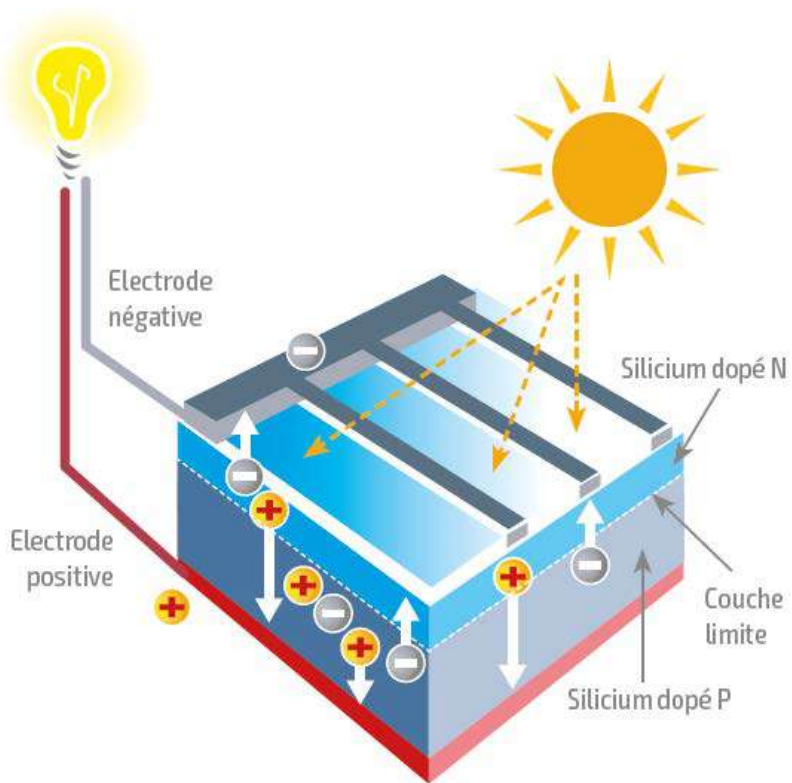
**Procédé chimique
de purification**

**Moulage
Sciage**

**Traitement
De surface**

Lamination

Comment ça marche?

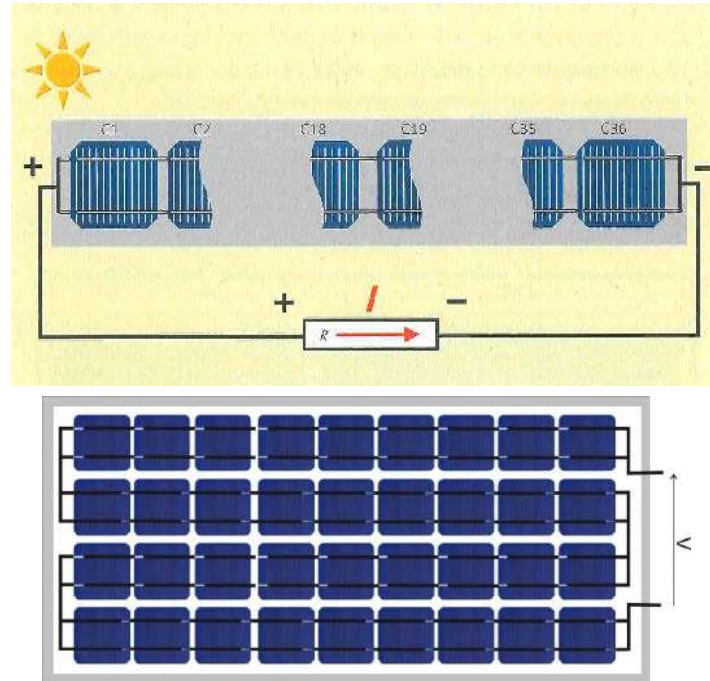


- Tension continue : de l'ordre de 0,5V
- Courant : quelques A pour un ensoleillement max (fonction de la surface)
- Puissance max : quelques Watts

Modules photovoltaïques



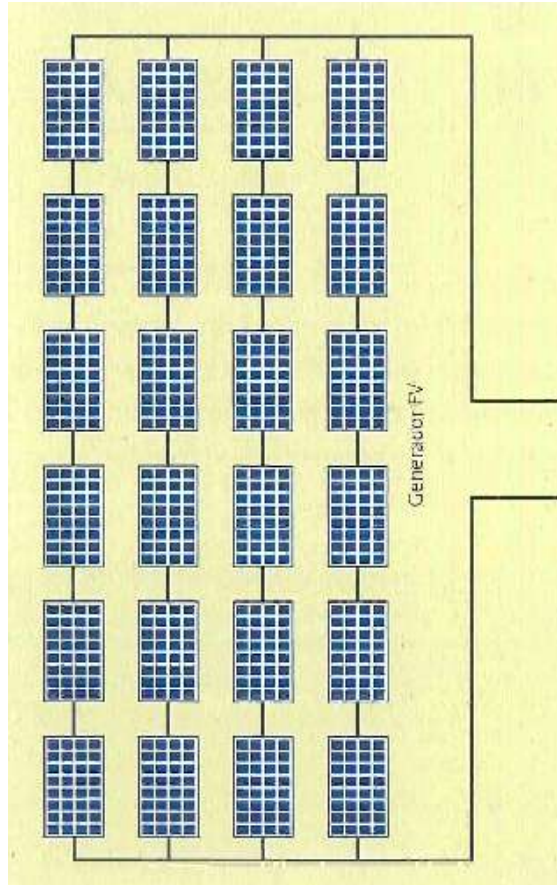
Si Monocristallin



Si Polycristallin

Pour augmenter la puissance, on groupe les cellules en série dans des modules photovoltaïques (10 à 700 Wc)

Champ photovoltaïque



Pour augmenter la puissance, on groupe les modules PV en série/parallèle dans des champs PV

Puissance : quelques kWc à quelques MWc

Définition du Watt-crête (Wc)

Qu'est ce que le Watt-Crête (Wc) ?

- ✓ Unité de référence normalisé dans le domaine du PV
- ✓ Correspond à la puissance électrique instantanée maximale pouvant être produite par un convertisseur photovoltaïque sous des conditions d'ensoleillement et de température donnée
- ✓ Exemple : un module PV de 375 Wc fournira 375 W de puissance électrique s'il reçoit un ensoleillement de 1000 W/m², et que sa température est à 25°C
- ✓ le rendement d'un module PV dépend de sa température

Ordre de grandeur: 1m² de PV correspond à environ 200 Wc



Module de 375 Wc

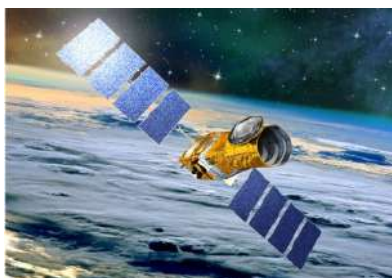
Dimensions : 1,84m x 1,03 m soit 1,9 m²

Poids : 20 kg

Les applications du photovoltaïque

❖ Photovoltaïque hors réseau

Espace (satellites), électrification rurale, applications professionnelles, pompage,



❖ Photovoltaïque raccordé au réseau public de distribution

L'engagement des états en faveur des énergies renouvelables a permis l'essor du photovoltaïque en connexion réseau à partir des années 1990.



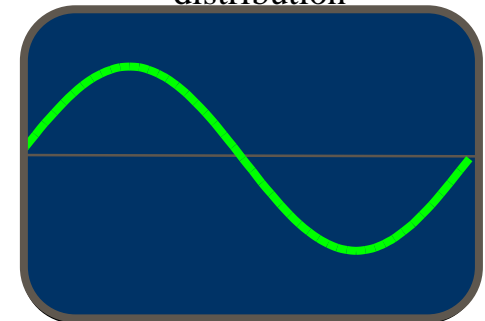
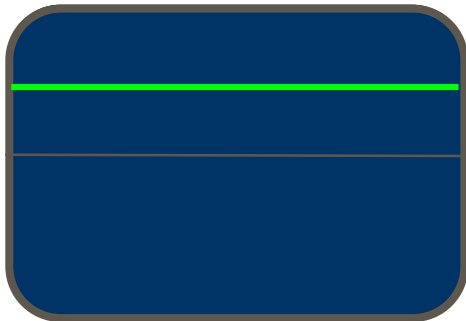
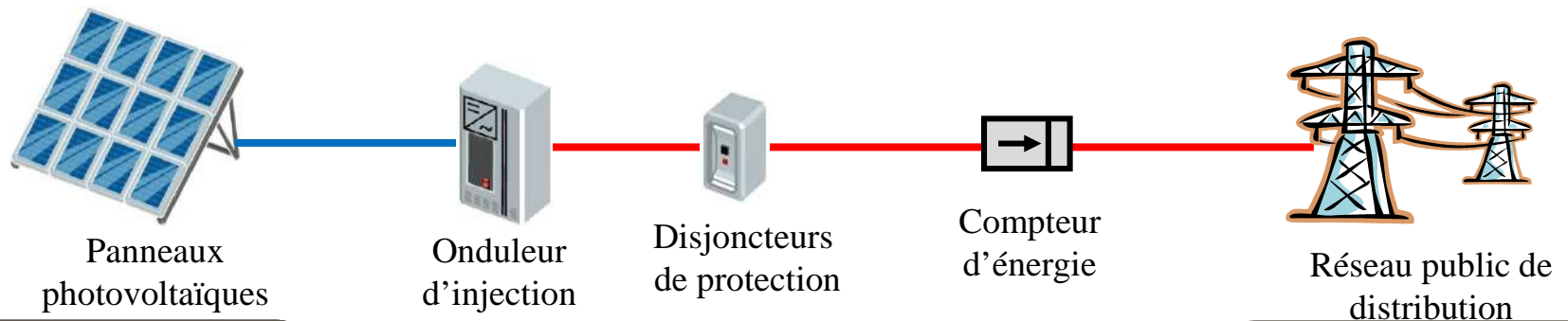
Les installations photovoltaïques

Les installations photovoltaïques raccordées au réseau

Photovoltaïque raccordé au réseau

Principe de fonctionnement

- Les panneaux photovoltaïques transforment directement la lumière en électricité courant continu
- L'onduleur transforme le courant continu en courant alternatif compatible avec le réseau
- L'énergie produite est injectée sur le réseau au fil du soleil
- En cas d'absence de tension sur le réseau, l'onduleur s'arrête



Performances énergétiques

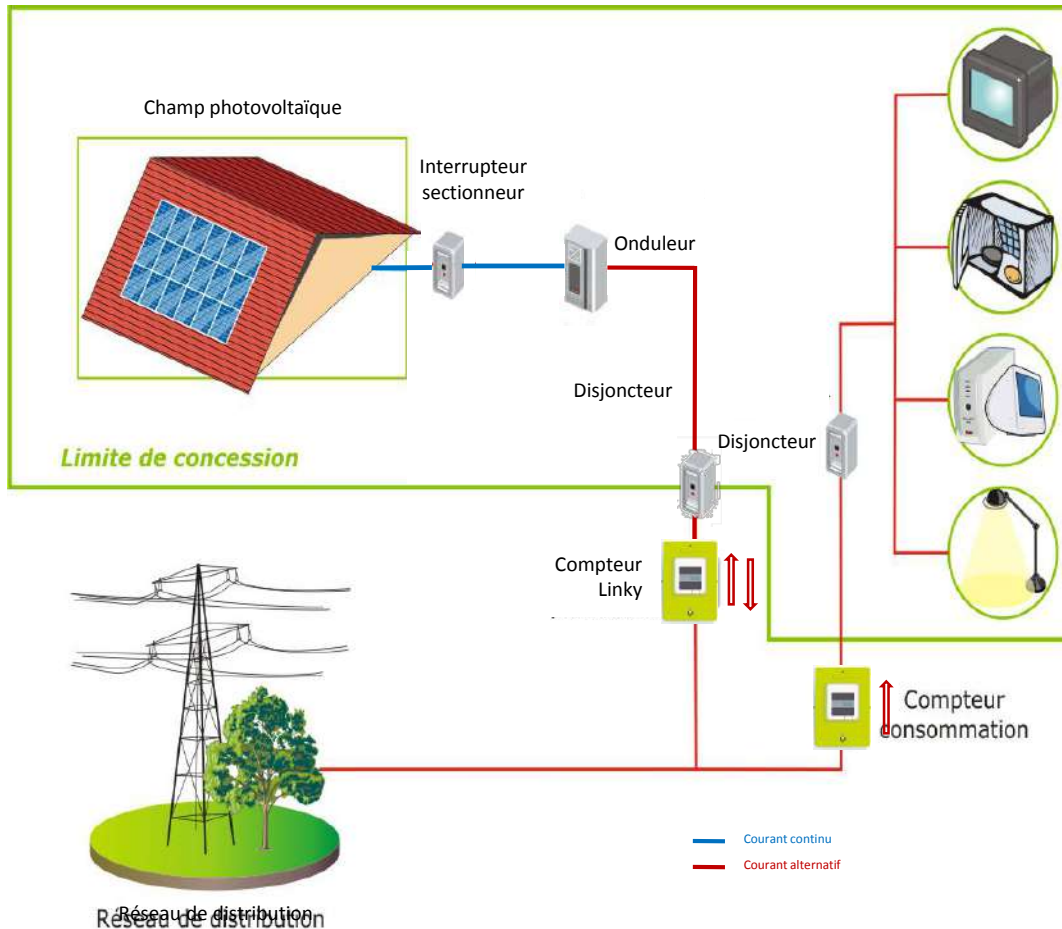


- $1 \text{ kWc} = 5 \text{ m}^2 = 1100 \text{ kWh/an}$ environ (région de Lyon pour une inclinaison de 20° à 30° et orientation Sud)
- Un générateur photovoltaïque de 3 kWc (16 m^2) produira environ $3\,300 \text{ kWh}$ par an d'électricité soit la consommation annuelle d'un foyer (hors chauffage, eau chaude et cuisson)
- D'autres orientations et inclinaisons possibles sans trop de pertes énergétiques pour favoriser l'intégration architecturale



© www.solarpraxis.de

Schéma de raccordement au réseau vente totale de l'électricité solaire produite



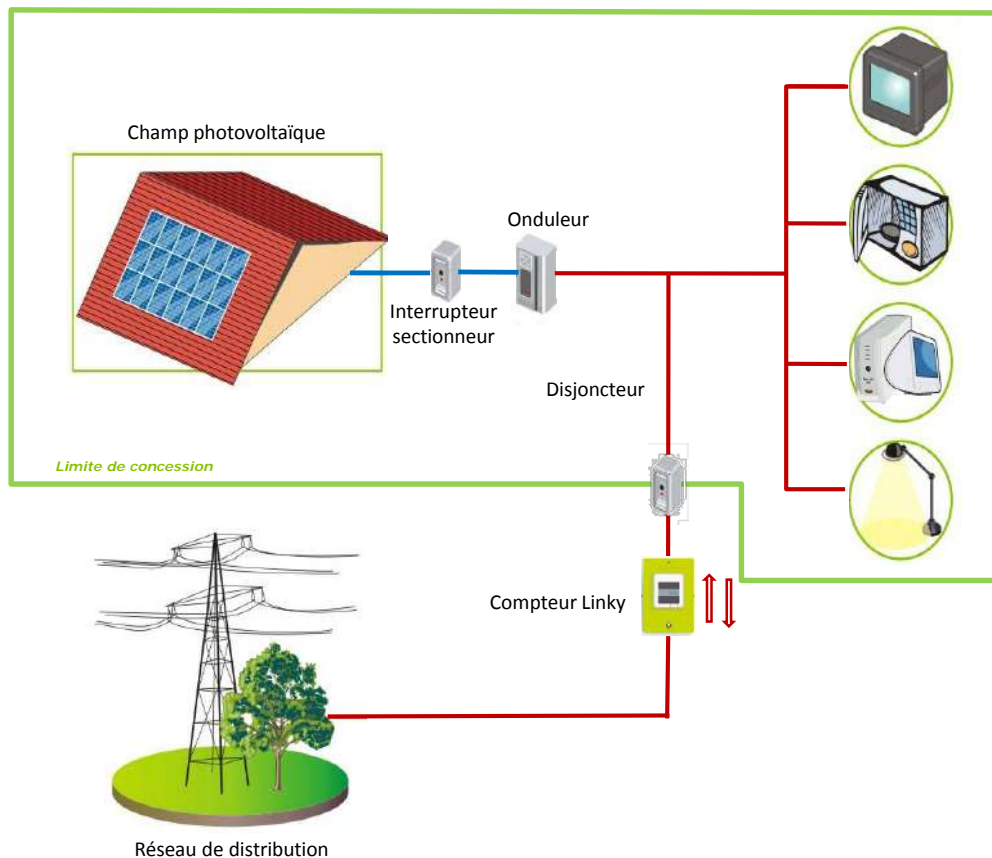
Avantages :

- ✓ Production d'électricité prévisible sur 20 ans
- ✓ Vente d'électricité solaire à un prix fixé et garanti pendant 20 ans
- ✓ Facilité de calculer la rentabilité sur 20 ans

Inconvénients :

- ✓ Raccordement au réseau plus coûteux : 2 points de raccordement avec comptage
- ✓ Tranchée éventuelle à prévoir

Vente de surplus (autoconsommation)



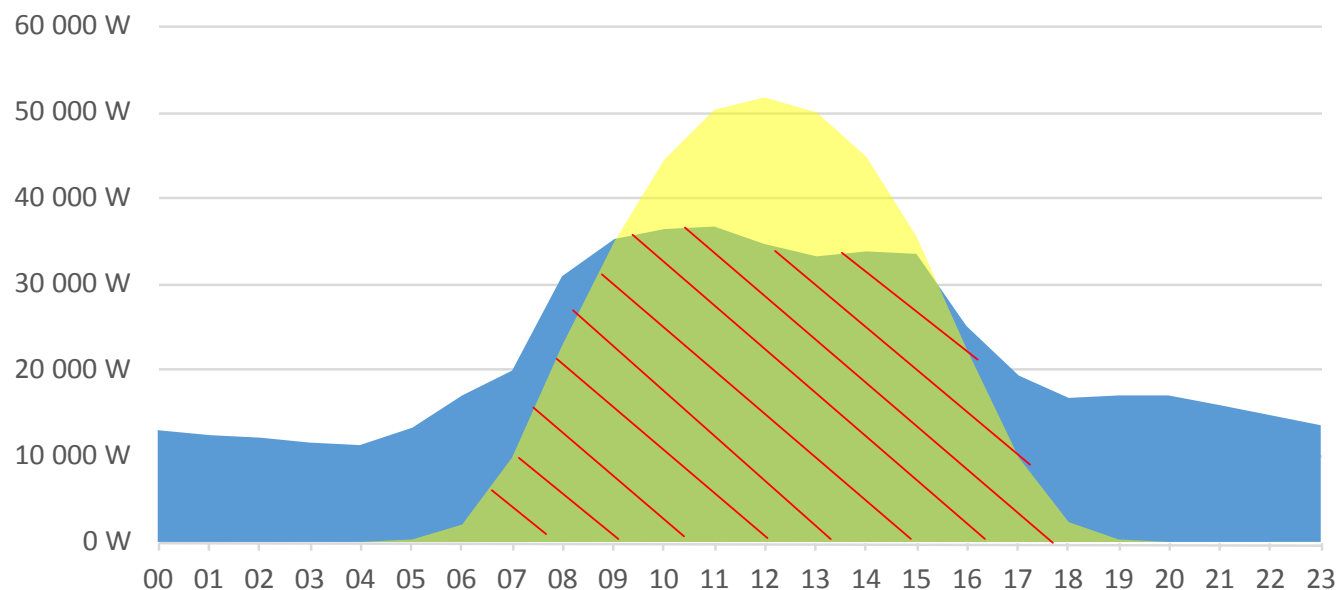
Avantages :

- ✓ Raccordement au réseau simplifié
- ✓ Possibilité de revente du surplus si respect des « critères généraux d'implantation »
- ✓ Subvention à l'investissement pour les petites installations
- ✓ Réduction de la facture d'électricité

Inconvénients :

- ✓ Difficile de prévoir la rentabilité.... Comment connaître à 10 ou 15 ans, le coût d'achat de l'électricité et la consommation sur site?
- ✓ Incitation à la surconsommation en journée

Autoconsommation et autoproduction



* Il est important de distinguer les deux notions, l'autoconsommation est définie comme le fait de consommer tout ou partie de l'énergie que l'on produit et l'autoproduction comme le fait de produire tout ou partie de l'énergie que l'on consomme.

Le taux d'autoconsommation est le rapport entre la zone hachurée rouge et la zone jaune + hachurée rouge (68,8%).

Le taux d'autoproduction est le rapport entre la zone hachurée rouge et la zone bleue + hachurée rouge (50,6%).

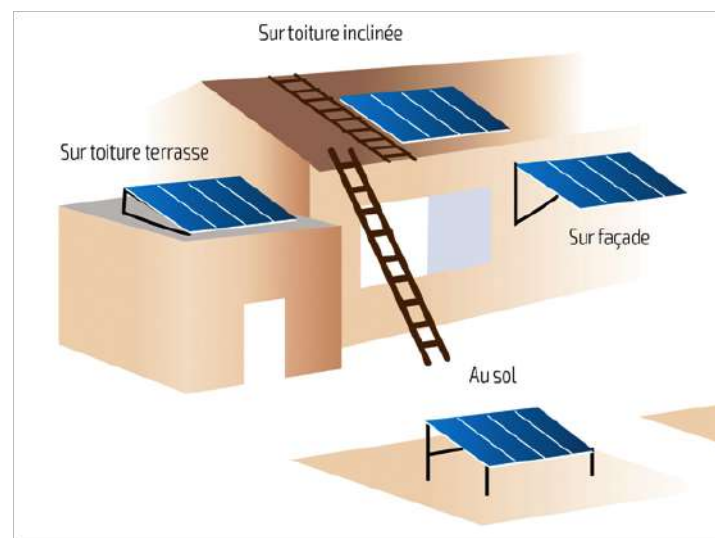
Le taux de couverture est le rapport entre la zone jaune + hachurée rouge et la zone bleue + hachurée rouge (73,5%).

Les installations photovoltaïques

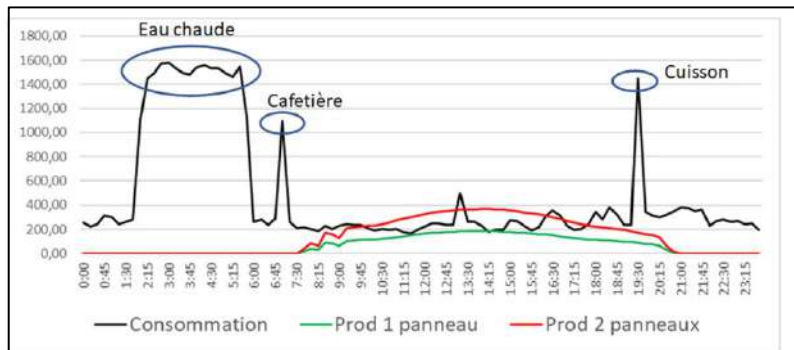
Optimisation de l'autoconsommation

Kit d'autoconsommation 640 Wc (2 panneaux solaires)

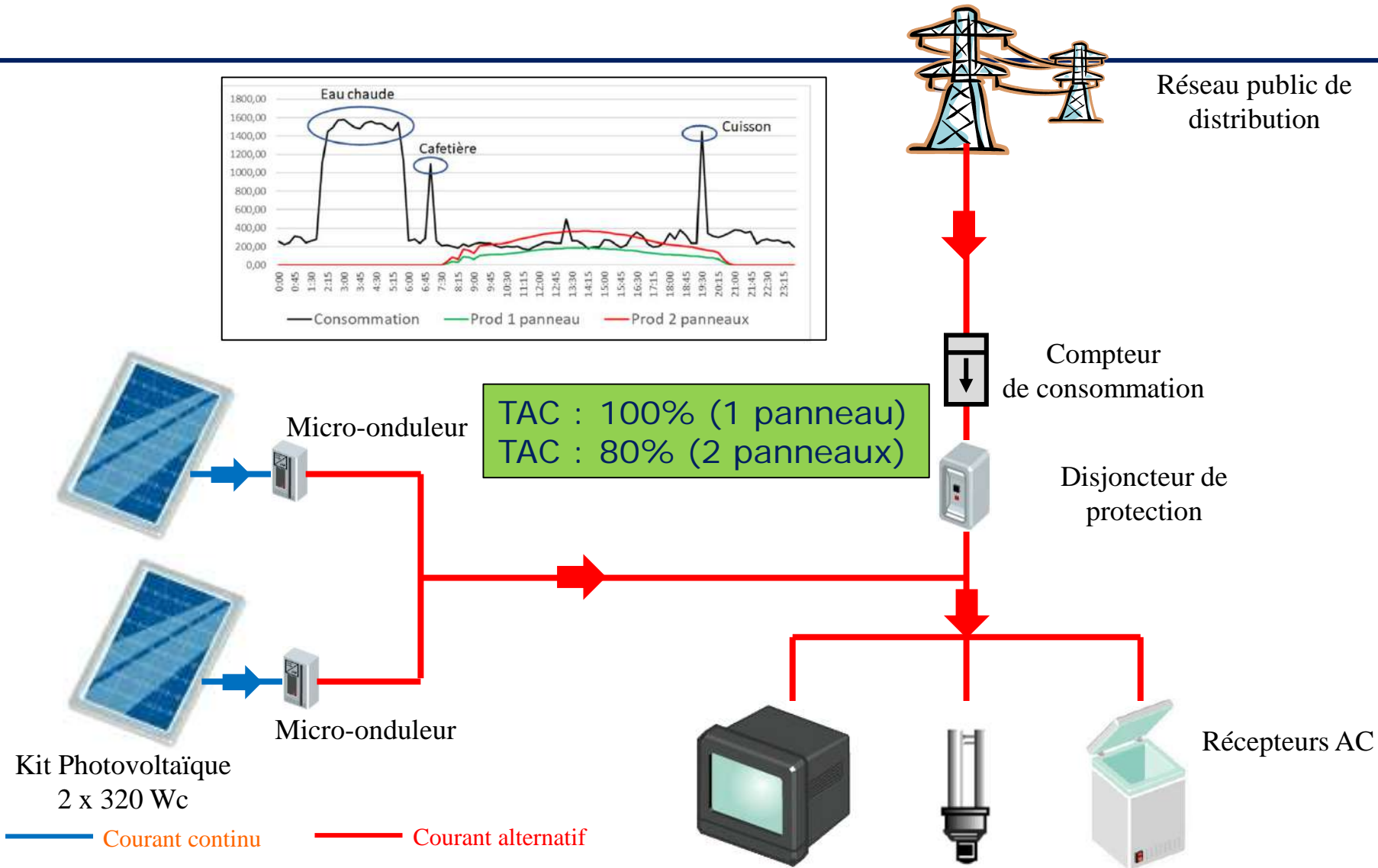
- ✓ Un kit PV de faible puissance **adapté à l'habitat individuel**, avec possibilité de l'installer soi-même, constitué de:
 - ✓ 2 modules PV de 320 Wc (3,4 m²)
 - ✓ 1 micro onduleur respectant les normes de raccordement au réseau
 - ✓ Les accessoires de câblage pour le raccordement dans l'habitation
 - ✓ Dispositif de fixation des modules PV au sol ou en toiture



Autoconsommation sans vente du surplus



TAC : 100% (1 panneau)
TAC : 80% (2 panneaux)



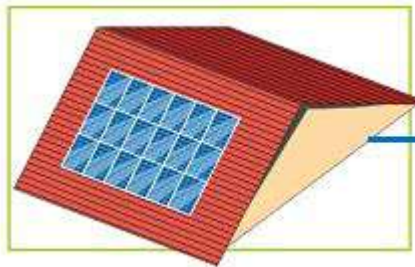
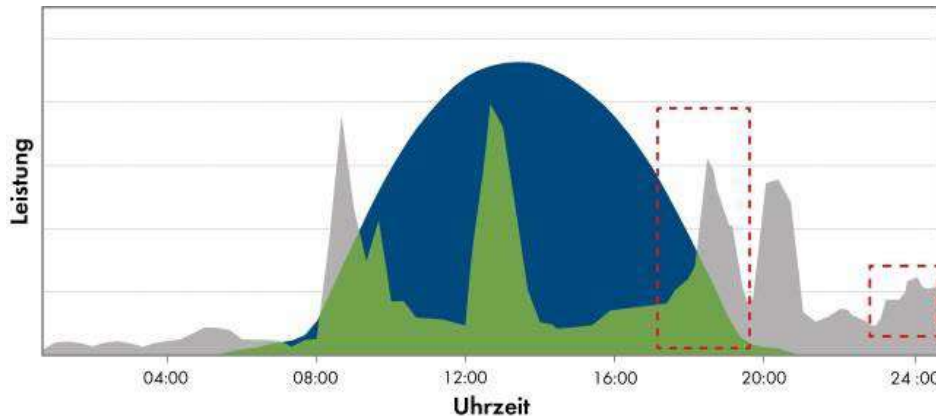
Système photovoltaïque de 3 à 9 kWc

- ✓ Un système photovoltaïque pour **habitat individuel**, posé par un installateur qualifié, constitué de:
 - ✓ 8 à 24 panneaux de 375 Wc (15 à 50 m²)
 - ✓ Dispositif de fixation des modules PV en toiture
 - ✓ 1 onduleur photovoltaïque ou micro-onduleurs
 - ✓ Coffrets de protection
 - ✓ Les accessoires de câblage pour le raccordement dans l'habitation

- ✓ Implantation des panneaux solaires :
 - ✓ En surimposition et parallèle à la toiture
 - ✓ Orientation : sud, sud-est, sud-ouest, est et ouest,
 - ✓ Inclinaison 20 à 35°



Autoconsommation avec vente du surplus et sans pilotage de charges : exemple

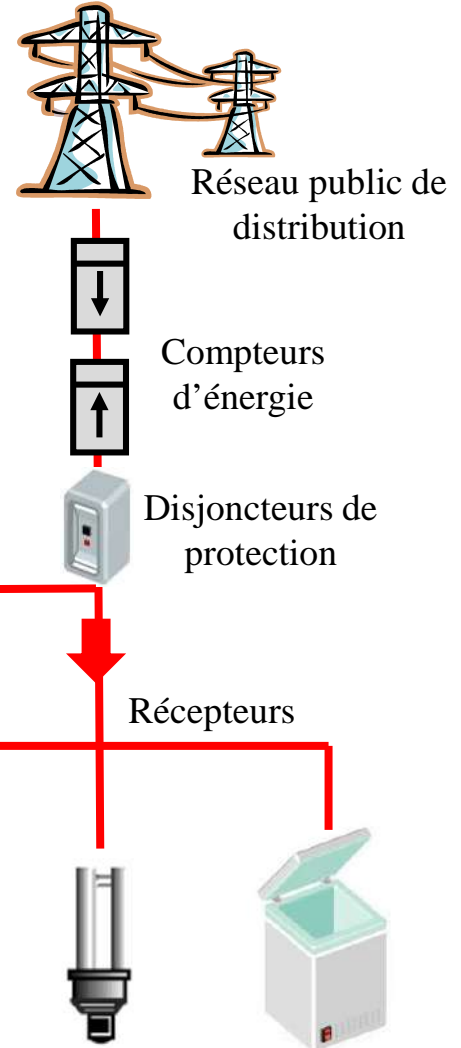


Panneaux photovoltaïques

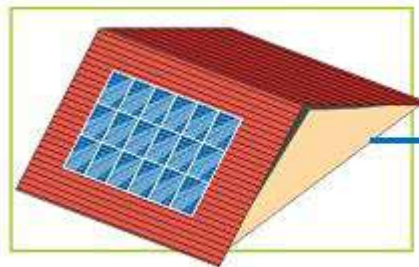
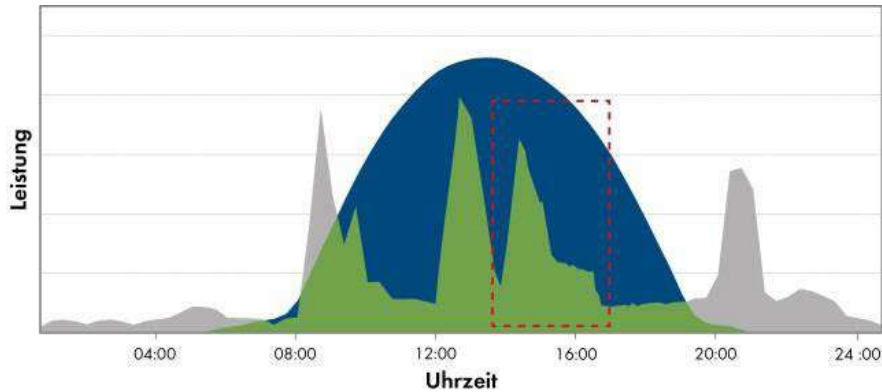


Onduleur d'injection

TAC : 30%
TAP : 28%
TDC : 95%



Autoconsommation avec vente du surplus et avec pilotage de charges : exemple

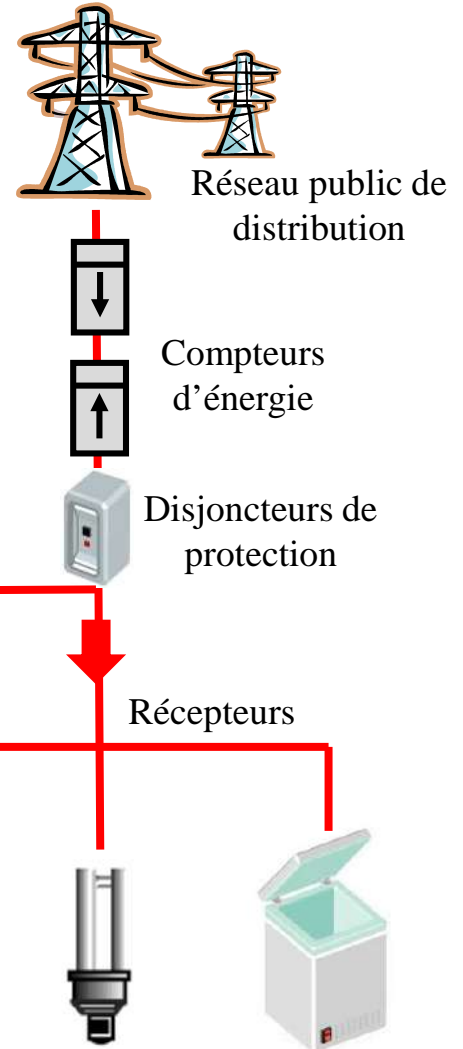


Panneaux photovoltaïques

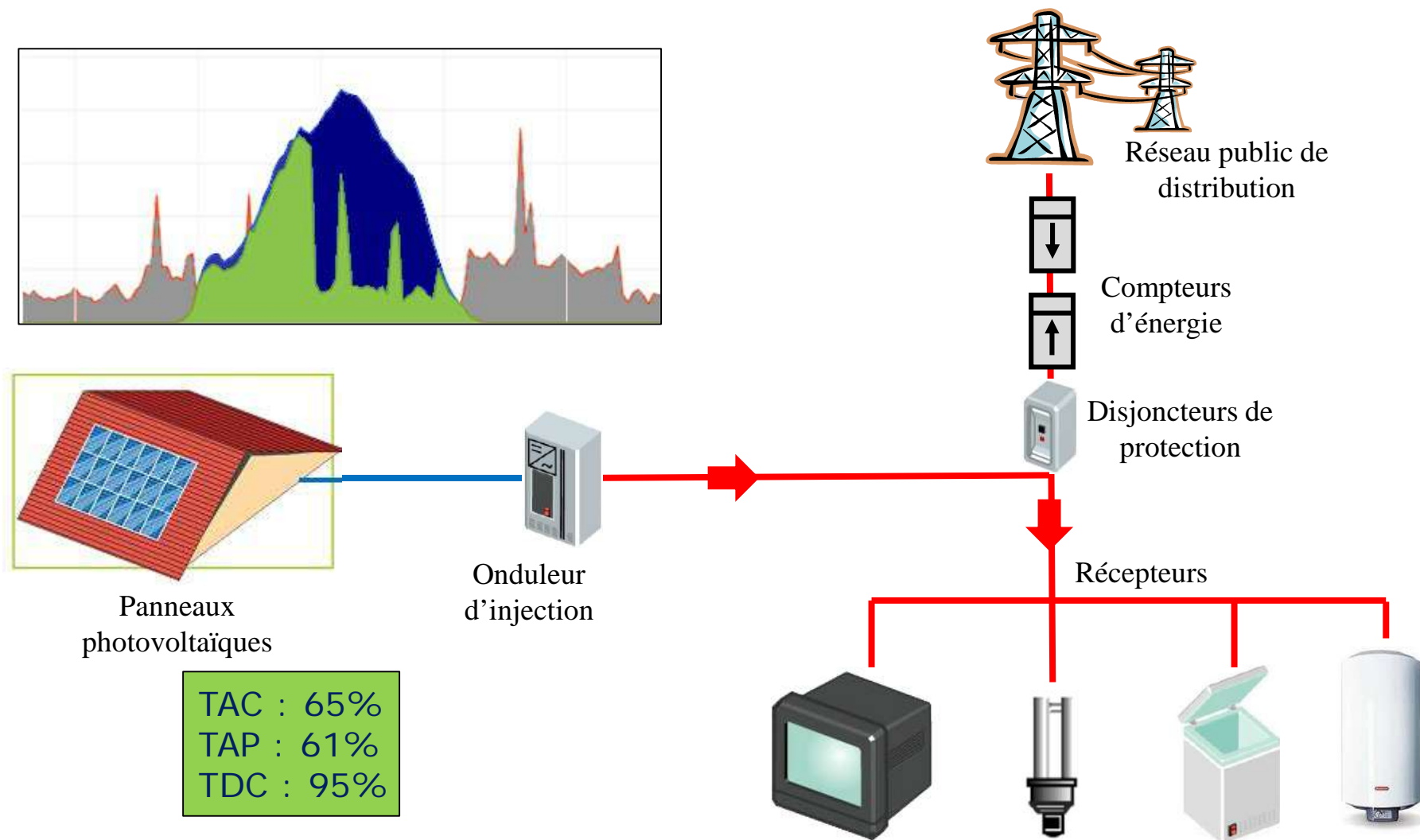


Onduleur d'injection

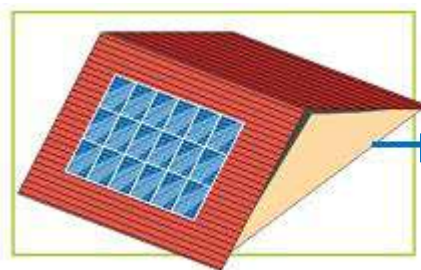
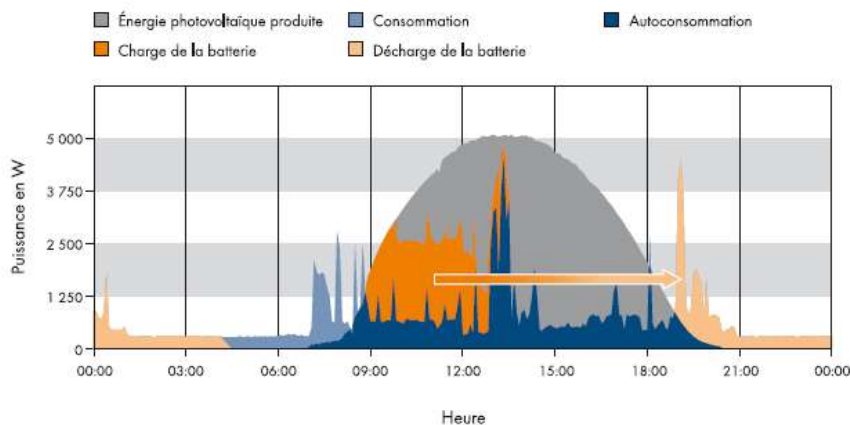
TAC : 50%
TAP : 47%
TDC : 95%



Autoconsommation avec stockage d'énergie par chauffe-eau électrique : exemple

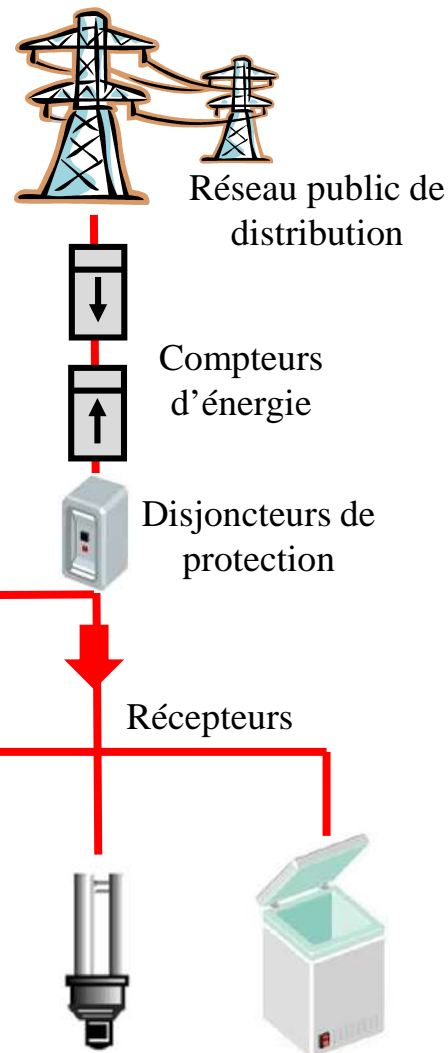
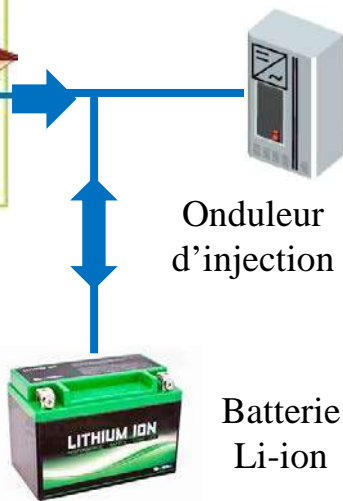


Autoconsommation avec vente du surplus et avec stockage sur batterie : exemple



Panneaux photovoltaïques

TAC : 80%
 TAP : 75%
 TDC : 95%



Les installations photovoltaïques

Aspects réglementaires

Le cadre réglementaire

Tarifs d'achat de l'électricité solaire (Dernier trimestre 2021)

Type contrat	Pose	Puissance	Prix d'achat (sur 20 ans)	Prime (du 06/10 au 31/12/2021) versée sur les 5 premières années
Convention Auto Consommation	Indifférent	0 à 3kWc	-	0
Vente Surplus	Critères généraux implantation au Bâti : - installé sur Toiture inclinée et // à la toiture ou - Installé sur toiture plate (< 5%) : ou - Fonction allège, bardage, brise-soleil, pergolas, murs rideaux	0 à 3 kWc	10 c€/kWh	Pa : 380 €/kWc
		3 à 9 kWc		Pa : 285 €/kWc
		> 9 à 36 kWc	6 c€/kWh	Pb : 160 €/kWc
		36 à 100 kWc		Pb : 80 €/kWc
Vente Totale		0 à 3 kWc	17,89 c€/kWh	0
		3 à 9 kWc	15,20 c€/kWh	
		9 à 36 kWc	10,89 c€/kWh	0
		36 à 100 kWc	9,47 c€/kWh	

Le cadre réglementaire

Conditions pour bénéficier du tarif d'achat de l'électricité solaire :

- **Respect de certaines conditions d'implantation des panneaux sur le bâtiment :**

- installés sur toiture inclinée et parallèles à la toiture

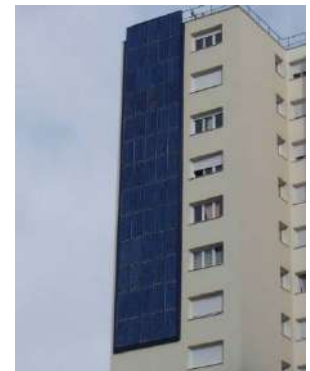
ou

- Installés sur une toiture plate (< 5%) :

ou

- Panneaux qui ont la fonction allège, bardage, brise-soleil, pergolas, mur rideaux

- **Installation effectuée par un installateur qualifié RGE (Reconnu Garant de l'Environnement)**





Le cadre réglementaire

Conditions pour bénéficier du tarif d'achat de l'électricité solaire :

Fiscalité :

Taux de TVA

- TVA = 10 % : (PV \leq 3 kWc et si maison $>$ 2 ans) et si posé par un installateur qualifié RGE
- TVA = 20 %: (PV $>$ 3 kWc ou si maison $<$ 2 ans)

Crédit d'impôt

- Non

Impôts sur revenus

- \leq 3 kWc : non
- $>$ 3 kWc : oui (micro BIC)

Les installations photovoltaïques

Aspects économiques



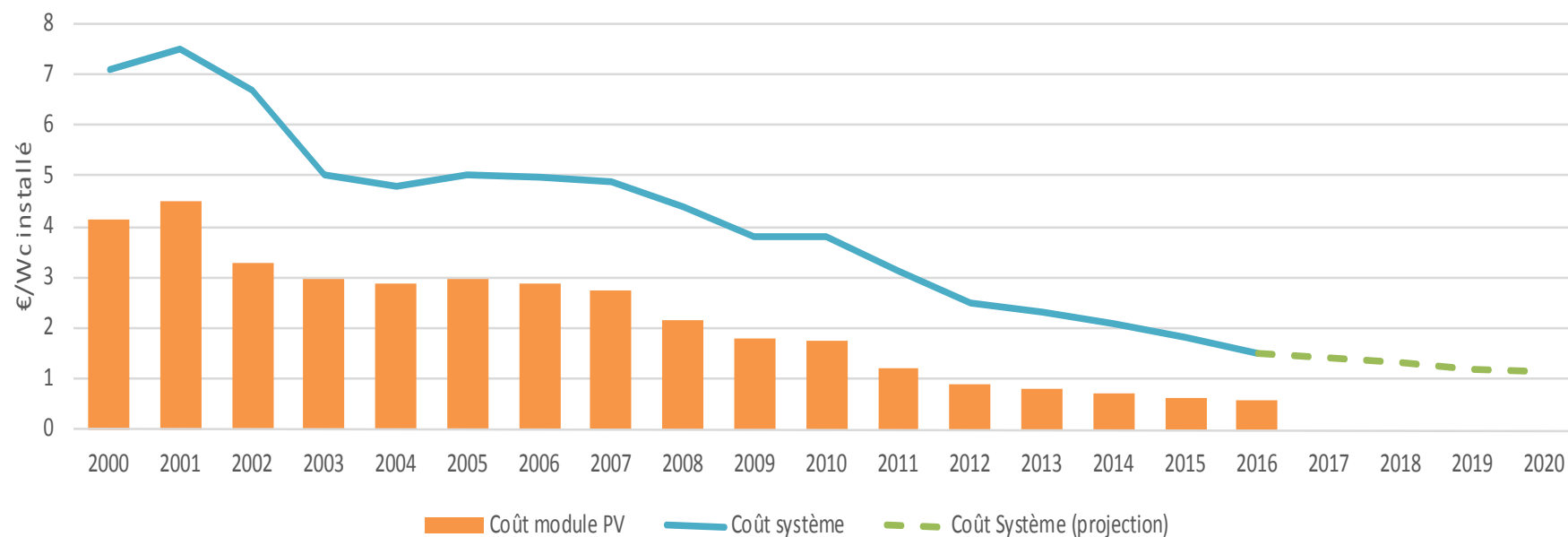
Évolution du prix des installations photovoltaïques

Prix d'une installation PV sur bâtiment (hors raccordement)

- Modules PV + Système de montage
- Onduleurs et protection de découplage
- Liaisons électriques DC et AC
- Dispositifs de protection
- Frais de chantier : pose et moyens de levage, mise en sécurité du chantier et nettoyage

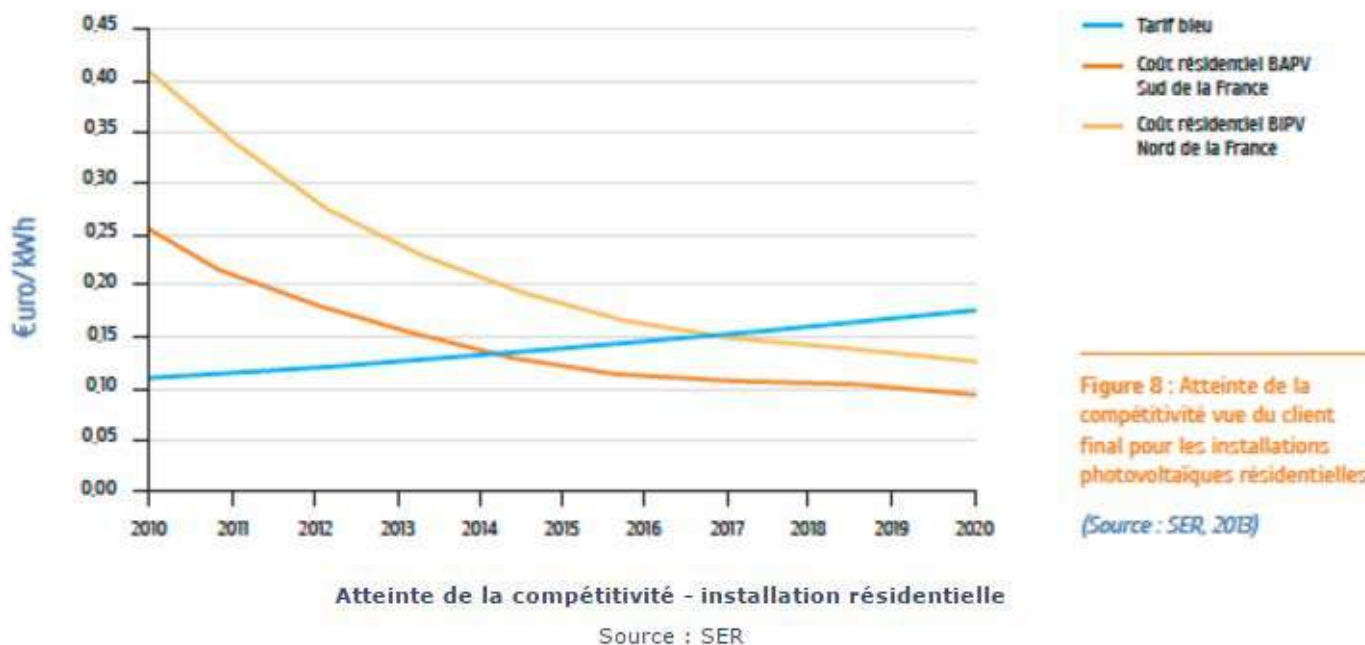
Puissance	Prix
$P_c < 3 \text{ kWc}$	2,4 à 2,1 € HT/Wc
$3 \text{ kWc} < P_c < 9 \text{ kWc}$	2,1 à 1,7 € HT/Wc
$9 \text{ kWc} < P_c < 36 \text{ kWc}$	1,7 à 1,1 € HT/Wc
$36 \text{ kWc} < P_c < 100 \text{ kWc}$	1,1 à 0,9 € HT/Wc

Coût moyen des systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Historique et projections futures



Le contexte économique du photovoltaïque

- ❖ Le coût actualisé de l'énergie photovoltaïque produite sur 25 ans diminue régulièrement : de l'ordre de 11 c€TTC/kWh dans notre région en 2021
- ❖ En 2021, le prix de l'électricité est de l'ordre de 16 à 18c€TTC/kWh pour le particulier (en heures pleines selon le type d'abonnement et de fournisseur).
- ❖ **Conclusion : L'électricité solaire produite chez un particulier est moins chère que celle achetée au réseau !**



Les installations photovoltaïques

**Quelle est la meilleure rentabilité ?
Vente totale ou autoconsommation ?**

Le contexte économique du photovoltaïque

Puissance	Surface (m ²)	Nombre panneaux 300 Wc	Type installation	Prix indicatifs TTC (fourniture + pose + raccordement Enedis - primes éventuelles)	Taux autoconsommation	Temps de retour brut sur investissement (TRB)
0,6 kWc	3,5	2	Autoconso et auto installé	1 000 €	90%	< 8 ans
3 kWc	18	10	vente surplus	5 730 €	30%	14 ans
3 kWc	18	10	vente surplus (avec pilotage)	6 700 €	65%	12 ans
3 kWc	18	10	vente surplus (avec pilotage + batterie)	13 160 €	80%	> 20 ans
3 kWc	18	10	vente totale	8 700 €	0%	15 ans
6 kWc	36	20	vente totale	15 000 €	0%	15 ans
9 kWc	54	30	vente totale	21 000 €	0%	14 ans

Hypothèses :

- Prix du kWh : 15,7 c€
- Baisse de rendement des panneaux : -0,5 % par an
- Augmentation du prix électricité domestique : +3% par an



Le contexte économique du photovoltaïque

Ce qu'il faut retenir:

Favoriser une production PV maximale avec une rentabilité optimale:

Si pas encore d'installation photovoltaïque :

- ✓ Si $S > 48 \text{ m}^2$: 9 kWc en vente totale (+ 0,6 kWc en autoconsommation sans vente du surplus)
- ✓ Si $32 < S < 48 \text{ m}^2$: 6 kWc en vente totale (+ 0,6 kWc en autoconsommation sans vente du surplus)
- ✓ Si $16 < S < 32 \text{ m}^2$: 3 kWc en autoconsommation avec vente du surplus
- ✓ Si $S < 16 \text{ m}^2$: 0,6 kWc (ou 1,2 kWc) en autoconsommation sans vente du surplus

Si installation photovoltaïque déjà existante en vente totale:

- ✓ Si $S > 16 \text{ m}^2$: ajout de 3 kWc en vente totale (+ 0,6 kWc en autoconsommation sans vente du surplus)

Remarques :

- ✓ Autoconsommation avec stockage : actuellement non rentable économiquement mais en devenir. Certains systèmes permettent une sécurisation de l'alimentation électrique de quelques heures en cas de coupure de courant
- ✓ Etre autonome avec du PV pour l'habitation : nécessité d'un stockage de plusieurs jours économiquement non pertinent sauf cas particulier (exemple: habitation à faible consommation très éloignée du réseau électrique)

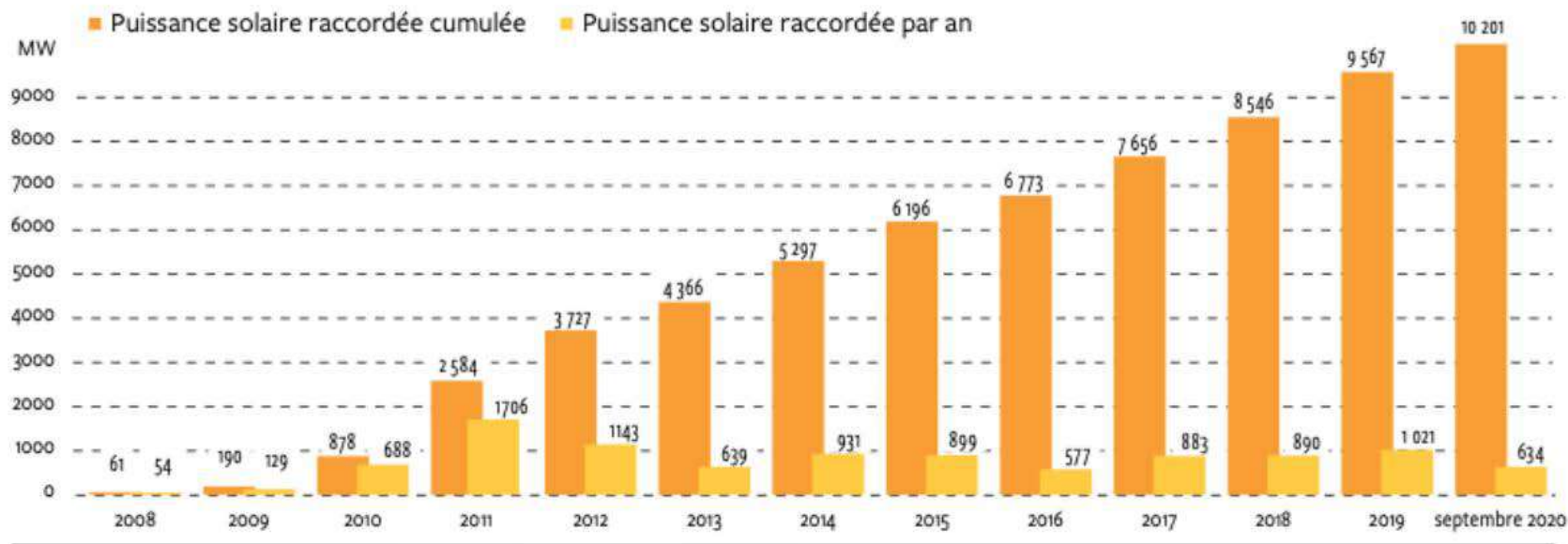
Les installations photovoltaïques

Enjeux du photovoltaïque

Evolution du parc photovoltaïque français

Fin 2020, le parc photovoltaïque français atteint plus de 10,2 GW

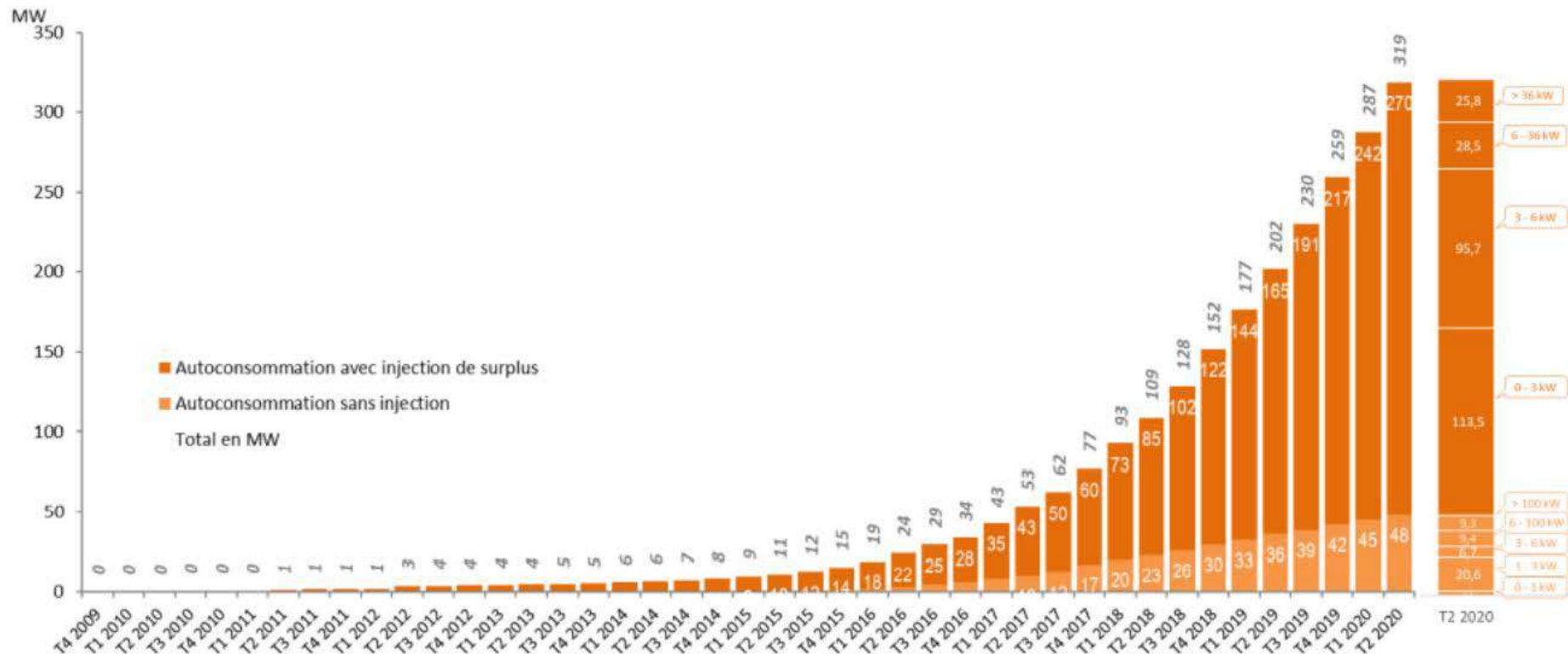
Évolution de la puissance solaire raccordée



Evolution du parc photovoltaïque français

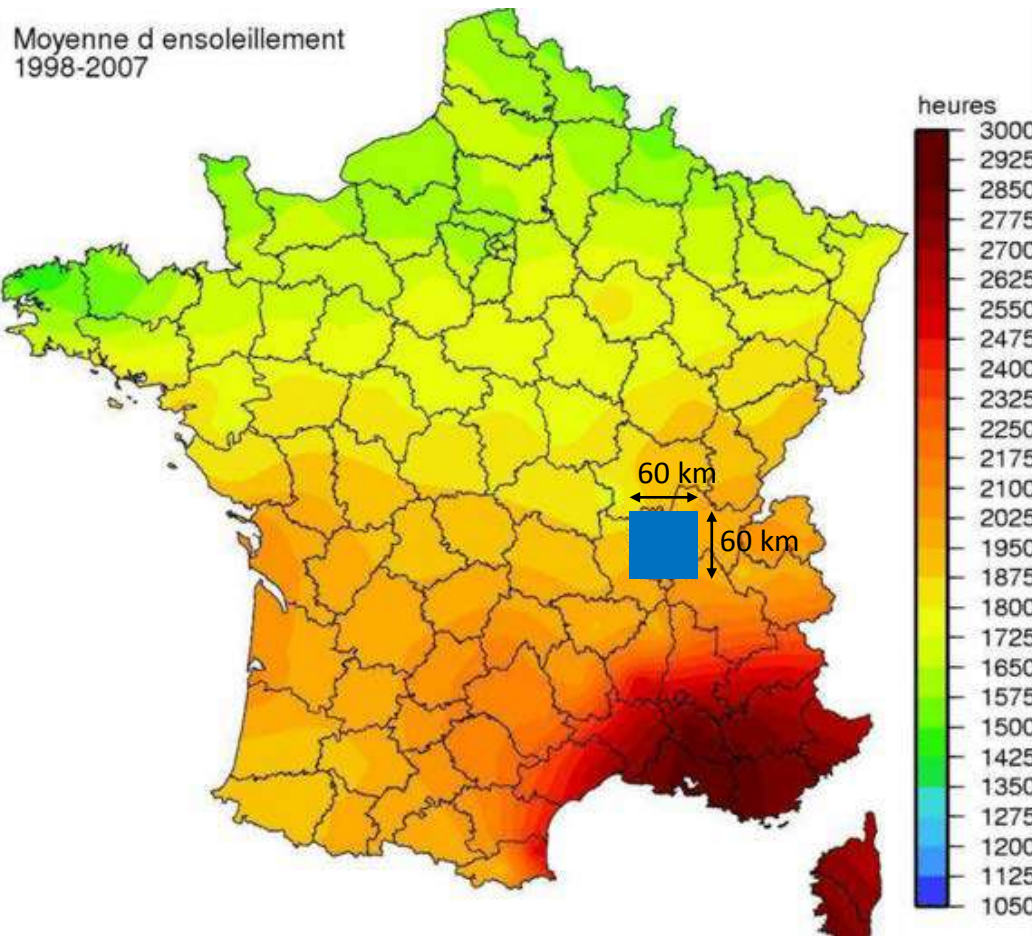
Marché de l'autoconsommation en France métropolitaine

319 MWc en mi-2020 (80 000 installations PV en auto-consommation)



Potentiel de l'énergie photovoltaïque en France

Moyenne d'ensoleillement
1998-2007



3600 km² de cellules solaires photovoltaïques au silicium (légèrement supérieure à la surface du département du Rhône) permettrait de fournir la totalité de la consommation annuelle 2015 d'électricité de la France.

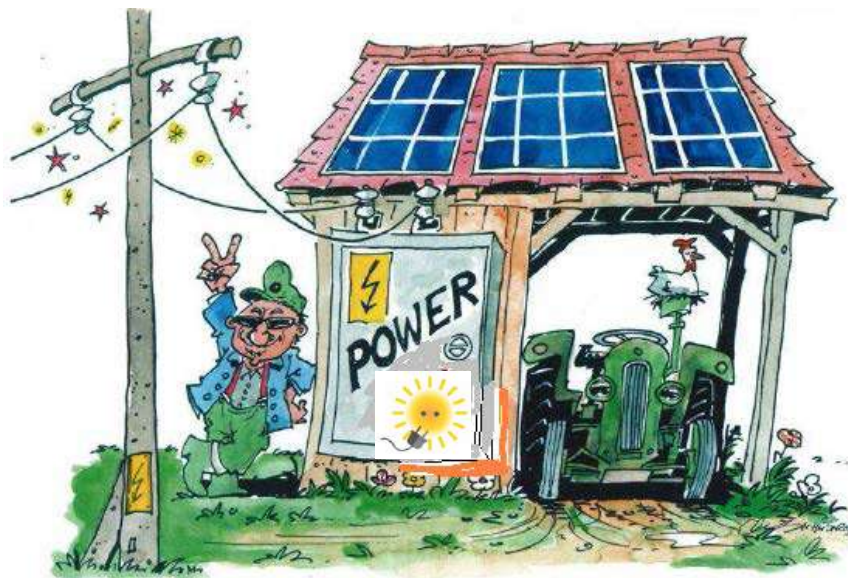
(base de calcul : Conso 2015 = 545TWh - production PV : 1000 kWh/kWc – 1kWc = 6,6 m²)

Atouts du photovoltaïque

- Source d'énergie renouvelable disponible localement en tous lieux
- Production d'électricité décentralisée accessible à tous (modulaire et économiquement rentable)
- Systèmes photovoltaïques facilement intégrables aux bâtiments et bien acceptés socialement
- Filière créatrice d'emplois nouveaux & locaux non délocalisables
- Source d'énergie compétitive avec la baisse régulière des coûts des panneaux solaires
- Forte potentialité à l'export : couplage réseau et électrification de zones électrifiées (notamment en Afrique)
- Production d'électricité respectueuse de l'environnement :
 - sans production de GES
 - sans mouvement
 - sans bruit
 - temps de retour énergétique : < 2 ans
 - panneaux solaires recyclables (verre, silicium, aluminium,...)



Pourquoi devenir producteur d'électricité PV ?



Motivation écocitoyenne :

- ❖ **c'est motivant de produire de l'énergie sans polluer et sans produire de gaz à effet de serre ;**
- ❖ **c'est stimulant de participer, si peu que ce soit, à la production électrique du pays**
- ❖ **c'est intéressant de réfléchir à sa propre consommation énergétique**
- ❖ **c'est mobilisateur de favoriser le développement de techniques énergétiques d'avenir.**