

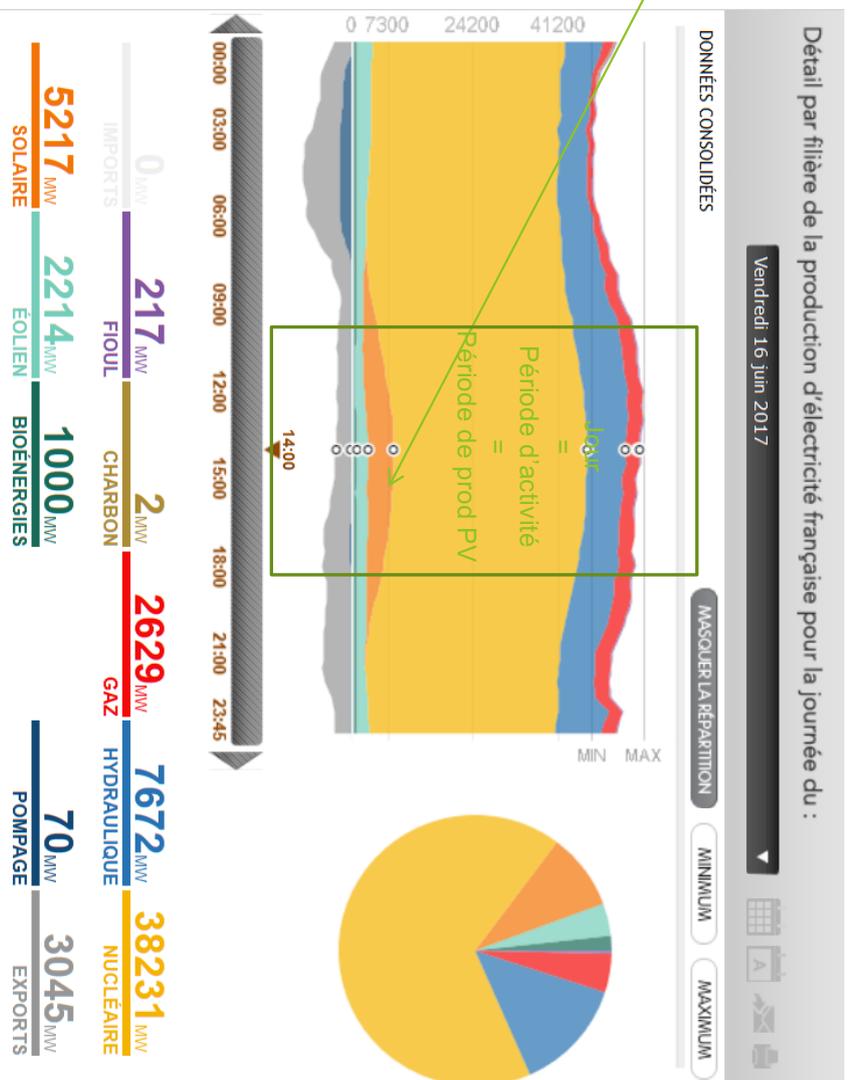
Le solaire photovoltaïque

Généralités

- Une centrale solaire de 1 kWc produit environ 1 kWh d'énergie par an. (Le Wc - Watt crête) est la puissance maximale délivrée par un module photovoltaïque sous un ensoleillement de 1000 W/m² à 25°C et AM=1,5)
- Dans l'Ouest, 1 m² de capteurs produit de 40 à 100 kWh/an
- Il faut compter autour de 2,5 - 3 € du Wc, prix pour les particuliers (pose comprise)
- Usage : production électrique en injection, en autoconsommation ou en réseau autonome (site isolé)



Production PV en accord avec l'activité humaine

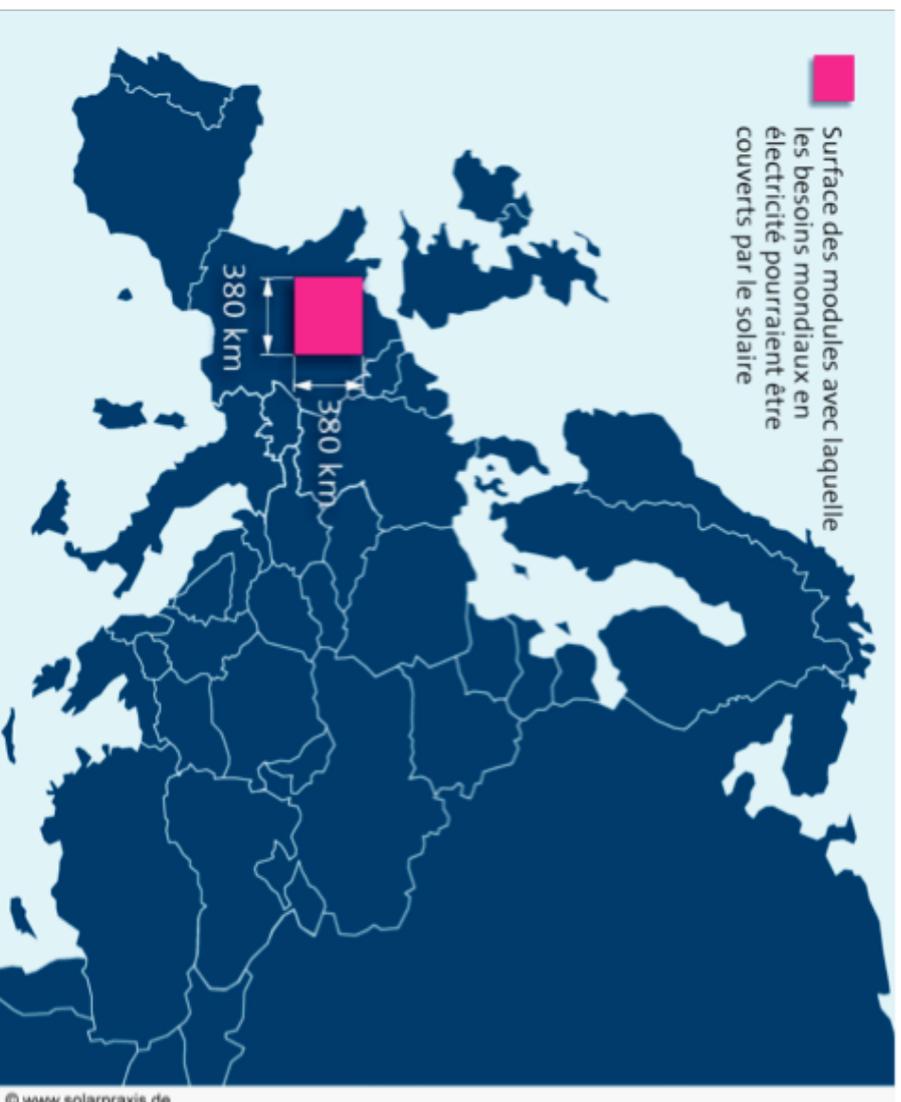


Source RTE : <http://www.rte-france.com/fr/eoo2/mix/eoo2/mix-mix-energetique>

Potentiel de l'énergie solaire Photovoltaïque

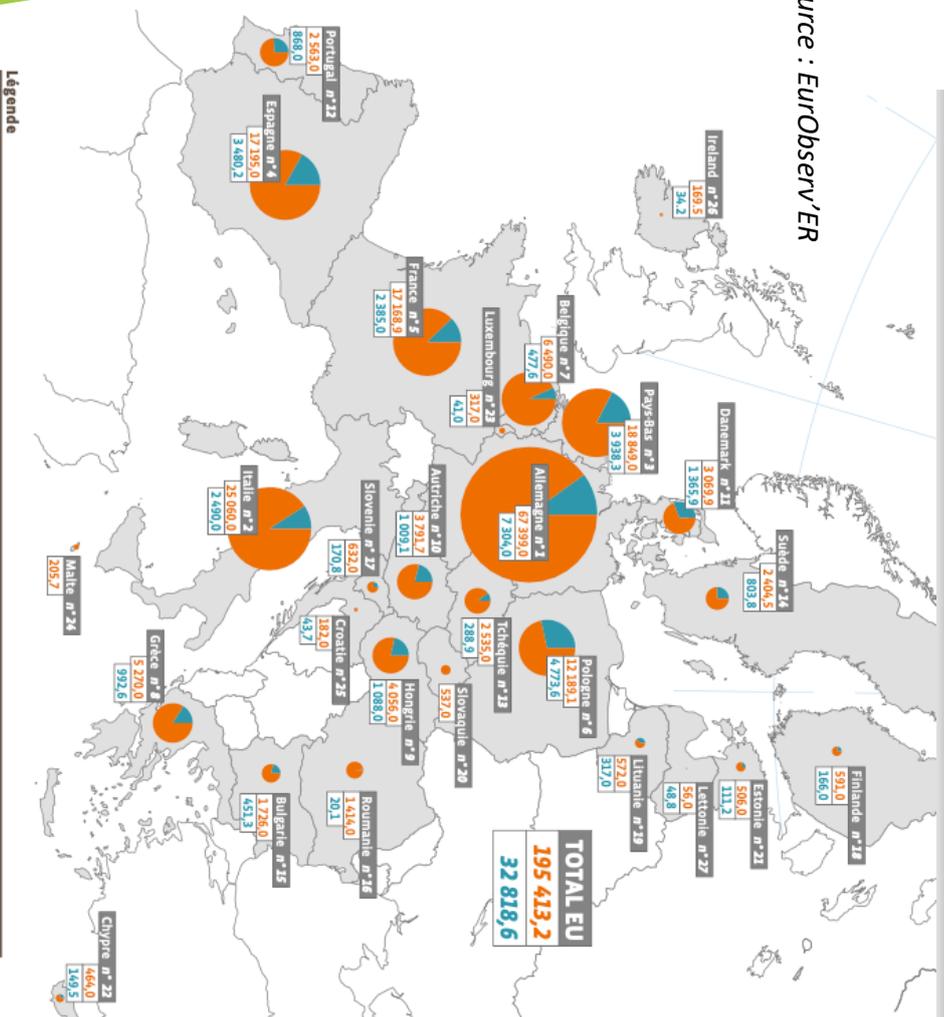
Bases : Conso mondiale 2018 = 23 000TWh

Production PV rendement 13% soit 130kWh/m².an



Le solaire Photovoltaïque en Europe

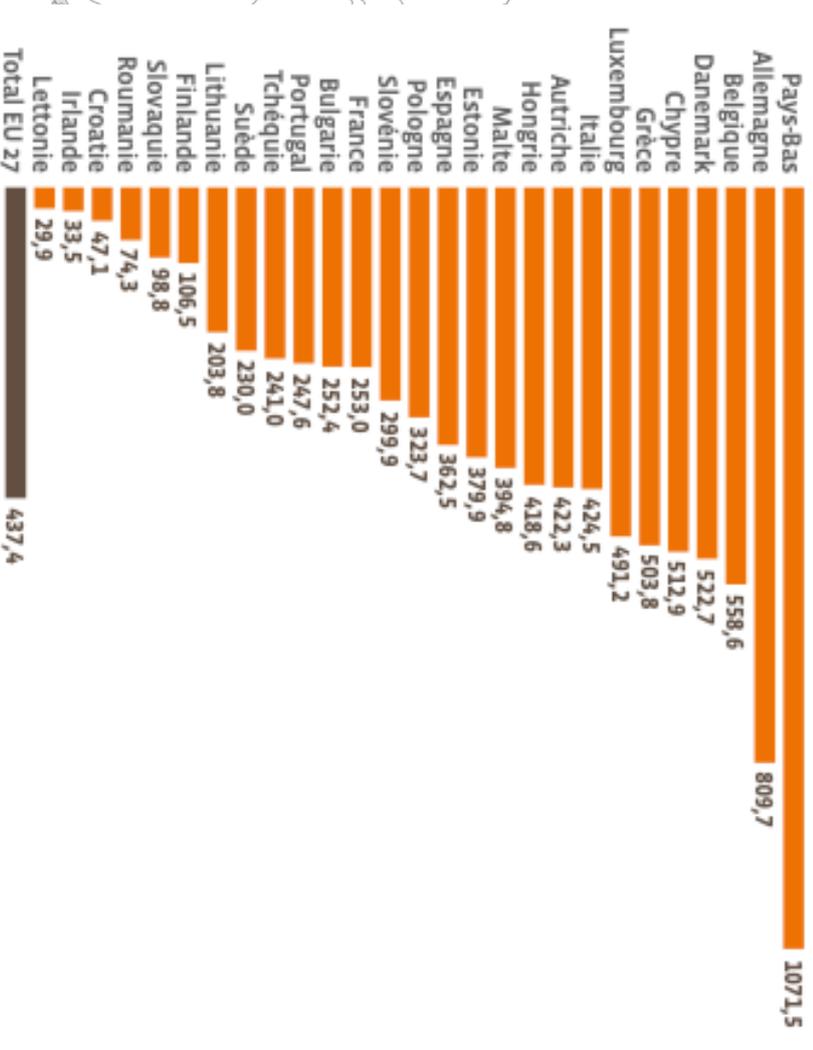
Source : EurObserv'ER



Légende
■ 195 413,2 Puissance photovoltaïque cumulée dans l'UE à 27 fin de l'année 2022 (en MW)
■ 32 818,6 Puissance photovoltaïque installée dans l'UE à 27 durant l'année 2022 (en MW)

* Puissance électrique maximale nette, hors réseau inclus. ** Estimation.
 Note : 6 MW démantelés au Portugal, 26,5 MW en France, 24,3 MW en Italie, 31 MW en Allemagne, 0,5 MW en Espagne. Source: EurObserv'ER 2023.

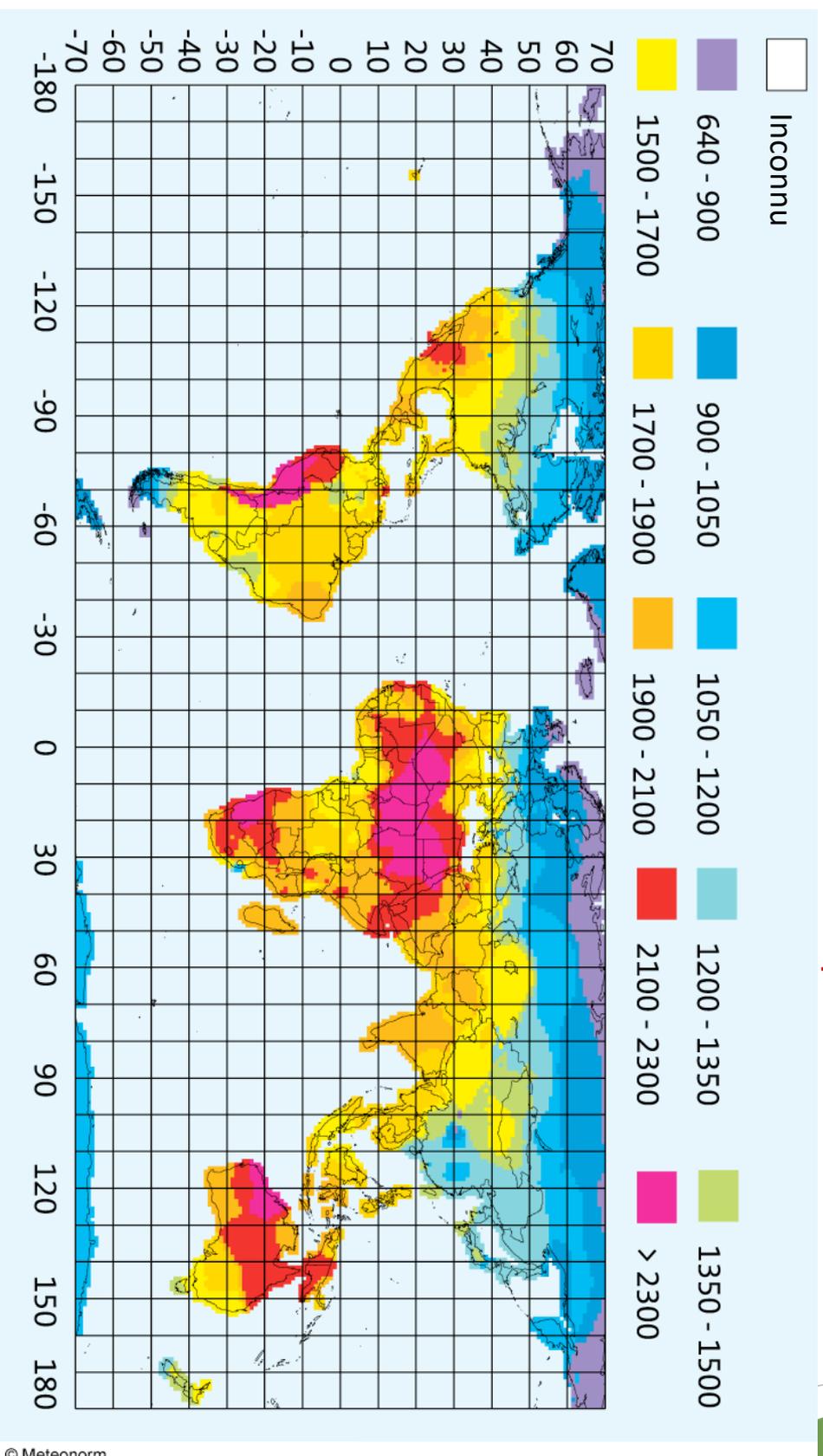
Puissance photovoltaïque par habitant des différents pays de l'Union européenne en 2022 (watt/hab)*



* Estimation. Source: EurObserv'ER 2023.

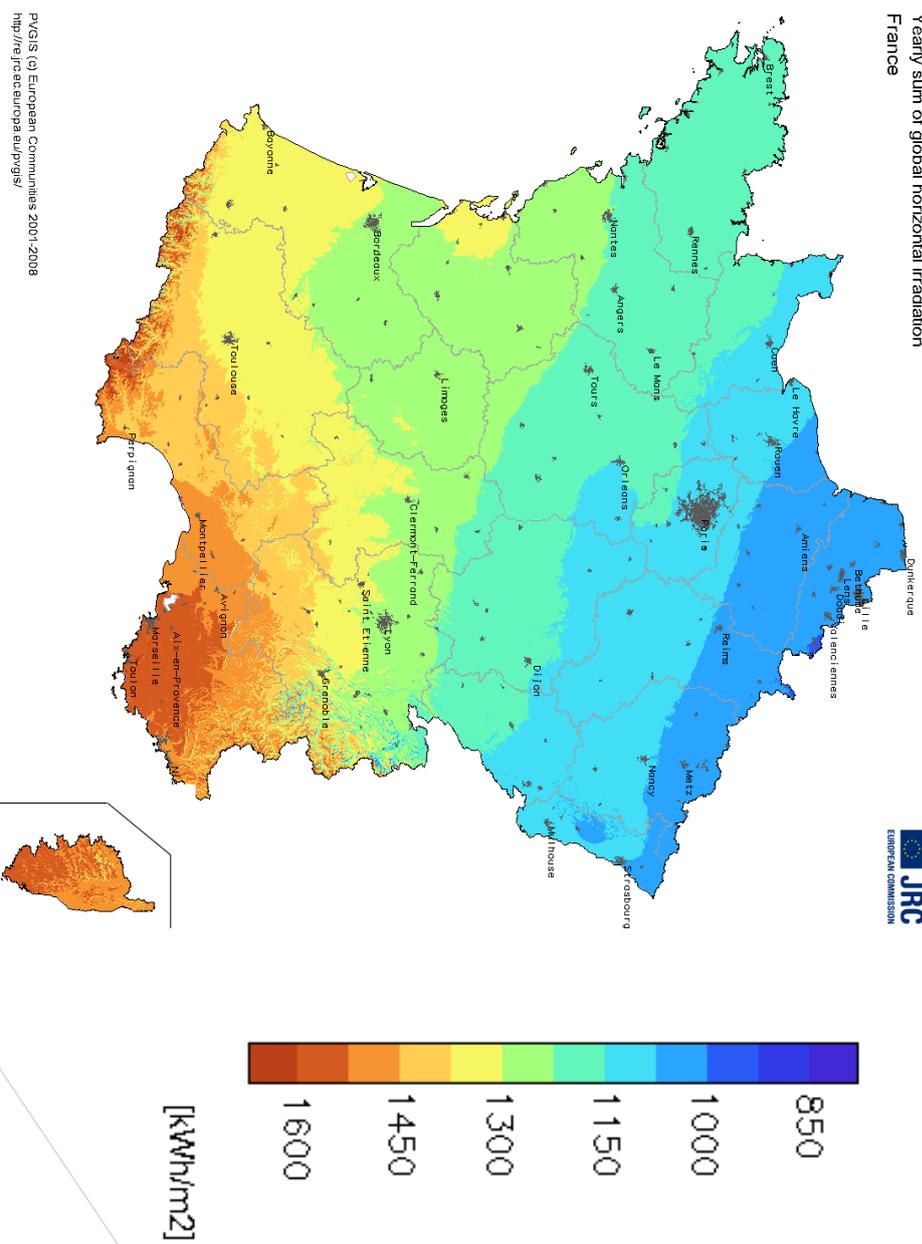
Rayonnement solaire dans le monde en kWh/m².an

Le soleil : source inépuisable

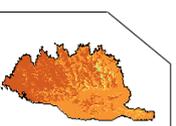


Ensoleillement annuel en France en kWh/m² par an sur une surface horizontale

Yearly sum of global horizontal irradiation
France

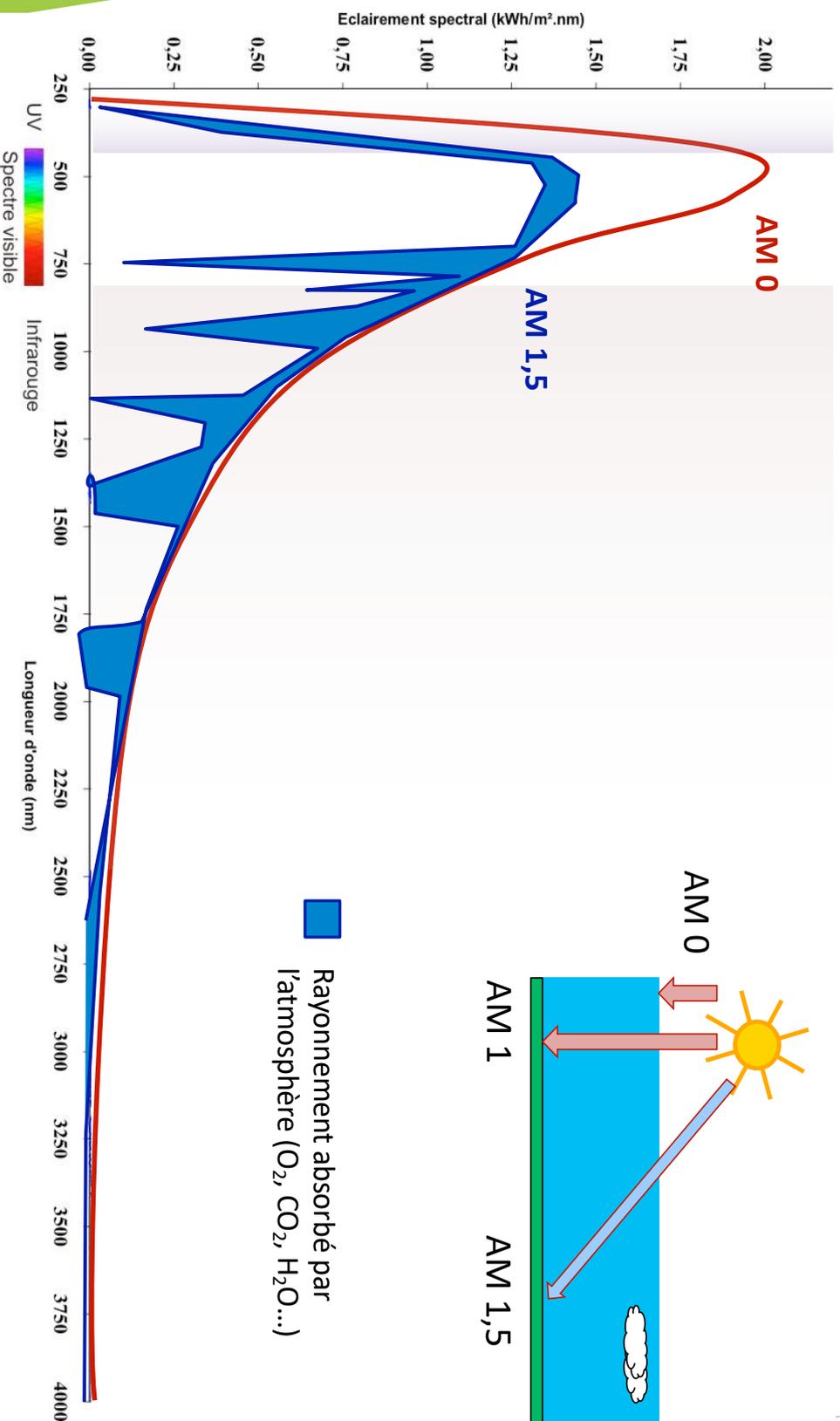


PVGIS (c) European Communities 2001-2008
<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>



Gisement solaire

Nature du rayonnement

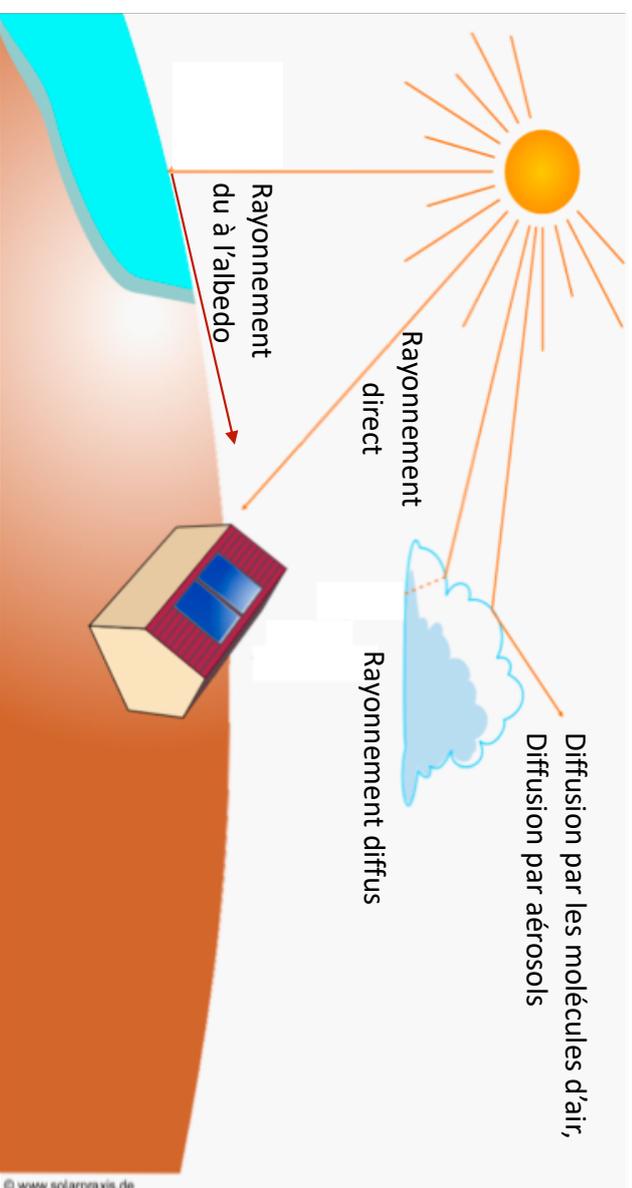


Composants du rayonnement solaire

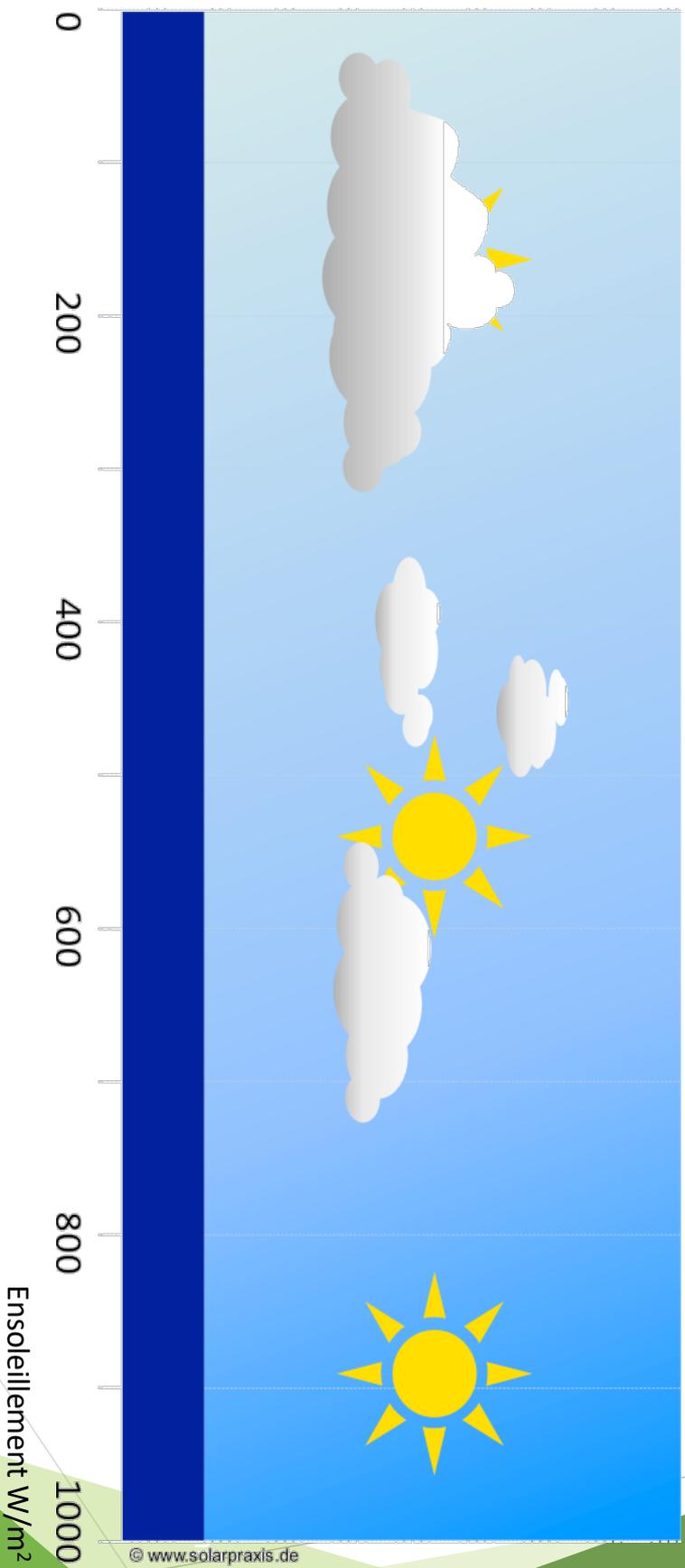
Rayonnement Global =

Rayonnement direct + Rayonnement diffus + Rayonnement réfléchi *

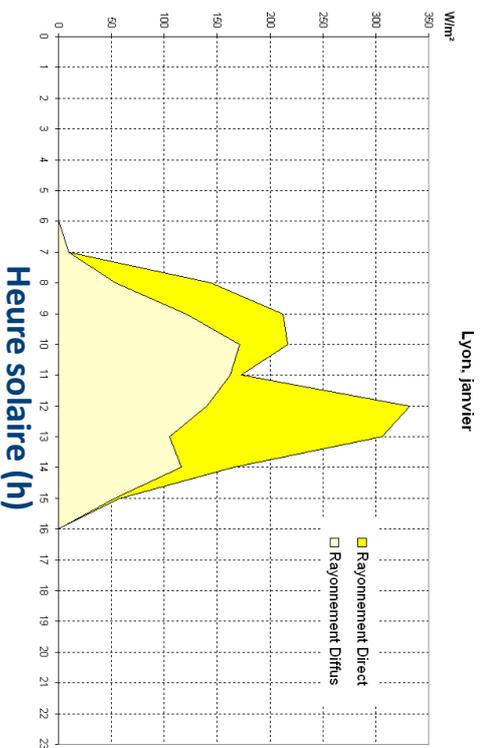
**(albédo x rayonnement total horizontal)*



Rayonnement en fonction de la météo

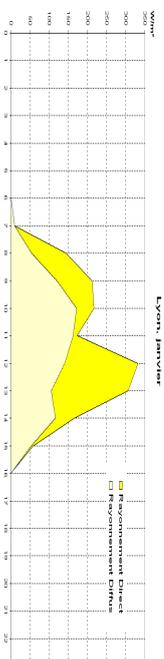


Station météorologique de Lyon (rayonnement global horizontal)

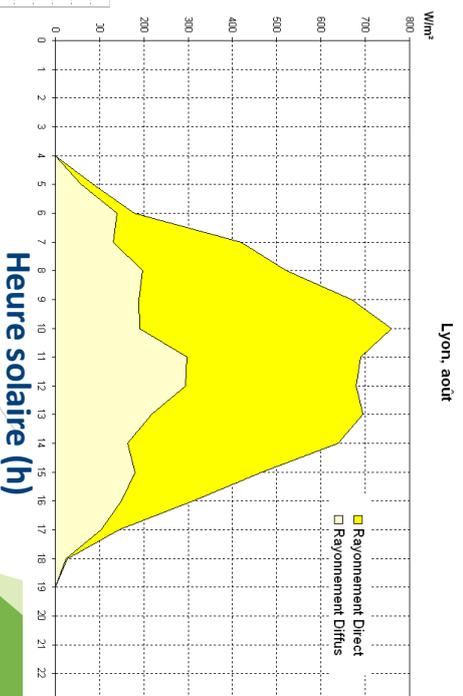


Un beau jour d'été →

30% de diffus

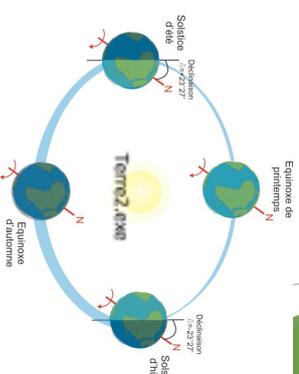


← Un jour d'hiver ordinaire
75 % de diffus

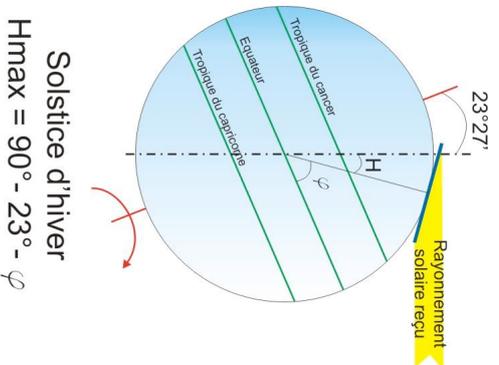


Le mouvement de la Terre autour du Soleil

- La terre tourne autour du soleil en décrivant une ellipse de faible excentricité et de période : 365 jours et $\frac{1}{4}$

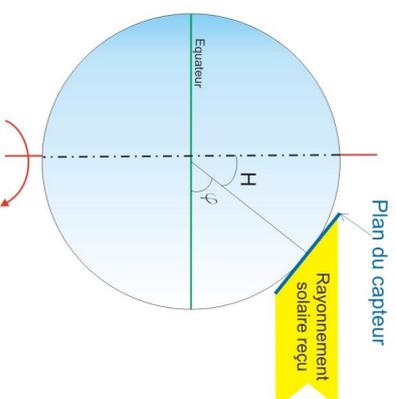


H_{max} = hauteur du soleil à midi – φ = latitude du lieu



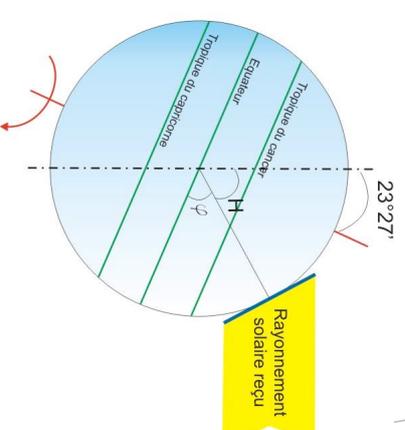
Solstice d'hiver

$$H_{\max} = 90^\circ - 23^\circ - \varphi$$



Equinoxe

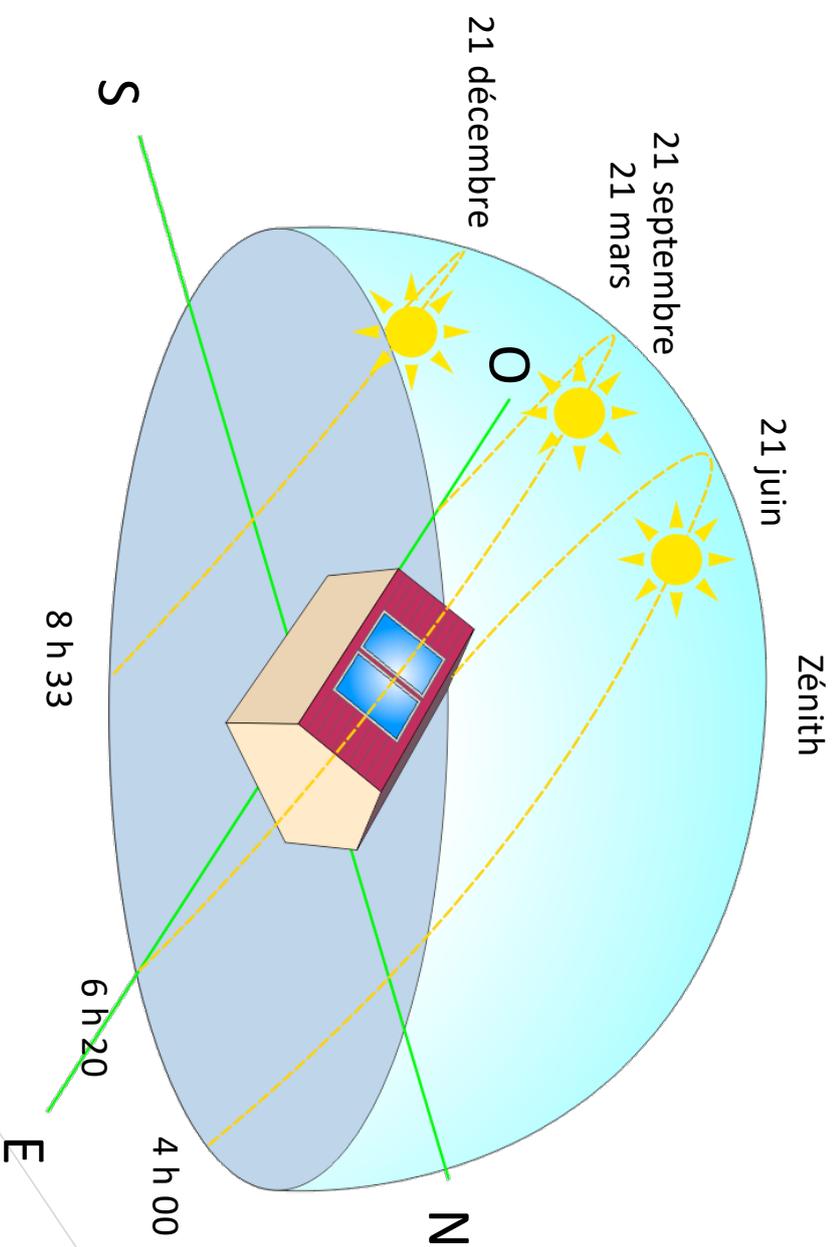
$$H_{\max} = 90^\circ - \varphi$$



Solstice d'été

$$H_{\max} = 90^\circ + 23^\circ - \varphi$$

Trajectoire annuelle et journalière du soleil (hémisphère nord)



Masques Solaires

Les étapes pour la détermination du masque d'une installation solaire :

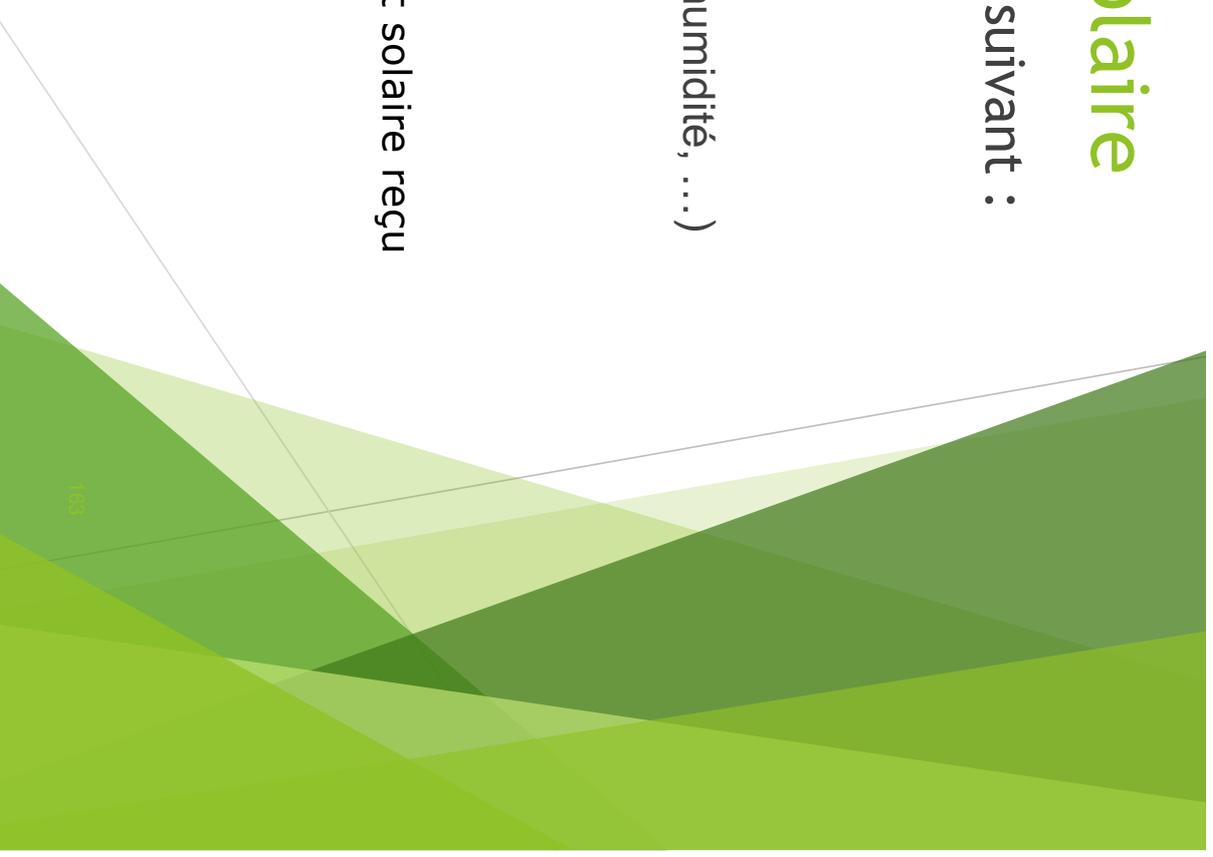
1. Repérage de la présence d'obstacles limitant l'ensoleillement
2. Identification de points clefs devant représenter la globalité des obstacle (courbe enveloppe)
3. Mesure des angles (azimut et hauteur angulaire) de chacun de ces points
4. Report des mesures dans le diagramme solaire correspondant au lieu.
5. Estimation visuelle du risque de diminution des performances de l'installation
6. Report des mesures dans un logiciel de dimensionnement (éventuellement)

Disponibilité de l'énergie solaire

Rayonnement solaire extrêmement variable suivant :

- Latitude du site
- La saison
- Les conditions météo (nébulosité, poussières, humidité, ...)
- L'heure de la journée (angle/azimut du soleil)
- Etc....

Toutefois d'une année sur l'autre le rayonnement solaire reçu reste sensiblement constant

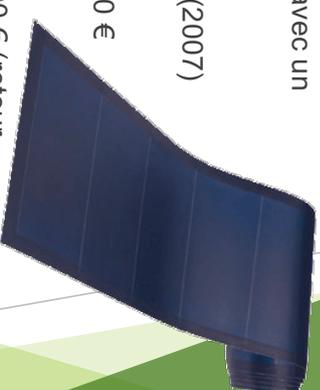


Le solaire photovoltaïque

Utilisation



- **Caractéristiques :**
 - 337 m² de toiture recouvert avec un matériau innovant,
 - 15,9 kWc installé
 - 15000 kWh/an à 57 c€/kWh (2007)
- **Financement**
 - Part Conseil Général : 56 500 € (50,7%)
 - 7 Vents : 54 800 € (49,3%)
- Total investissement : 111 300 € (retour sur investissement : 13,5 ans)



☞ De nombreux cas adaptés tant économiquement que techniquement

- Éclairage,
- Vitrage,
- imperméabilisation



Silicium monocristallin

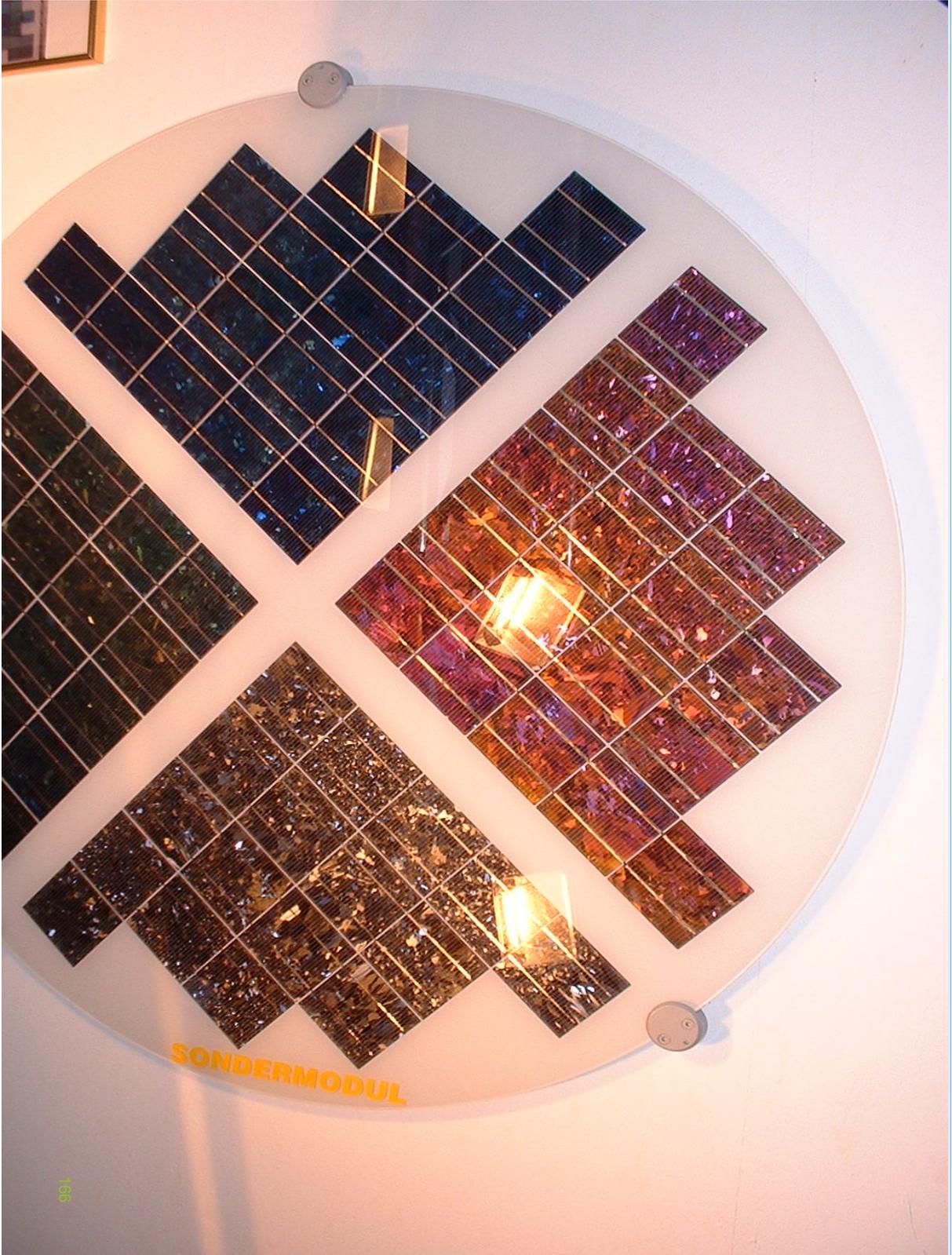


Fabrication énergivore (2 à 3 fois plus que les polycristallins)
Rendement : 12 à 15 %

Silicium polycristallin

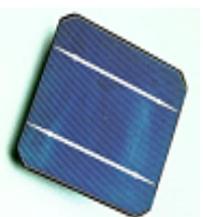


Peu de déchets de fabrication
Le plus utilisé
Rendement : 11 à 14



Filière Silicium Cristallin

- De la silice au silicium...



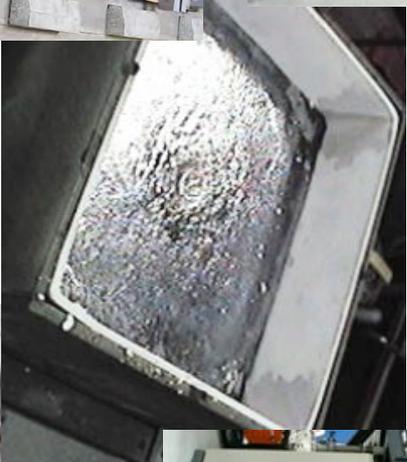
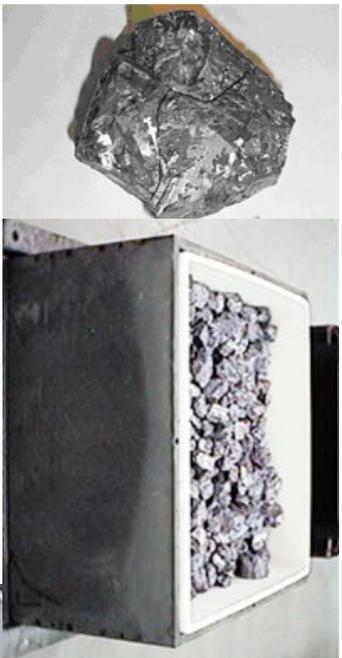
Procédé chimique
de purification

Moulage
Sciage

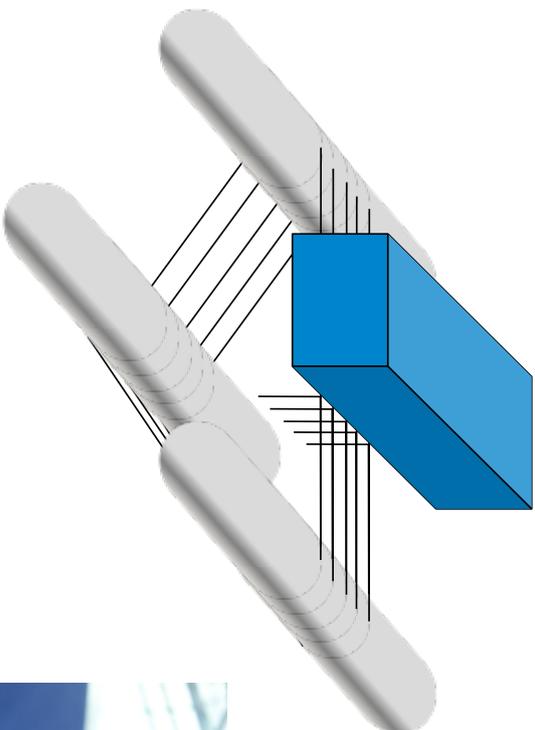
Traitement
De surface

Lamination

Filière Silicium Cristallin

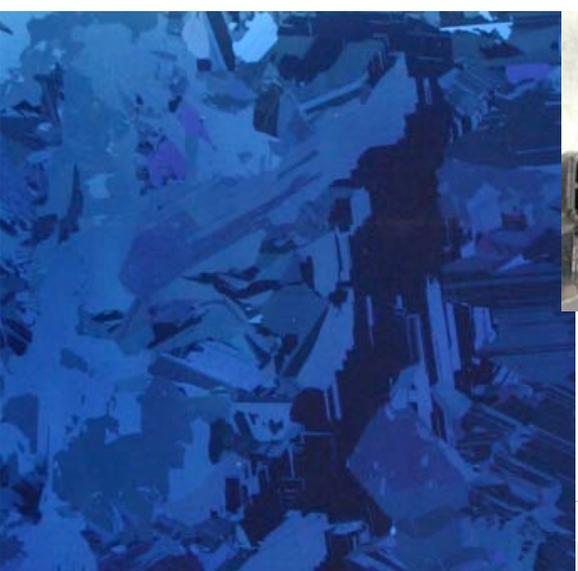
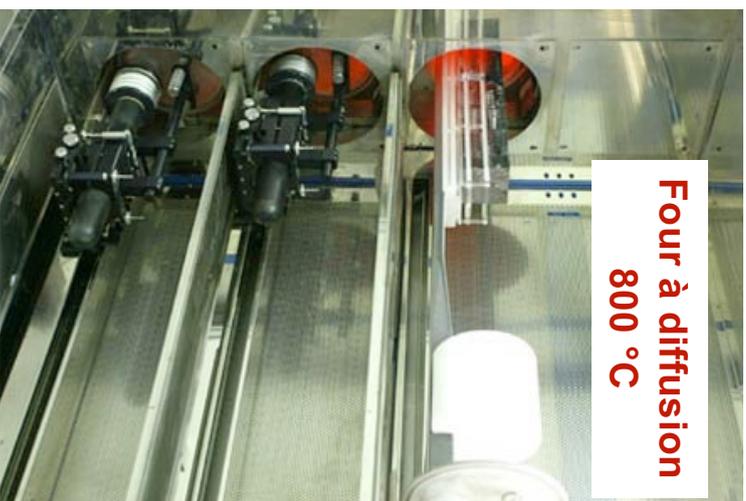


Filière Silicium Cristallin

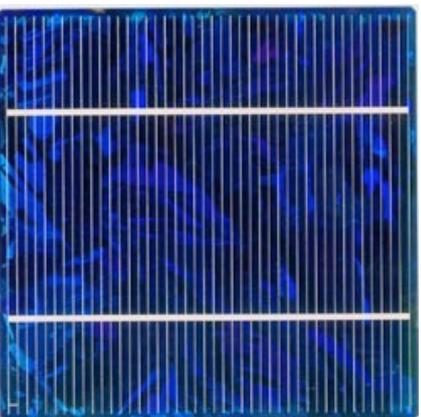


Photowatt Technologies

Filière Silicium Cristallin

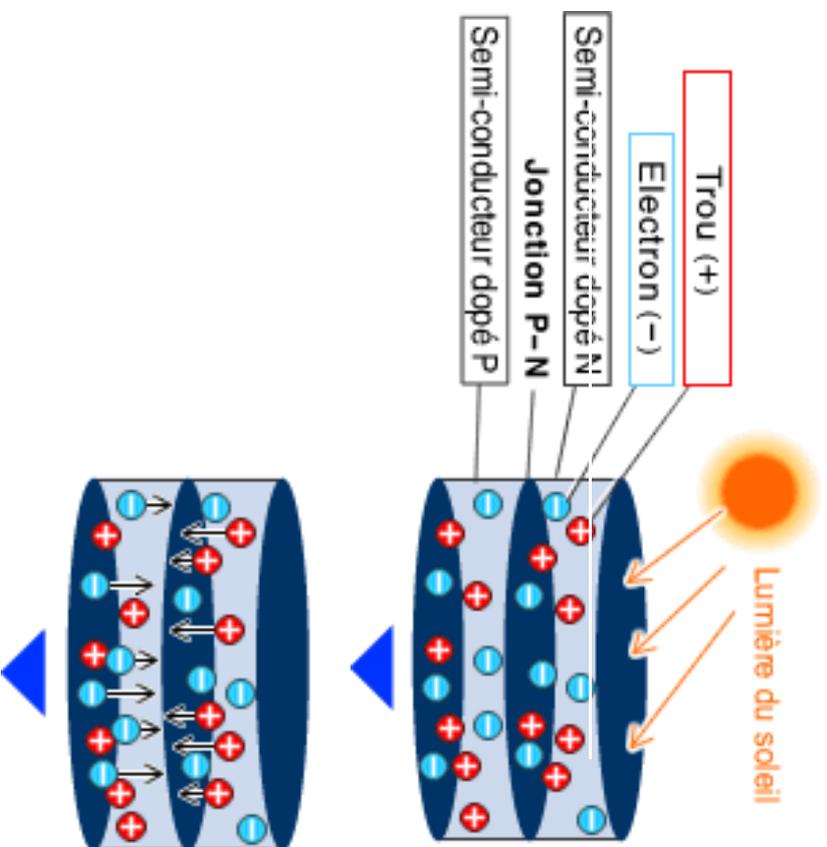


Filière Silicium Cristallin



Tri des cellules

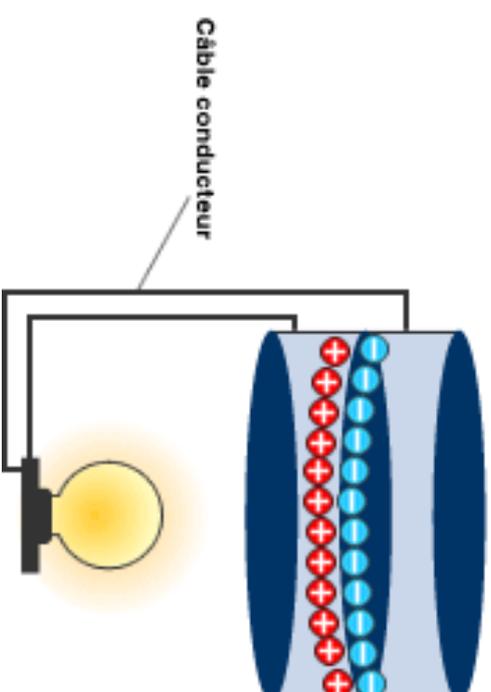
L'effet photovoltaïque



Sous l'action du rayonnement de la lumière du soleil, les électrons sont « décrochés » de leurs atomes.

Les « trous » et les électrons commencent à se déplacer vers la jonction P-N.

L'effet photovoltaïque



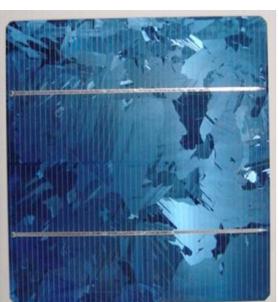
Quand les trous rejoignent les électrons au niveau de la jonction P-N, une tension est générée. Si une connexion extérieure est établie, un courant électrique continu est créé.

Exemples de cellules cristallines

Monocristallin



Polycristallin



Tailles les plus courantes :

4" = 101 mm

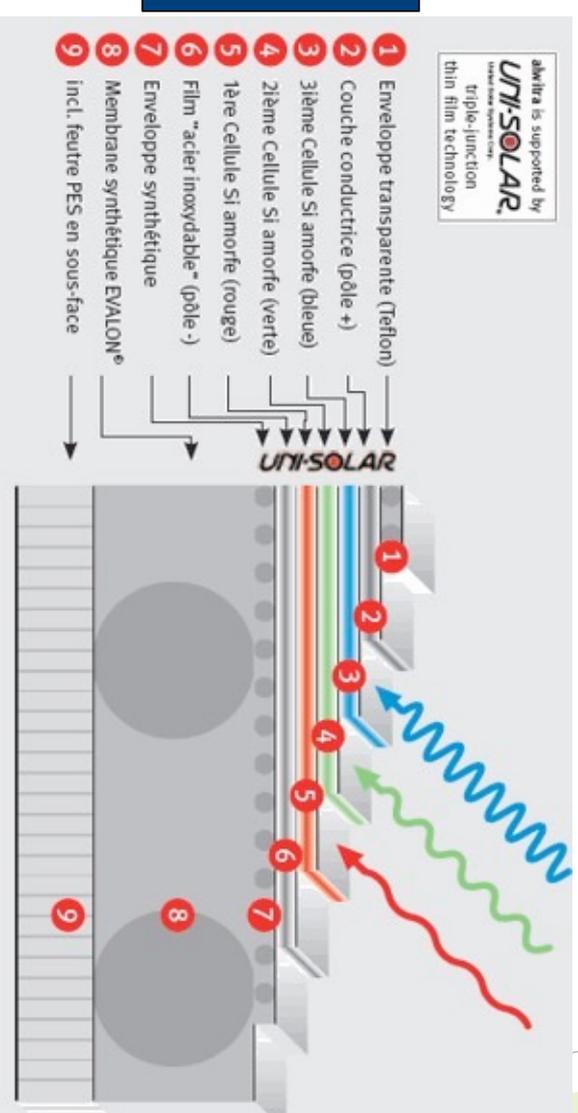
5" = 125,5 mm

6" = 155,5 mm

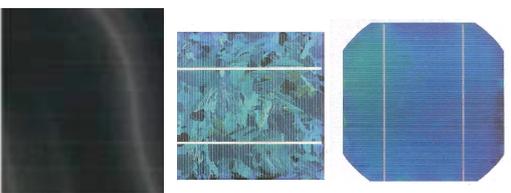
Exemples de cellules couches minces



La surface
n'est pas
standardisée

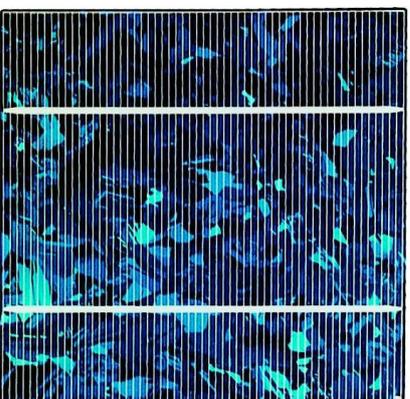


Rendement d'une cellule

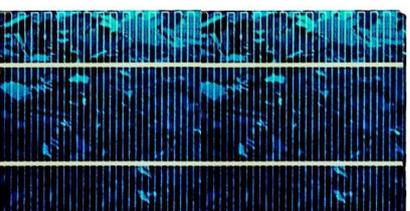


Technologie de cellule	Rendement actuel en laboratoire (2008)	Rendement actuel (2008)
m Si monocristallin	24,7 %	13 à 17 %
p Si polycristallin	19,8 %	9 à 15 %
a Si amorphe	13 %	4 à 9 %

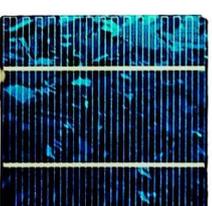
Différentes tailles de cellules en polycristallin



101 x 101



101 x 50,5

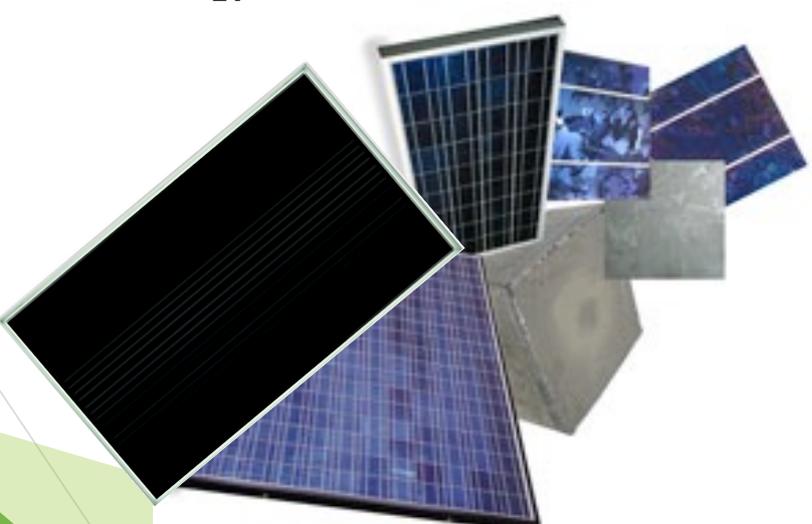


50,5 x 50,5

Performance à 1 kW/m ² et 25°C Valeurs typiques, cellule nue				Cellule	½ cellule	¼ cellule
Tension circuit ouvert	V_{co}	(V)	0,6	0,6	0,6	
Courant de court-circuit	I_{cc}	(A)	3	1,5	0,75	
Puissance Max. (env. 10%)	P_{mpp}	(W)	1,3	0,65	0,32	
Tension à puissance Max	V_{mpp}	(V)	0,47	0,47	0,47	
Courant à puissance Max	I_{mpp}	(A)	2,7	1,36	0,68	

La constitution d'un module photovoltaïque

1. Les cellules photovoltaïques sont fragiles et sensibles à l'environnement extérieur
→ nécessité de protection mécanique
2. La tension et la puissance d'une cellule ne sont pas adaptées aux applications courantes
→ nécessité de les coupler

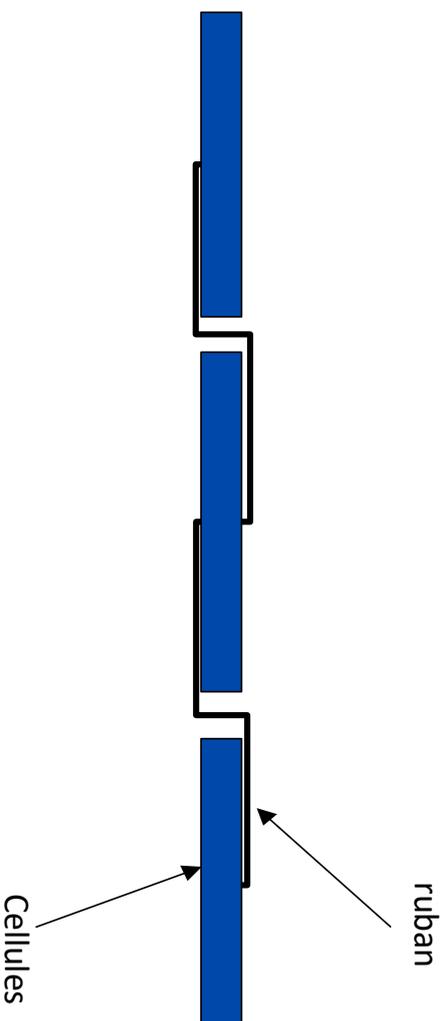


D'où constitution de **modules** photovoltaïques

La constitution d'un module photovoltaïque

Câblage des cellules photovoltaïques

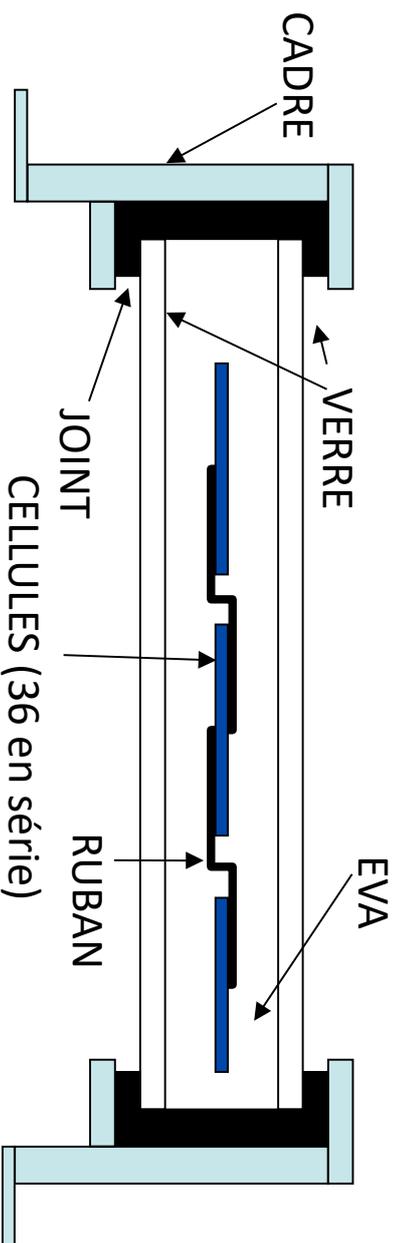
- Les cellules sont connectées entre elles par de fins rubans métalliques (cuivre étamé), du contact en face avant (-) au contact en face arrière (+)



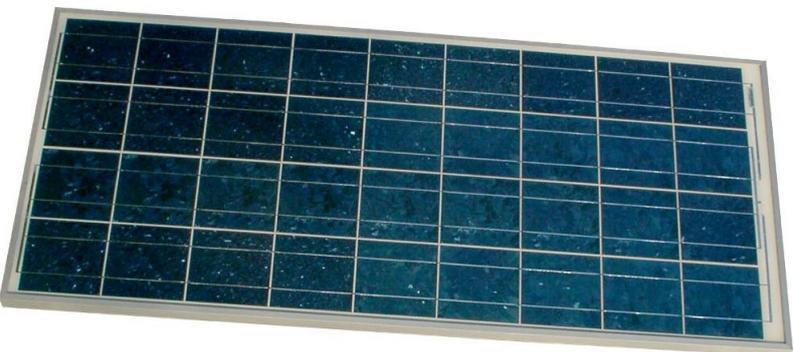
La constitution d'un module photovoltaïque

Encapsulation des cellules mises en série

- Les cellules sont encapsulées sous vide entre 2 films thermoplastiques transparents (EVA: Ethylène Acétate de Vinyle)
- Le plus souvent présence d'un cadre en aluminium avec un joint périphérique pour permettre la dilatation
- Un verre trempé en face avant protège les cellules sur le plan mécanique tout en laissant passer la lumière
- La face arrière est constituée d'un verre ou d'une feuille TEDLAR



La constitution d'un module photovoltaïque



Connexion

- La boîte de connexion étanche regroupe les bornes de raccordement, les diodes by-pass
- Les 2 câbles unipolaires y sont raccordés



La connectique

Pour les câbles inter-modules, de groupes et principaux

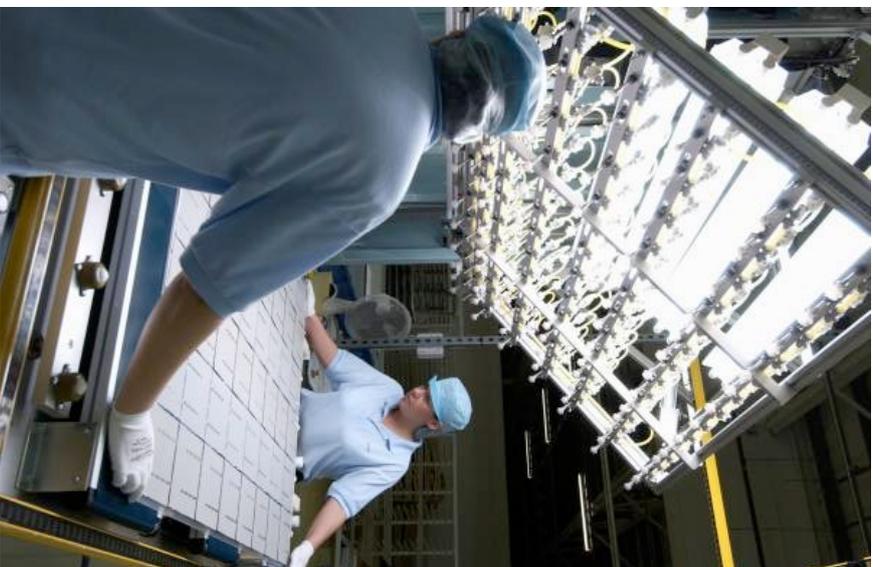
- Câbles unipolaire équivalent classe II - PV 1000-F (cf. guide UTE C 32-502)
- Stabilité aux UV – Tenue aux intempéries –
- Tension : 1,15 Vco minimum,
- en pratique niveaux de tension: 600 à 1000V
- Tenue en température :
 - 70°C température ambiante pour courant max
 - 90°C à l'âme
- Connecteurs spécifiés pour courant continu et dimensionnés à l'identique des câbles
- Étiquette signalant « ne pas déconnecter en charge »
- Protection contre les contacts directs
- Tenue aux intempéries (température, UV, étanchéité IP54,...)



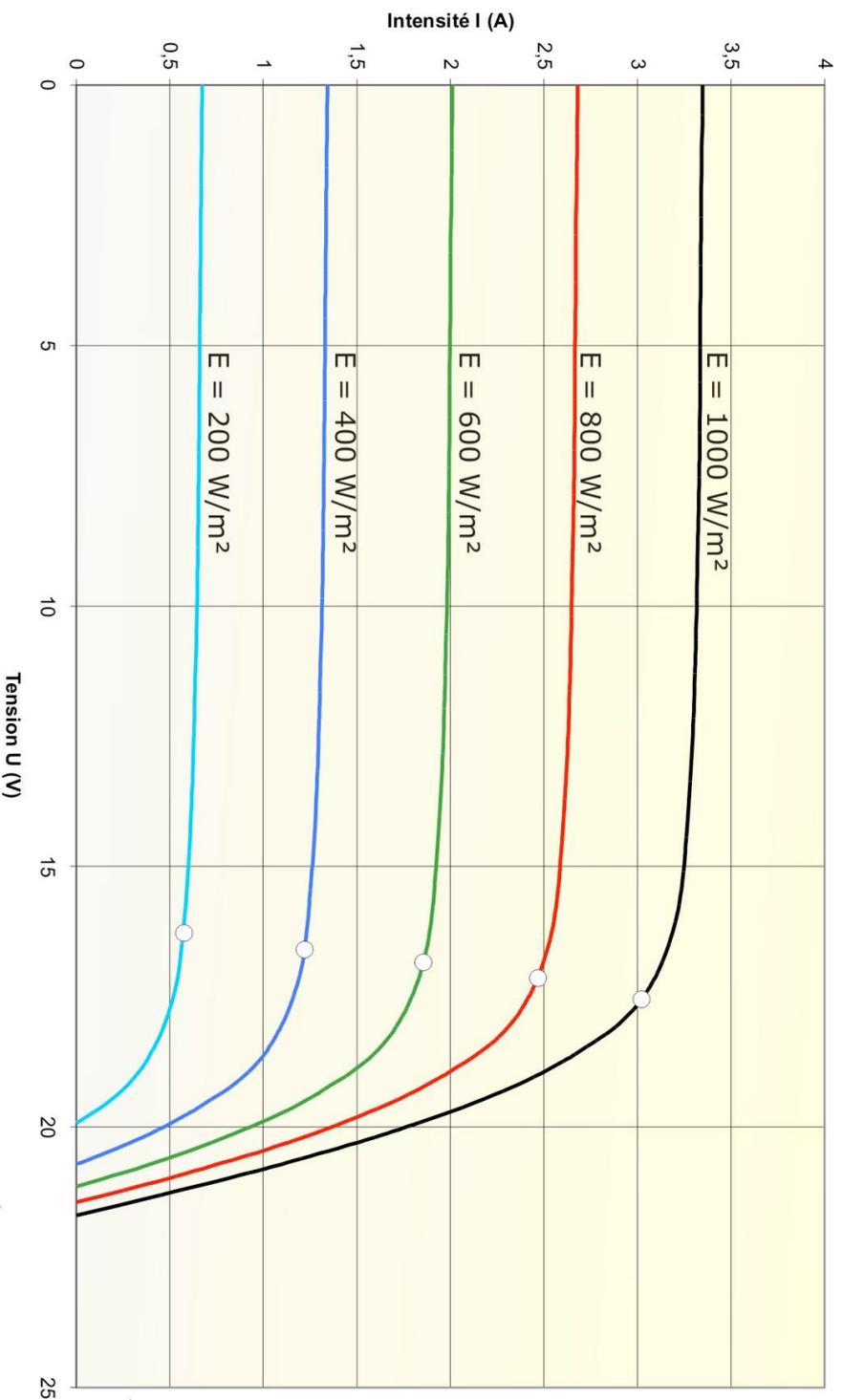
La constitution d'un module photovoltaïque



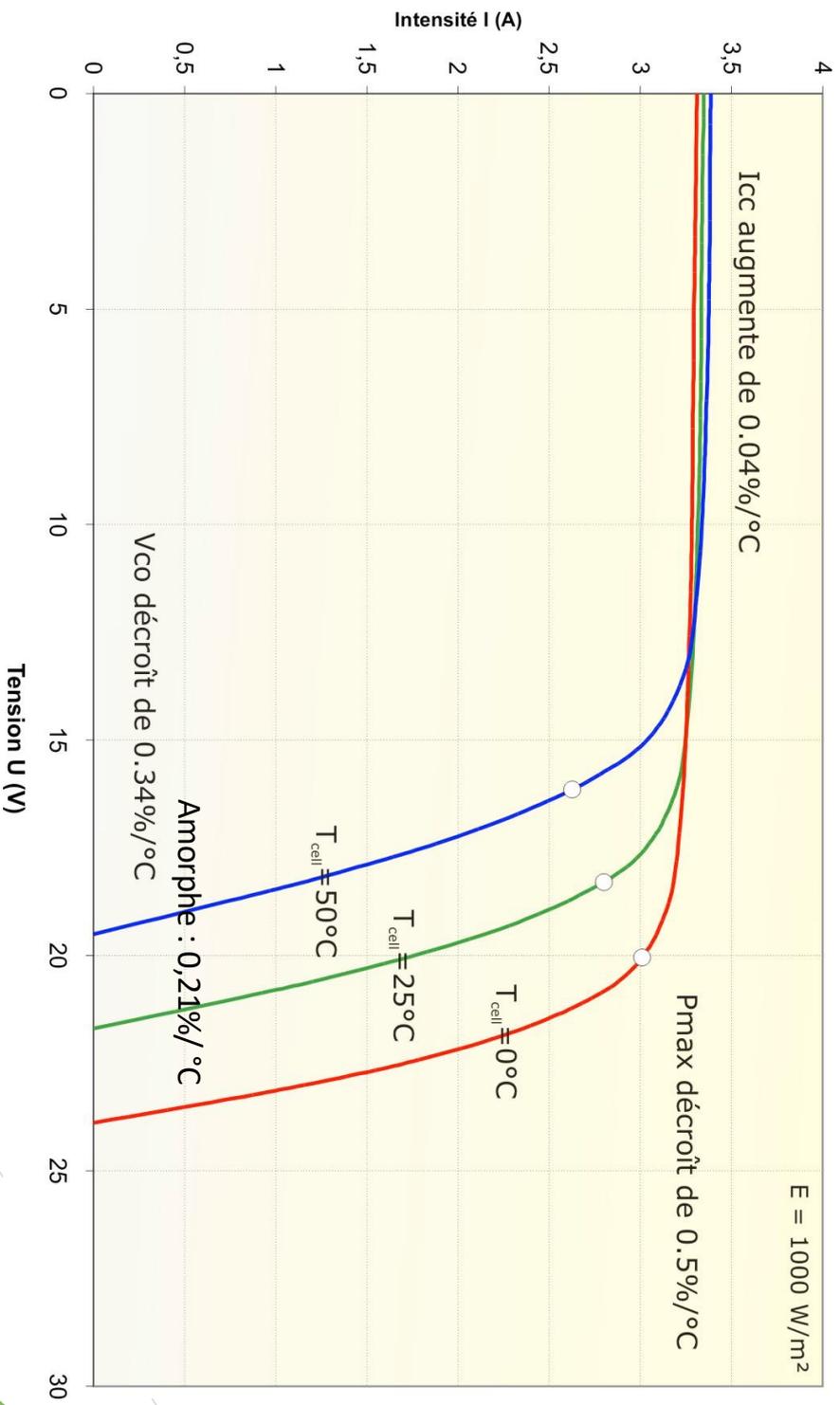
La constitution d'un module photovoltaïque



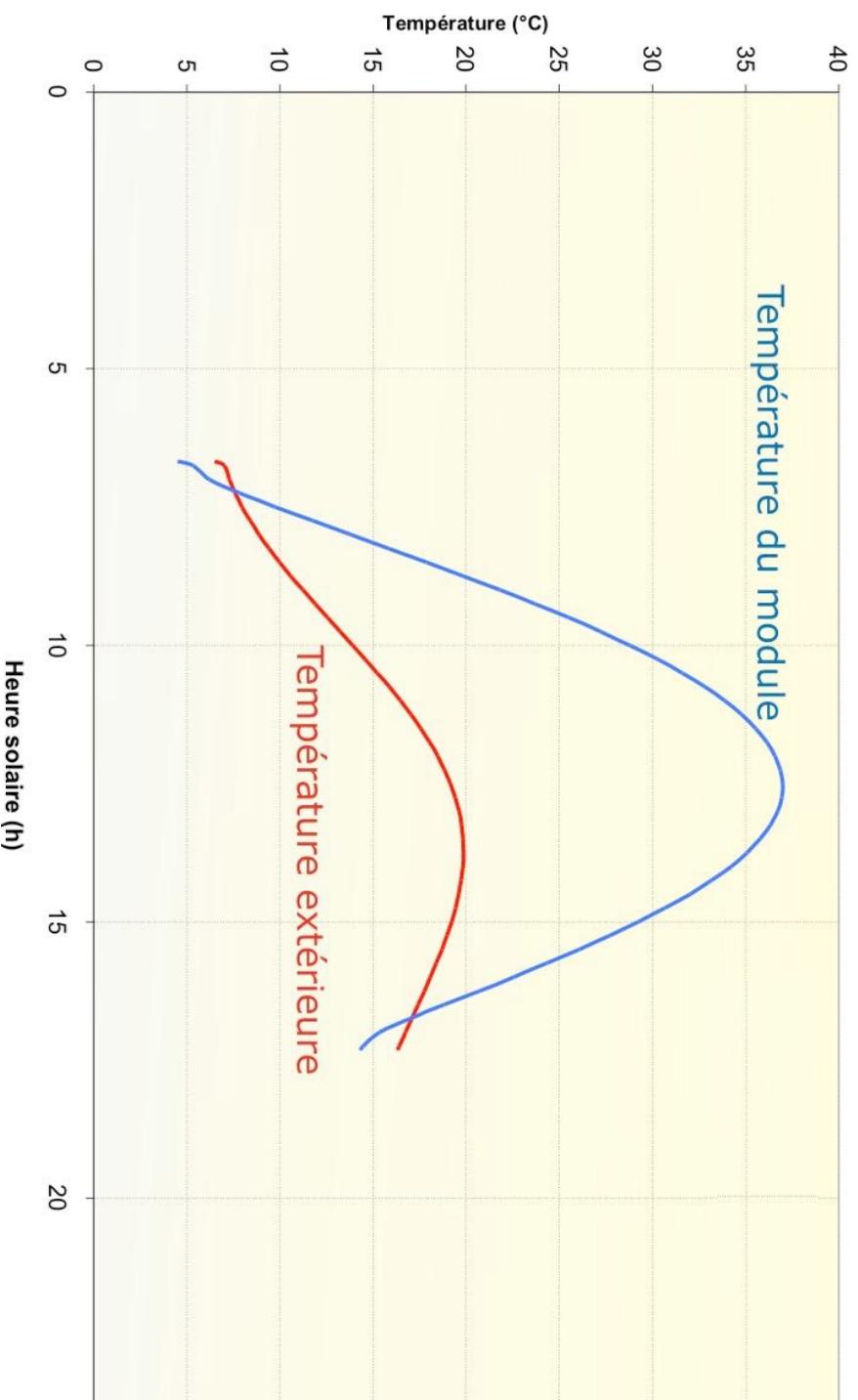
Caractéristiques d'un module photovoltaïque au silicium cristallin selon l'ensoleillement



Caractéristiques d'un module photovoltaïque au silicium cristallin selon la température



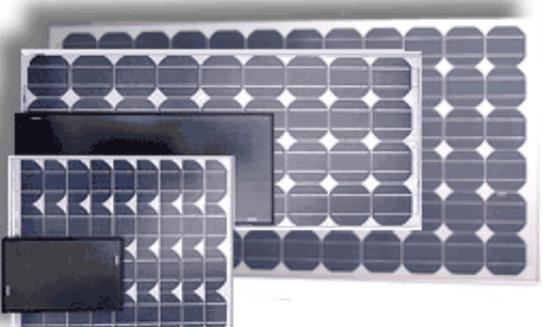
Température d'un module au silicium cristallin en fonctionnement



Les modules photovoltaïques

Caractéristiques :

- Isolation classe II
- Diodes by-pass intégrées
- Tension maximum admissible élevée (500 à 1000 V)
- Courant inverse admissible : au moins 2 x I_{cc}
- Connecteurs débromochables détrompés

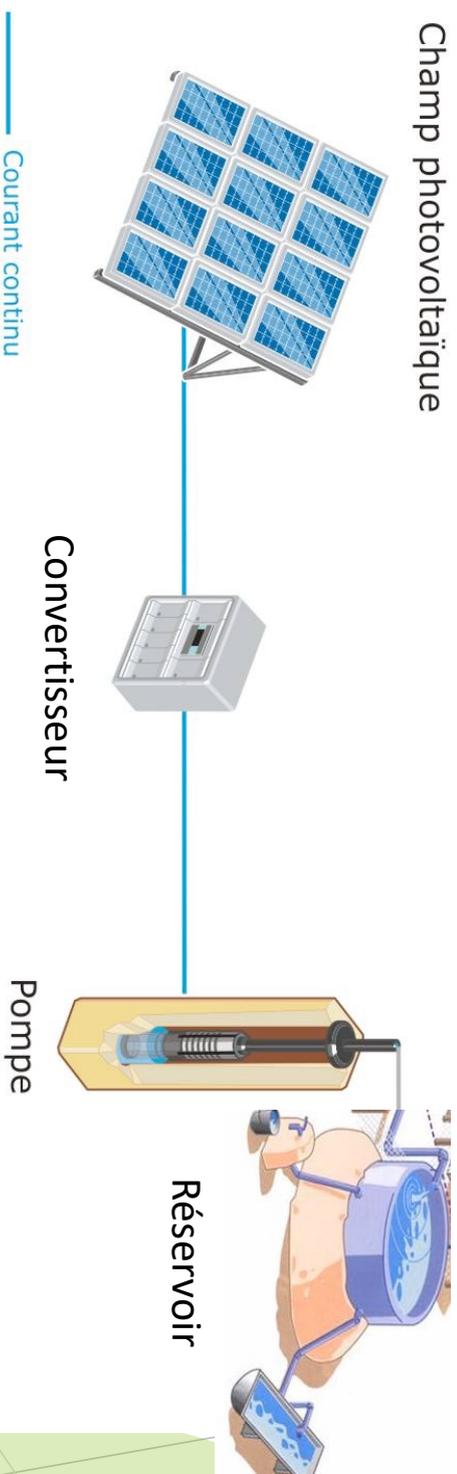


Le champ de modules photovoltaïques



Les systèmes autonomes au fil du soleil

Application principale : Pompage



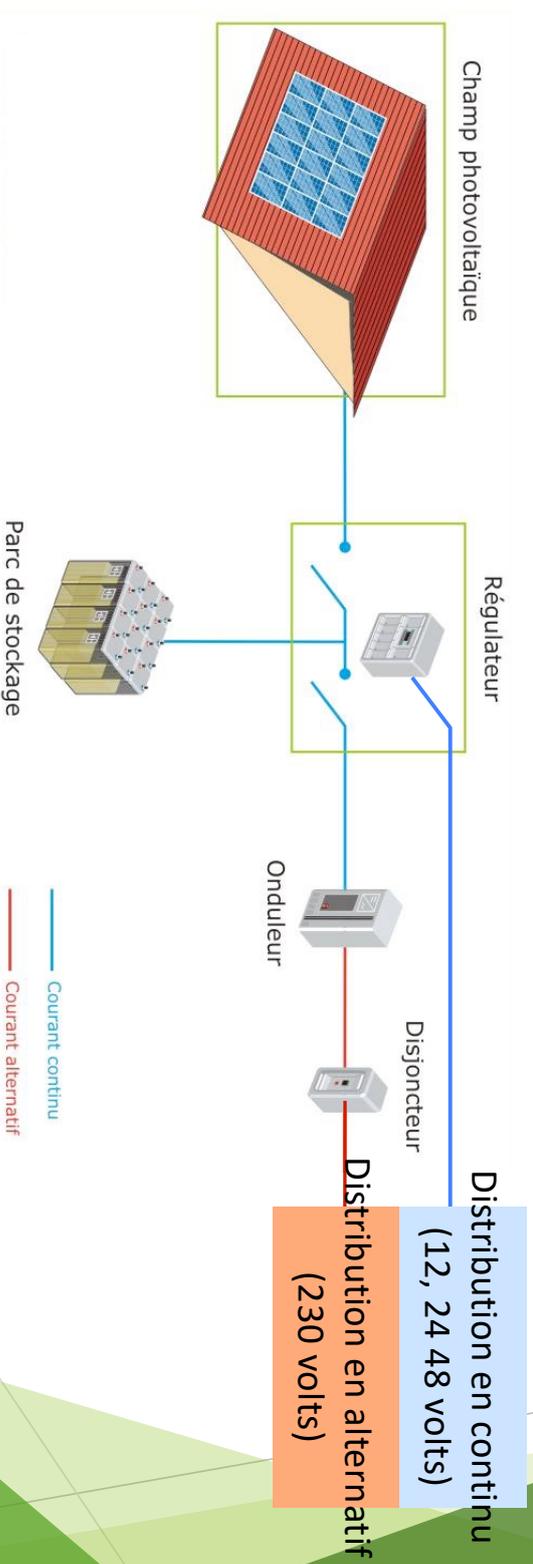
Les systèmes autonomes au fil du soleil

Application principale : Pompage



Les systèmes autonomes avec batterie d'accumulateurs

Applications principales : Électrification habitat, télécommunication, signalisation routière, etc.

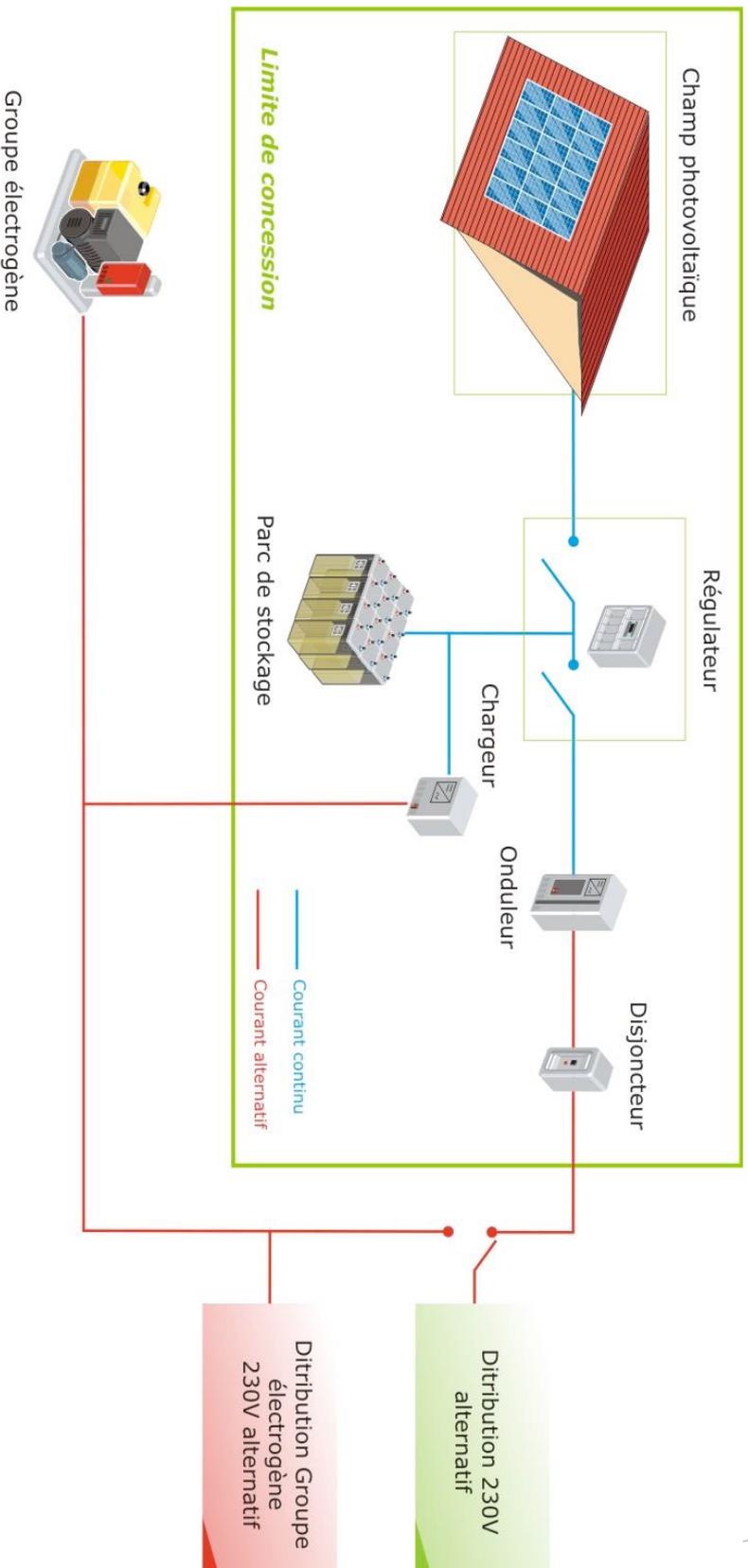


Les systèmes autonomes avec batterie d'accumulateurs

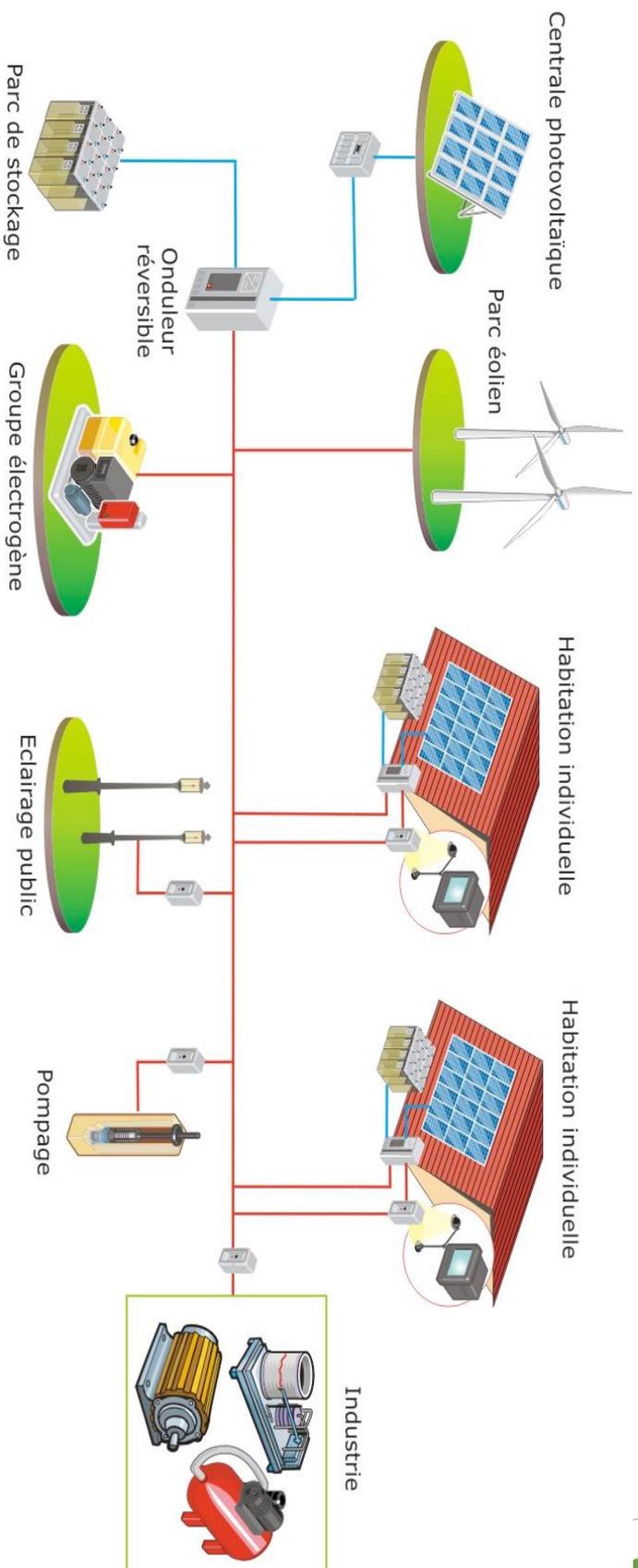
Applications principales : Électrification habitat, télécommunication, signalisation routière, etc.



Les systèmes hybrides individuels

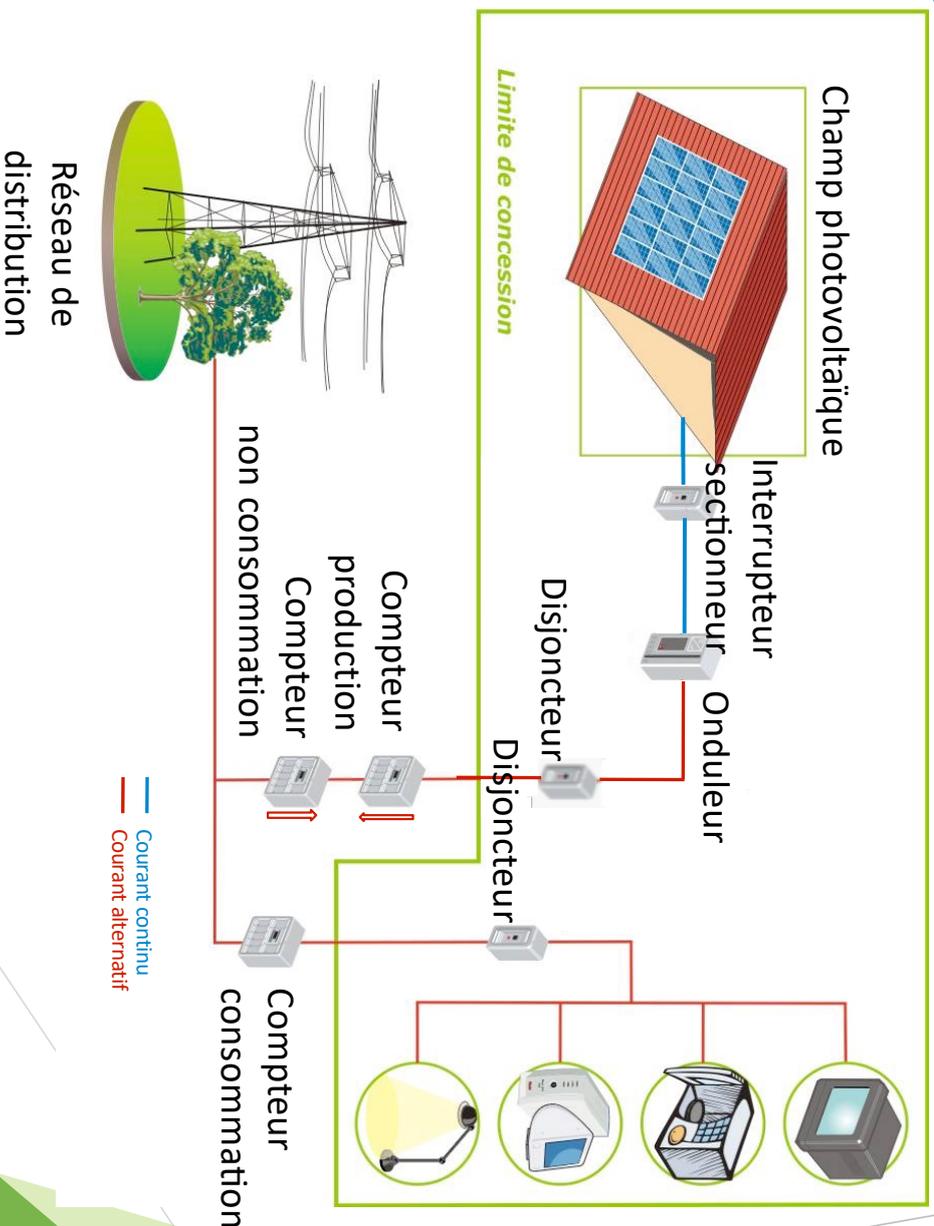


Les systèmes hybrides (Micro Grid)



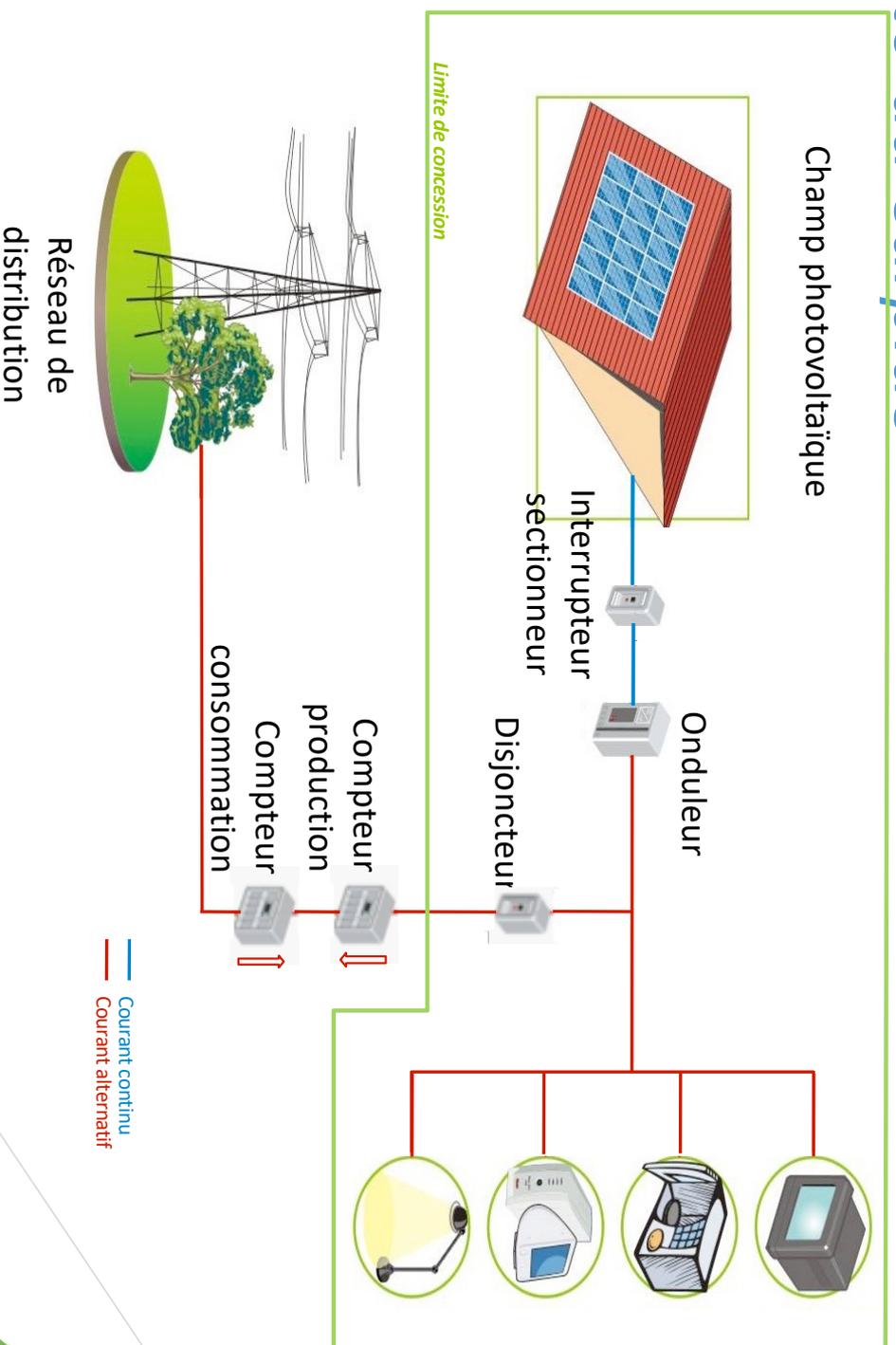
Les systèmes PV raccordés réseau

Vente totale



Les systèmes PV raccordés réseau

Vente du surplus





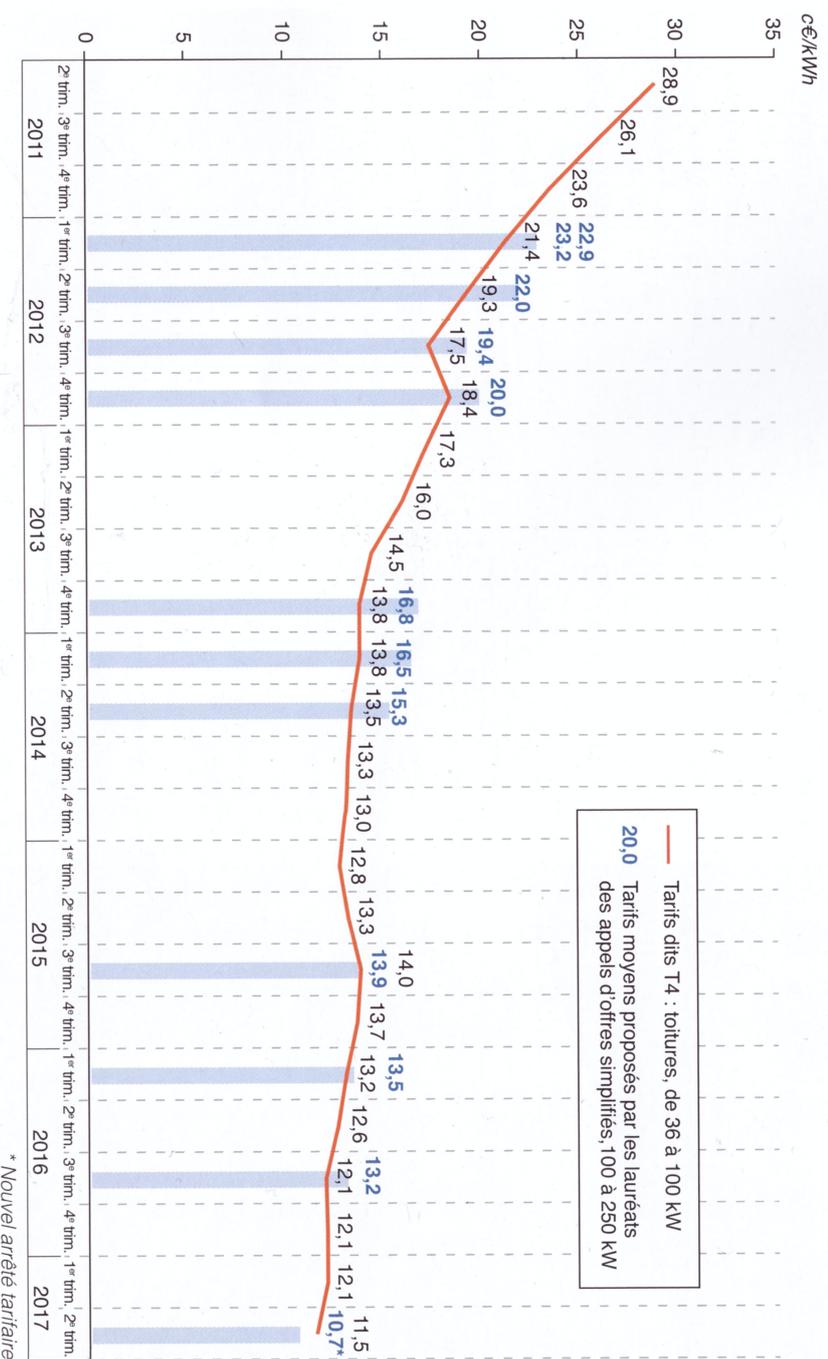
La tuile solaire



198

EVOLUTION DU TARIF EN FRANCE:

ÉVOLUTION TRIMESTRIELLE DES TARIFS D'ACHAT

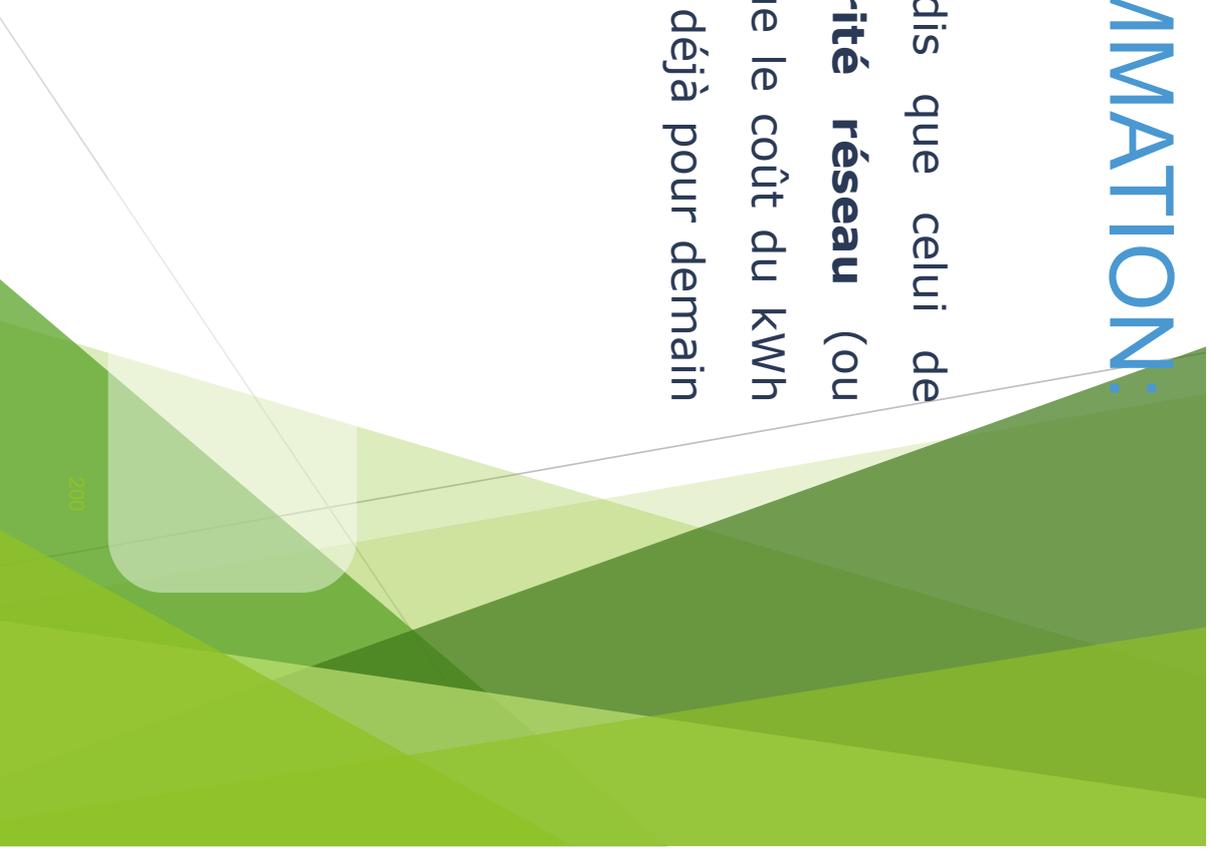


SOURCE : OBSERVATOIRE DE L'ÉNERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE EN FRANCE, JUULIET 2017.

* *Nouvel arrêté tarifaire*

PARITE ET AUTOCONSOMMATION:

Le prix des installations photovoltaïques baisse tandis que celui de l'électricité devient de plus en plus cher. La **parité réseau** (ou **compétitivité du photovoltaïque**), c'est-à-dire lorsque le coût du kWh photovoltaïque sera égal au coût du kWh du réseau, est déjà pour demain dans certains pays.



PARITE ET AUTOCONSOMMATION:

L'autoconsommation est un terme à la mode mais attention de ne pas confondre autoconsommation du point de vue du flux financier avec autoconsommation du point de vue du flux électrique.

En France on peut désormais faire de l'autoconsommation collective sur un rayon de 1 Km.

Dans les faits, les électrons obéissent à la loi de proximité et vont au point de consommation le plus proche. Du fait que l'électricité photovoltaïque n'est pas toujours produite au même moment qu'elle est consommée, du point de vue du flux électrique, un particulier dépasse rarement 20 % à 40 % d'autoconsommation

(le reste est utilisé « ailleurs » - c'est-à-dire injecté au réseau dans la plupart des cas, ou plus rarement dans des batteries, selon la configuration du système).