

Energie solaire photovoltaïque



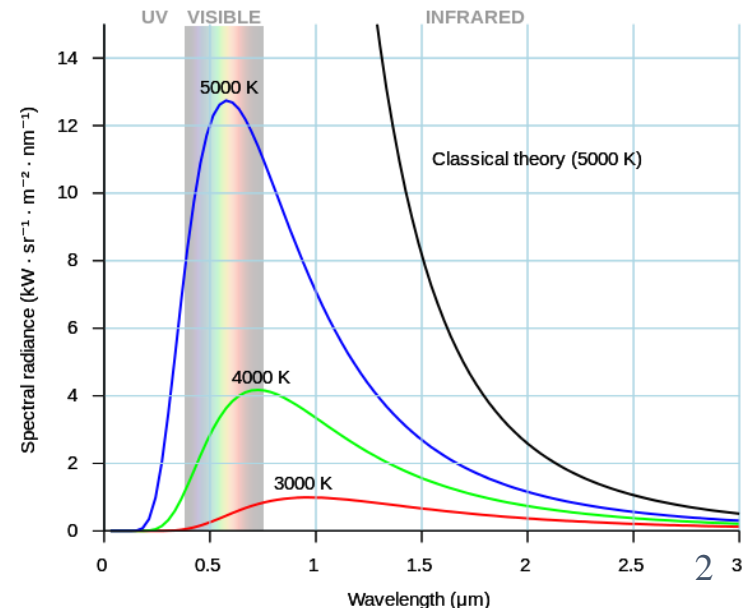
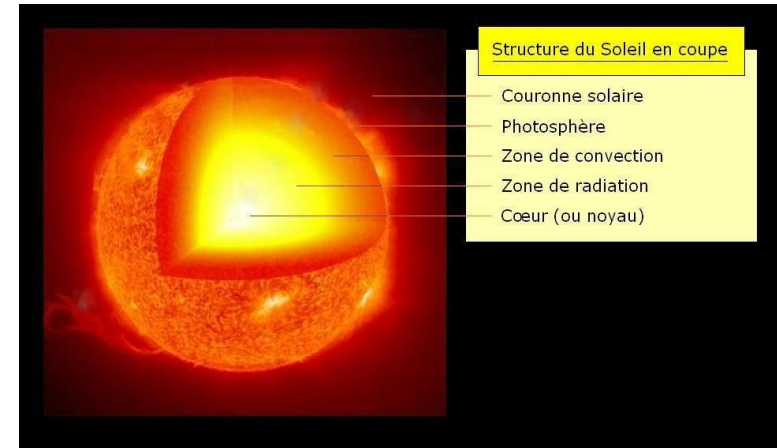
Elhoussin ELBOUCHIKHI

Bureau : A2 - 80



Le Soleil : Le gisement énergétique

- Sa masse volumique est supérieure à 150 000 kg/m³ et sa température approche les 15 millions de kelvins
- Réactions thermonucléaires exothermiques (fusion nucléaire) dans son cœur (environ 0,25 rayon solaire)
- Photosphère : partie externe de l'étoile qui produit le rayonnement solaire (épaisseur environ 400 km).



➡ Permet de définir la température effective du Soleil : 5 781 K

- Le rayonnement produit par la photosphère a les caractéristiques du rayonnement émis par un corps noir

$$M = e \cdot \sigma \cdot T^4$$

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$$

e: émissivité d'un corps (=1 pour un corps noir)

1. En utilisant la loi de Boltzmann, retrouver la puissance totale rayonnée par le soleil
(Diamètre moyen du soleil : 1 392 000 km)

La valeur du flux d'énergie incidente au niveau de la terre en W/m^2 appelée également **l'irradiance** égale à 1367 W/m^2 par l'organisation météorologique internationale (mesures satellitaires)

2. Donner une estimation de la valeur de la puissance totale reçue par la terre
(Rayon équatorial de la terre : 6 378,137 km)

3. Donner la valeur de l'énergie annuelle correspondante

QUEST

1. La loi de Boltzmann peut être utilisée pour calculer la puissance totale rayonnée par le soleil en utilisant la température de la surface du soleil et la surface totale du soleil. La température de la surface du soleil est d'environ 5500 degrés Celsius et la surface totale du soleil est d'environ $6,09 \times 10^8$ mètres carrés. En utilisant la loi de Boltzmann, la puissance totale rayonnée par le soleil peut être calculée en utilisant la formule suivante:

$$P = \sigma * A * T^4$$

où P est la puissance totale rayonnée par le soleil, σ est la constante de Stefan-Boltzmann, A est la surface totale du soleil et T est la température de la surface du soleil. En utilisant ces valeurs, la **puissance totale rayonnée par le soleil** peut être calculée comme étant environ **38×10^{26} watts**.

2. La puissance totale reçue par la Terre dépend de la distance entre le Soleil et la Terre, de l'angle sous lequel le Soleil frappe la surface de la Terre et de l'absorption et de la réflexion de la lumière par l'atmosphère et la surface de la Terre. **La puissance totale reçue par la Terre est d'environ 1366 watts par mètre carré**, ce qui équivaut à environ **174×10^{17} watts** pour la surface totale de la Terre. Cependant, cette valeur peut varier en fonction de nombreux facteurs tels que la distance entre le Soleil et la Terre et l'angle sous lequel le Soleil frappe la surface de la Terre.

3. Pour calculer l'énergie annuelle reçue par la Terre, il faut d'abord convertir la puissance en watts en énergie en joules. Ensuite, il faut multiplier cette valeur par le nombre de secondes dans une année.

1 watt = 1 joule/seconde

Il y a 31 536 000 secondes dans une année (365 jours x 24 heures x 3600 secondes).

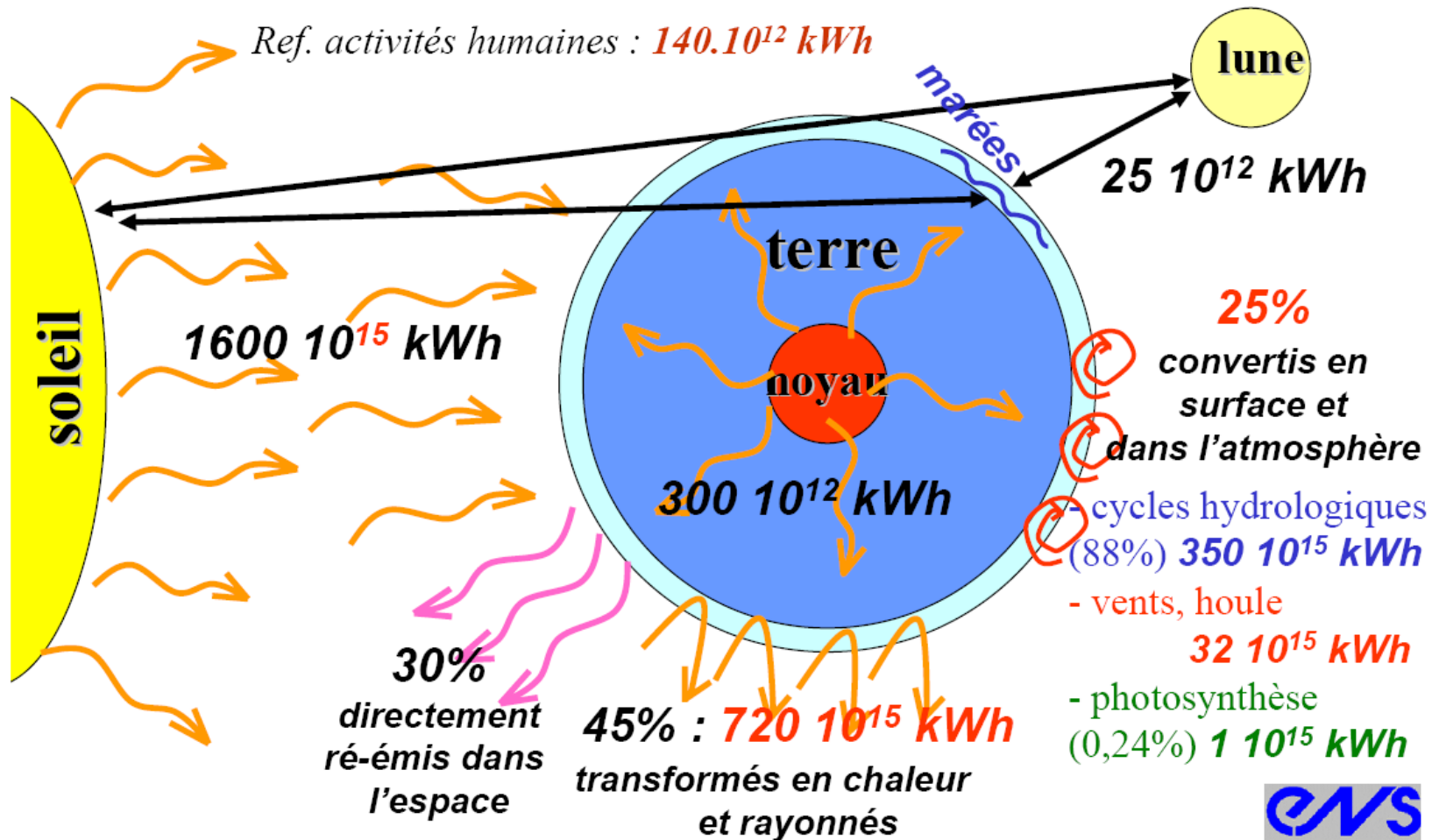
Donc, l'énergie annuelle reçue par la Terre est d'environ:

174×10^{17} joules/seconde * 31 536 000 secondes/an = **55×10^{23} joules/an**

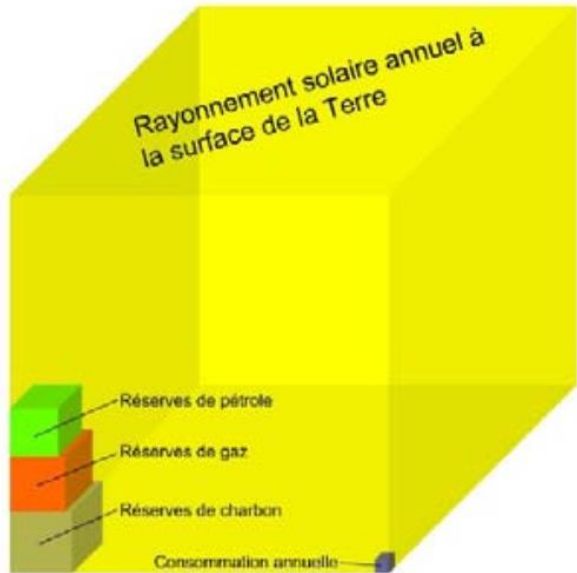
Cette valeur correspond à environ 130 000 fois l'énergie utilisée par l'humanité dans le monde entier en une année.



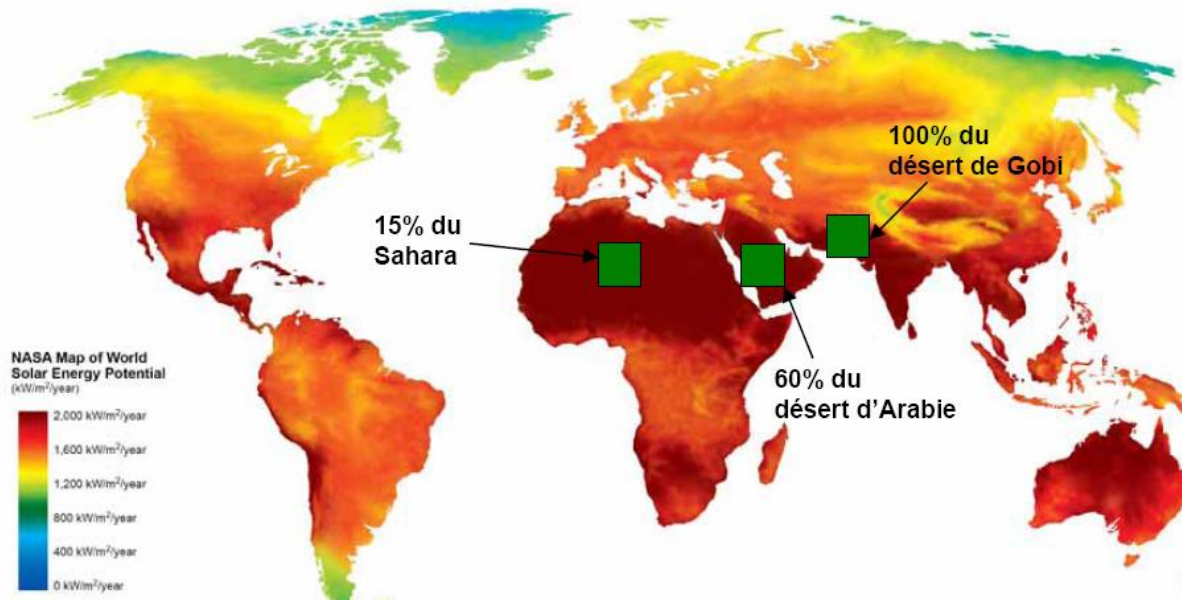
Ressources énergétiques renouvelables de la planète



Rayonnement Solaire : quelques ordres de grandeurs



Avec un rendement global (arbitraire) de 10% de transformation de l'énergie solaire en carburant, électricité..., une fraction de la superficie d'un des grand déserts permettrait de satisfaire les besoins énergétiques futurs de toute l'humanité (10 milliards d'habitants avec la consommation moyenne d'un citoyen français)

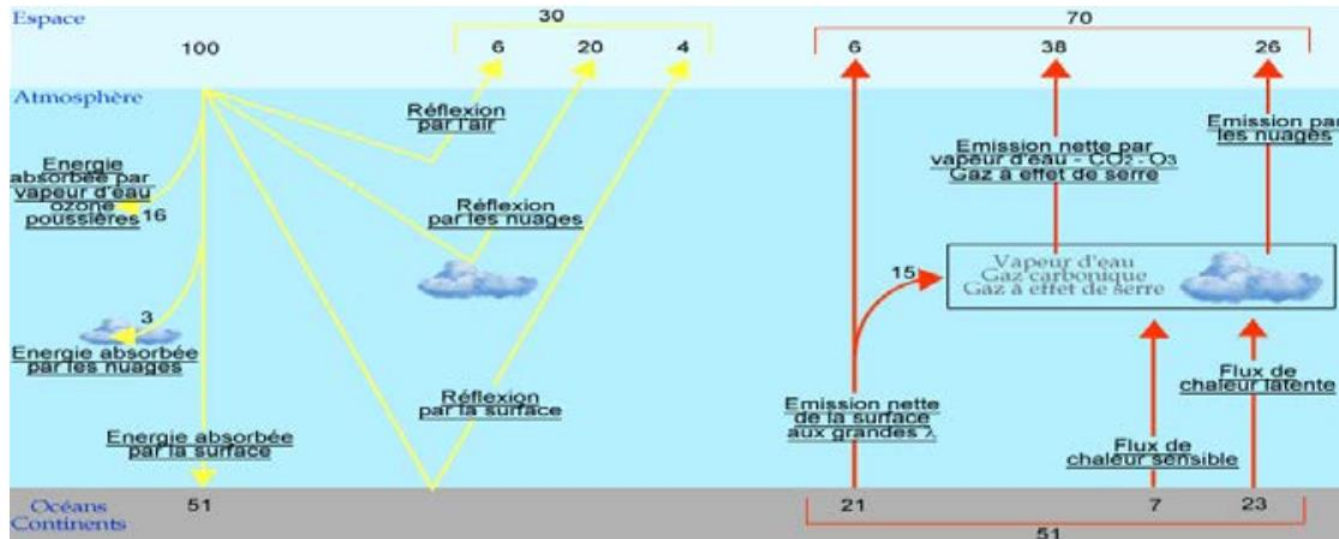
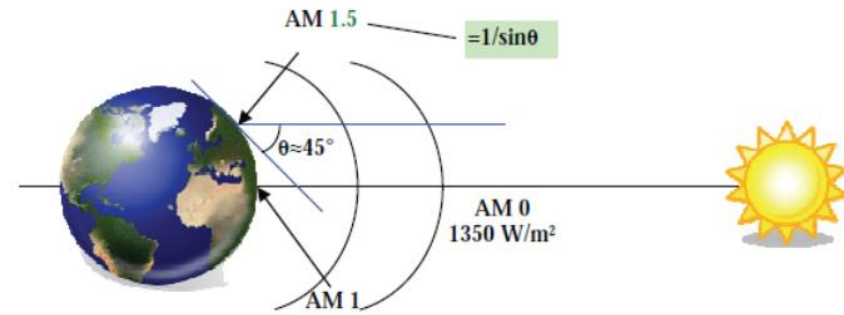


$$2200 \text{ kW/m}^2 \times 10\% = 220 \text{ kWh/m}^2$$

300 000 TWh/an
 (>2 fois plus qu'aujourd'hui)
1,4 millions km²
 (1200 km x 1200 km)

Atmosphère estivale, sans nuage, et un **angle zénithal de 0° (convention AM Air-Mass)**:

- **1367 W.m⁻²** atteignent l'atmosphère extérieure
- **1050 W.m⁻²** rayonnement du faisceau direct
- **1120 W.m⁻²** rayonnement global sur une surface horizontale au niveau du sol.



Transformations de l'énergie solaire incidente

Centrale solaire thermodynamique à concentration



<https://www.youtube.com/watch?v=fY6MRUsEtjY>



https://www.youtube.com/watch?v=L_q6LRgKpTw&t=3s

QUEST **Puissance crête** : puissance maximale délivrée par un module PV dans les conditions standard

Energie élec produite : elle correspond au produit

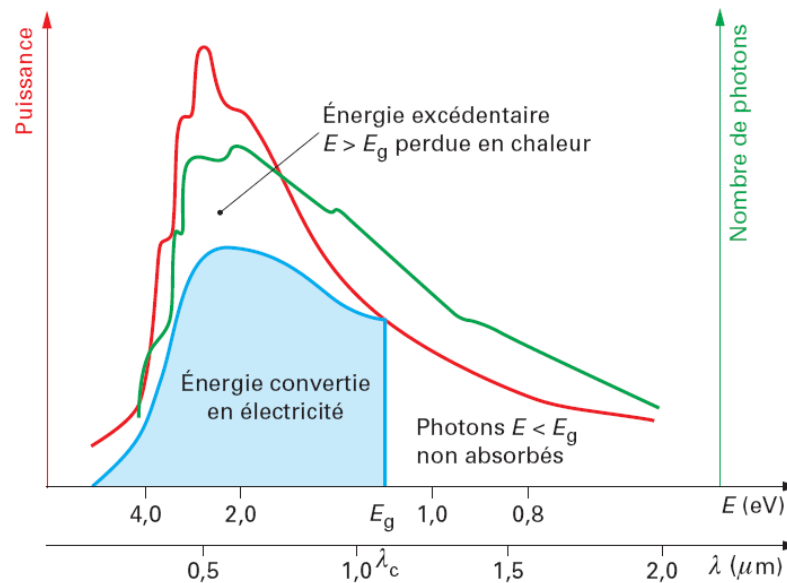
- de la puissance instantanée de référence de 1000 W.m^{-2}
- par le **nombre d'heures équivalentes**

Rayonnement quotidien moyen sur une surface horizontale pour différents lieux en $\text{kWh/m}^2/\text{jour}$ (= nombre d'heure équivalent à 1 kW.m^{-2})

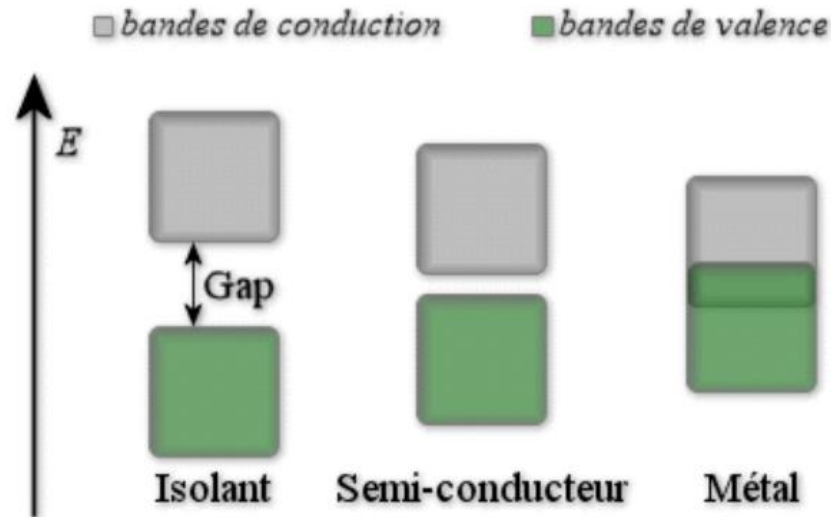
Site / Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
Paris	1.04	1,73	2,78	3,95	5.05	5.39	5.36	4.79	3.39	2.04	1.20	0.83
Berlin	0,61	1,14	2,44	3,49	4,77	5,44	5,26	4,58	3,05	1,59	0,76	0,46
Perpignan	1.52	2.36	3.56	4.35	5.31	5.88	6.16	5.48	4.24	2.6	1.63	1.29

QUEST

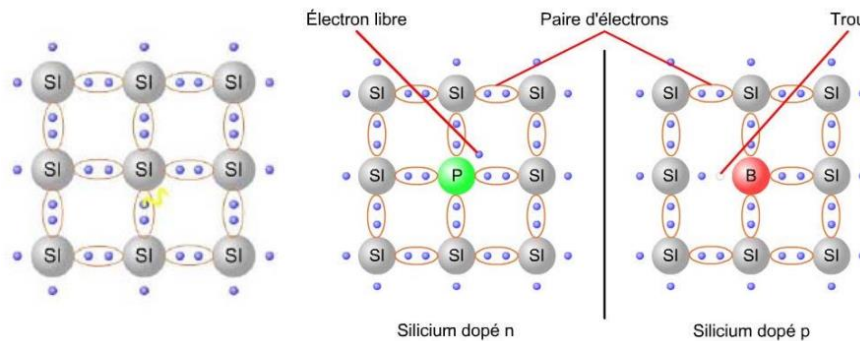
- **Un photon qui frappe un matériau peut :**
 - Traverser le matériau (généralement pour les photons à faible énergie : photons IR (18%))
 - Se réfléchir sur la surface (30% pour le silicium, 3 à 4% avec anti-reflet)
 - Être absorbé par le matériau. Si l'énergie du photon est supérieure à la bande interdite du matériau. Ceci génère une paire électron-trou.



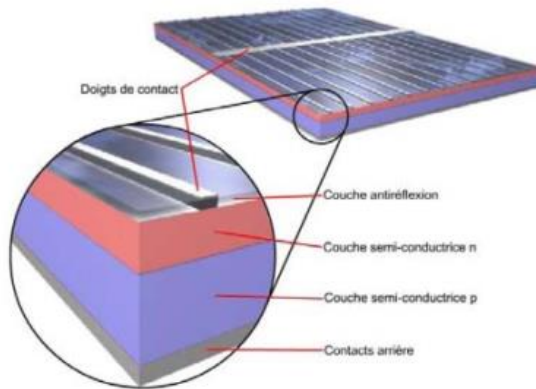
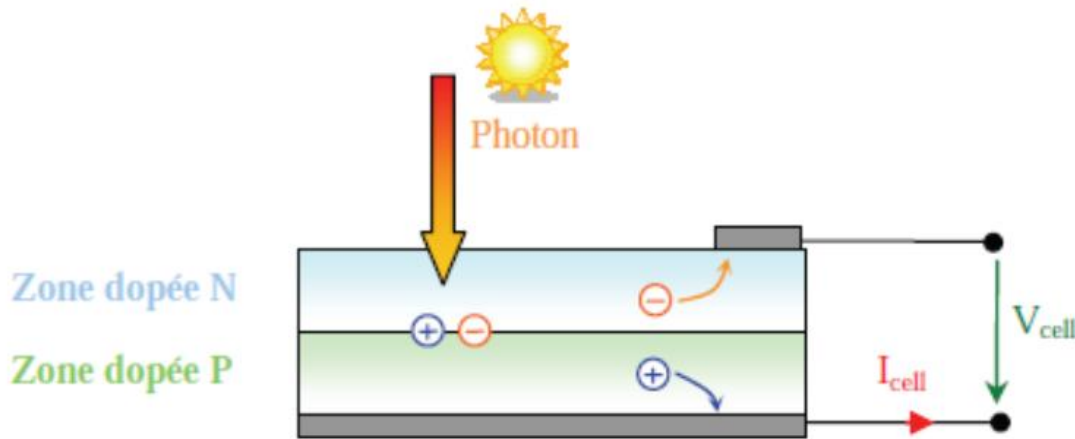
Organisation des bandes de conduction et de valence dans les matériaux



Semi-conducteurs dopés n et p



Constitution d'une cellule

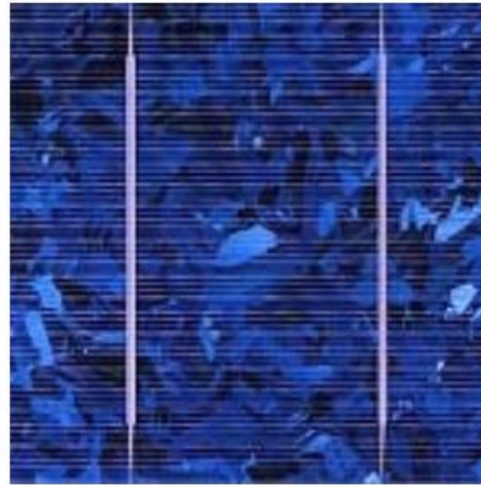


Couche SC de type p : excédent positif de porteurs de charge (trous d'électrons).

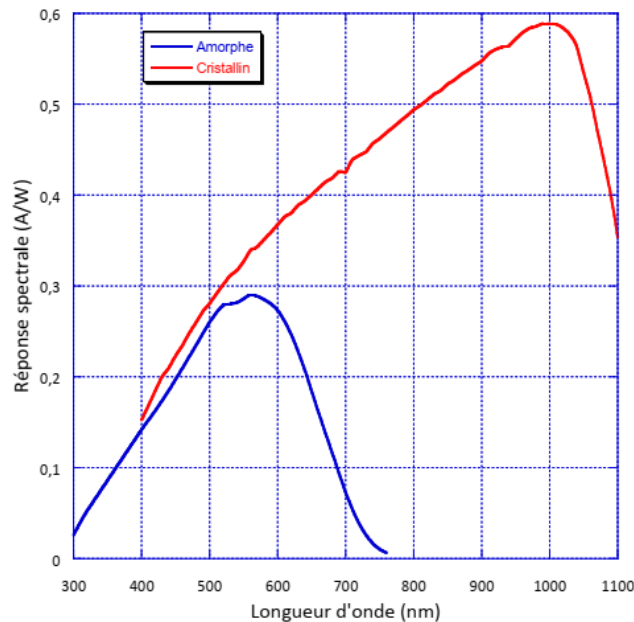
Couche SC de type n : excédent négatif de porteurs de charge (électrons)

Doigts de contact et contact métallique de la face arrière: branchement externe.

Couche antiréflexion



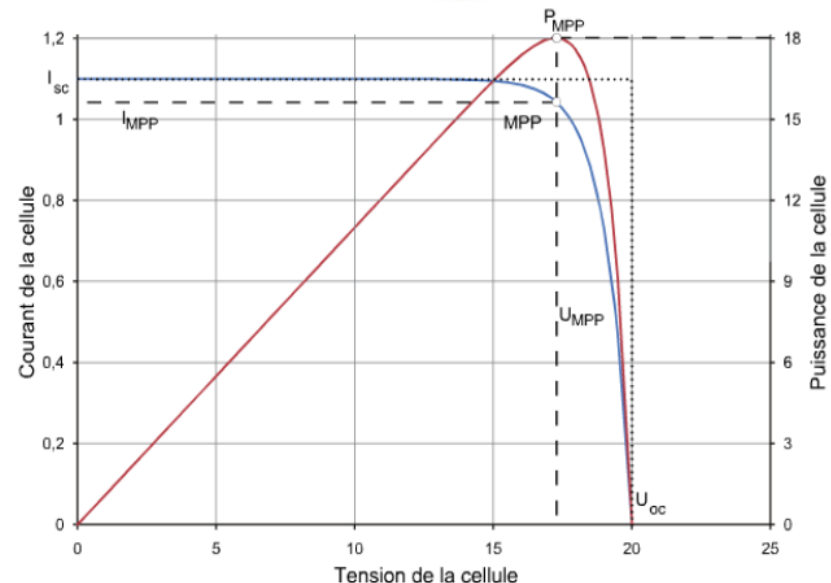
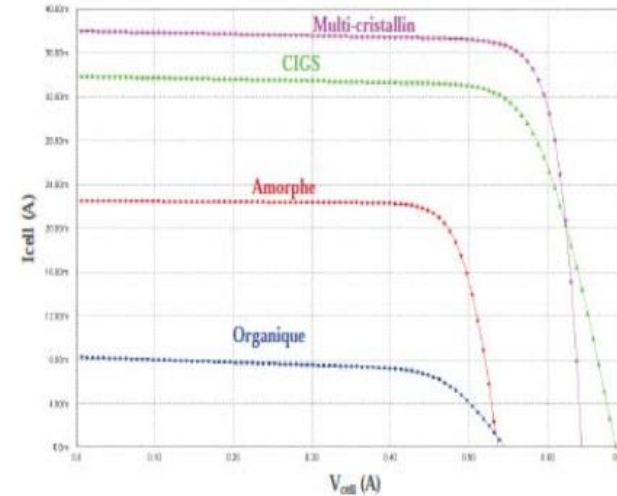
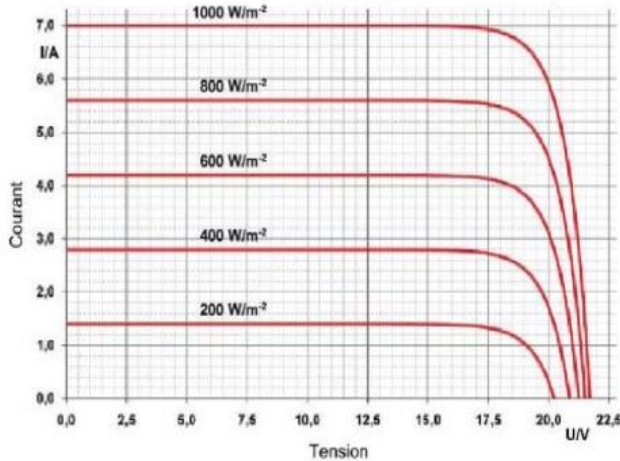
Cellules solaires monocristallines, poly cristallines, amorphes



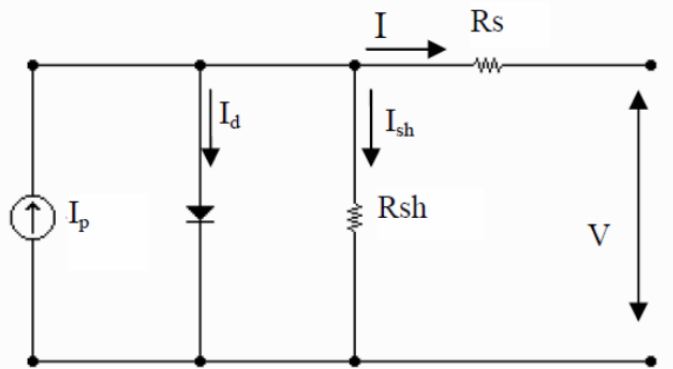
Matériau de base	Rendement en %	Surface en m2
Cellule monocristalline	15-18	7-9
Cellule poly-cristalline	13-16	8-9
Cellule amorphe	6-8	13-20

OUEST

Courbes U/I typique d'une cellule PV pour différentes intensités de rayonnement ainsi que pour différents types de matériaux.



Photovoltaïque : Modèle électrique



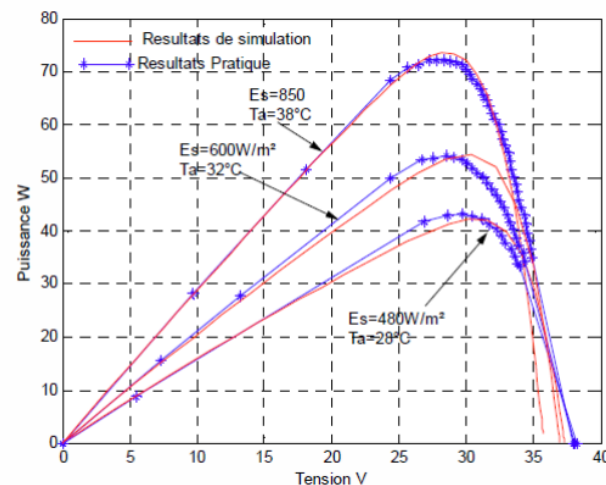
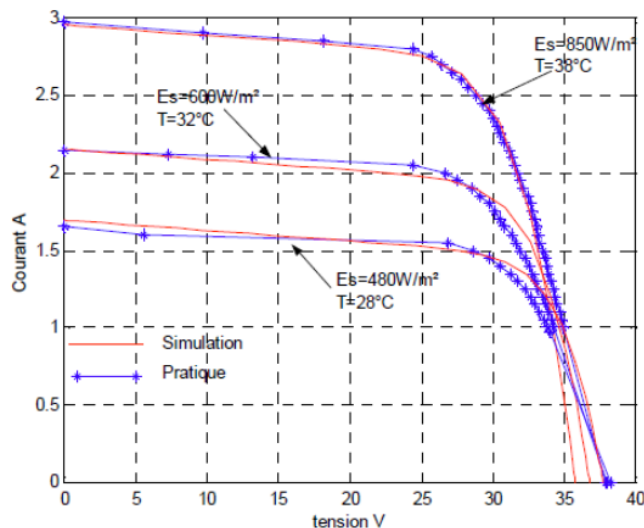
Source de courant : modélise la conversion du flux lumineux en énergie électrique,

Résistance shunt (court circuit) R_{sh} : conséquence de l'état le long de la périphérie de la surface de la cellule,

Résistance série R_s : diverses résistances de contact et de connexion

Diode en parallèle : modélise jonction PN.

E_{ref}	Irradiation de référence	1000 W/m ²
T_{ref}	Température de référence	25°C
n_s	nombre de cellule en série dans un module	72
e_0	La charge d'électron	1,6.10-19C
K	Constant de Boltzmann	1,38.10-23 J/K
E_g	Energie de gap pour le silicium cristalline	1.12 ev
T_a	Température ambiante	
T_{UC}	Condition de température nominale de fonctionnement de la cellule qui est donnée par le constructeur	45°C



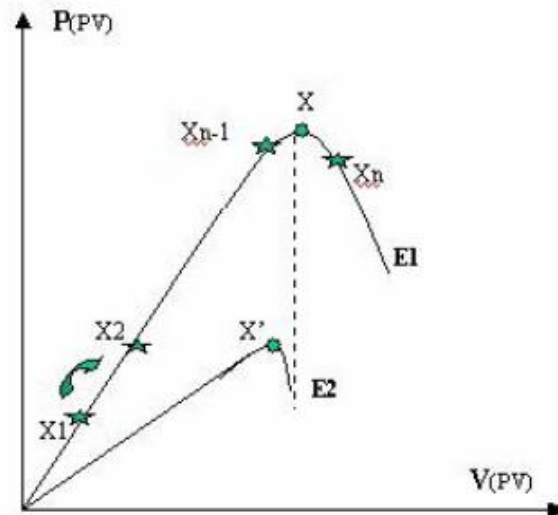
➡ Variation importante de la puissance électrique en fonction des conditions météorologiques et de la charge.
 P_{elec} rarement à la puissance maximale délivrée par le générateur PV.

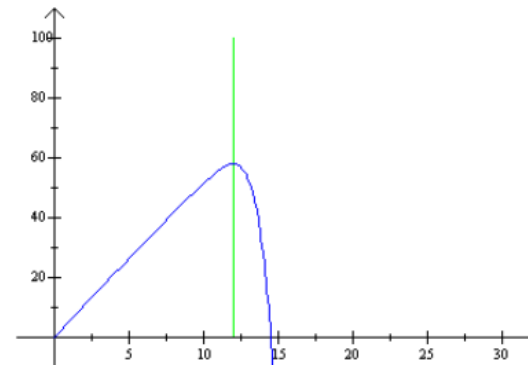
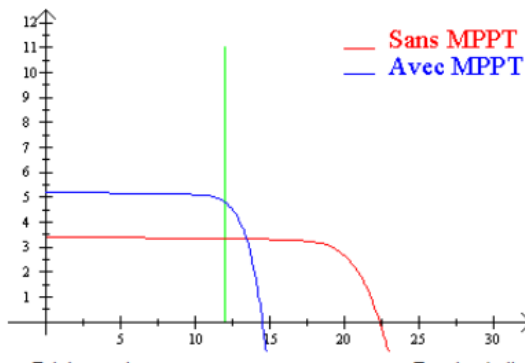
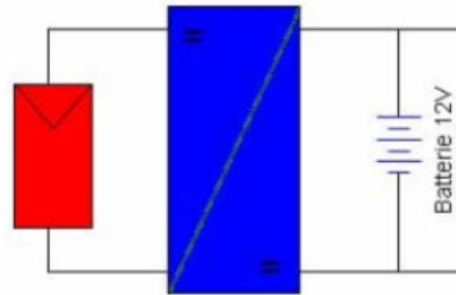
Point de fonctionnement : intersection de la caractéristique électrique I-V avec celle de la charge. Ce point de fonctionnement varie du fait que la source d'énergie où la charge varie à tout moment.

➡ Meilleure connexion entre une source non linéaire et une charge arbitraire (produire la meilleure puissance)

Adaptation à la puissance maximale (**Maximum Power Point Tracking MPPT**). Ce contrôleur, particulièrement adapté pour piloter une source non linéaire, force le générateur à travailler à sa puissance maximale, induisant une amélioration globale du rendement du système de conversion électrique.

Principe :





- a) Montage en connexion avec MPPT. Données: tension batterie 12V, $TPV=75^{\circ}C$, $E_s=1000W/m^2$ $f=variable$.
- b) Relevé des caractéristiques $I=f(U)$ et $P=f(U)$ avec MPPT

Photovoltaïque : Modèles série - parallèle

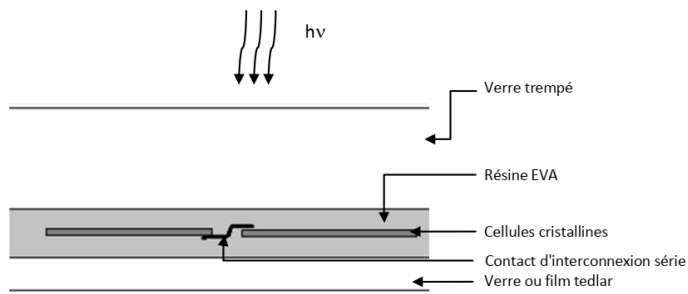


(a)

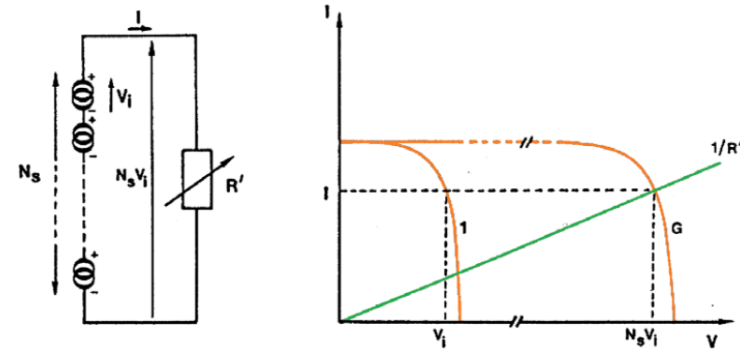


(b)

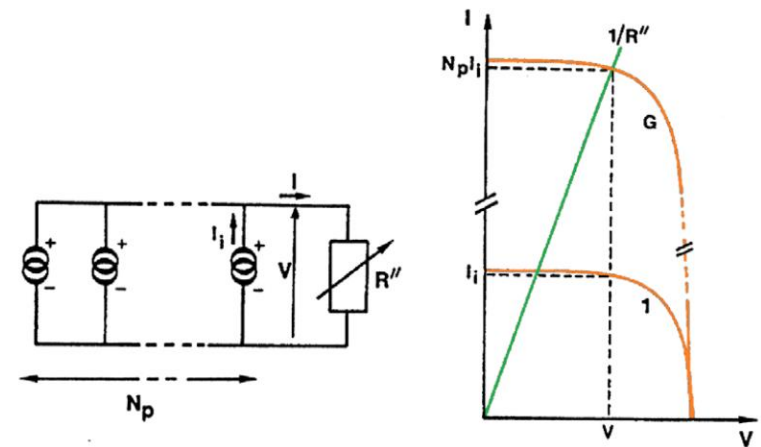
Photographies de modules au silicium cristallin (a) et en couche mince de silicium amorphe (b)



Représentation schématique d'une vue en coupe d'un module au silicium cristallin

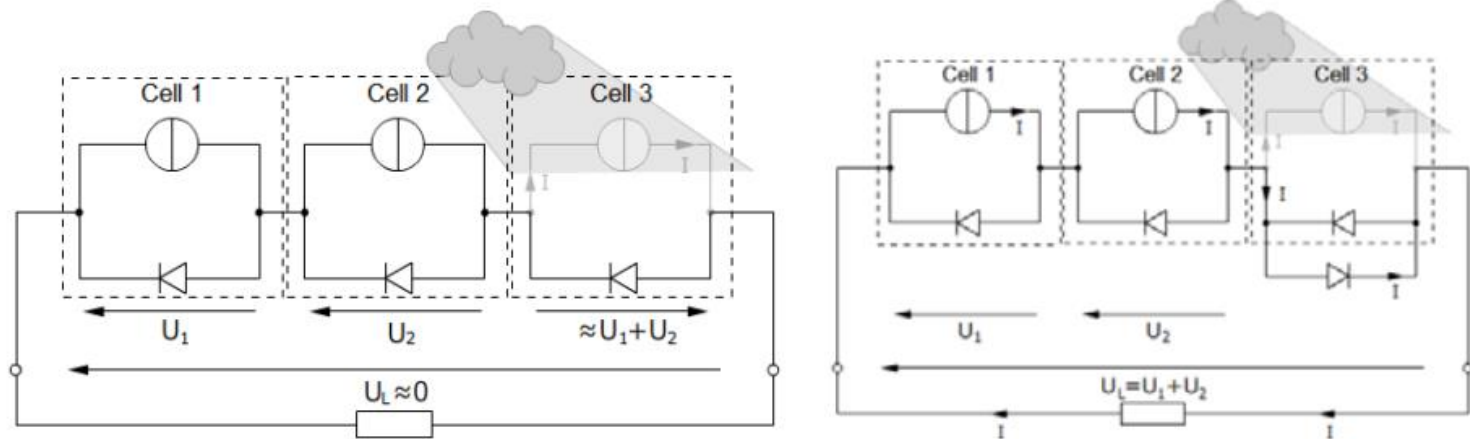


Association de N_s cellules en série



Association de N_s cellules en parallèle

Photovoltaïque : Ombrage. Points Chauds



Ombrage et effet de hot spot. Diode by-pass

Ombrage uniforme de toute la surface = réduit uniquement la puissance du module, mais ne lui nuit pas.

Ombrage partiel = risque de dégradation : par exemple lorsqu'une seule cellule PV du module est ombragée.

Si le courant débité est supérieur au courant produit par la cellule faiblement éclairée, la tension de celle-ci devient négative et **devient un élément récepteur**.

Si plusieurs cellules PV sont montées en série, la diode de la cellule PV ombragée se trouve dans **le sens de blocage**. Par conséquent, toute la tension du module peut chuter via la diode. Si cette tension dépassait la tension de blocage de la diode elle détruirait cette dernière. Si la tension est inférieure à la tension de blocage, la diode forme une puissance dissipée qui a pour conséquence de réchauffer la cellule, risquant ainsi d'endommager le module (= **hot spot** ou « point chaud »).

Solution : diodes by-pass antiparallèlement à la cellule PV, le flux électrique est conservé grâce à la diode by-pass.

En pratique, une diode by-pass est montée en parallèle dans plusieurs cellules PV à la fois, voire dans des strings complets.

Inconvénient : en cas de désactivation d'une cellule, plusieurs cellules PV ou même tout un string ne fonctionnent plus.

Photovoltaïque : Rendement d'une installation

Le rendement global de la chaîne de conversion photovoltaïque peut donc être défini comme le produit des trois rendements précédemment définis sur le même intervalle de temps.

$$\eta_{TOTAL} = \frac{P_{MAX} [W]}{G [W / m^2] . A [m^2]} \cdot \frac{P_{PV} [W]}{P_{MAX} [W]} \cdot \frac{P_{OUT} [W]}{P_{PV} [W]}$$

$$\eta_{pv} = \frac{P_{MAX}}{G . A_{eff}}$$

G : irradiance G (W/m^2) = quantité d'énergie électromagnétique solaire incidente sur une surface par unité de temps et de surface.

Surface A_{eff} = surface du panneau correspondant à la partie active et susceptible de pouvoir effectuer la conversion photovoltaïque \neq surface totale occupée par le panneau solaire

P_{MAX} = maximum de puissance potentiellement disponible à la sortie du GPV dépendant du matériau photovoltaïque, de l'instant et de l'endroit des mesures, des conditions météorologiques et de la température.

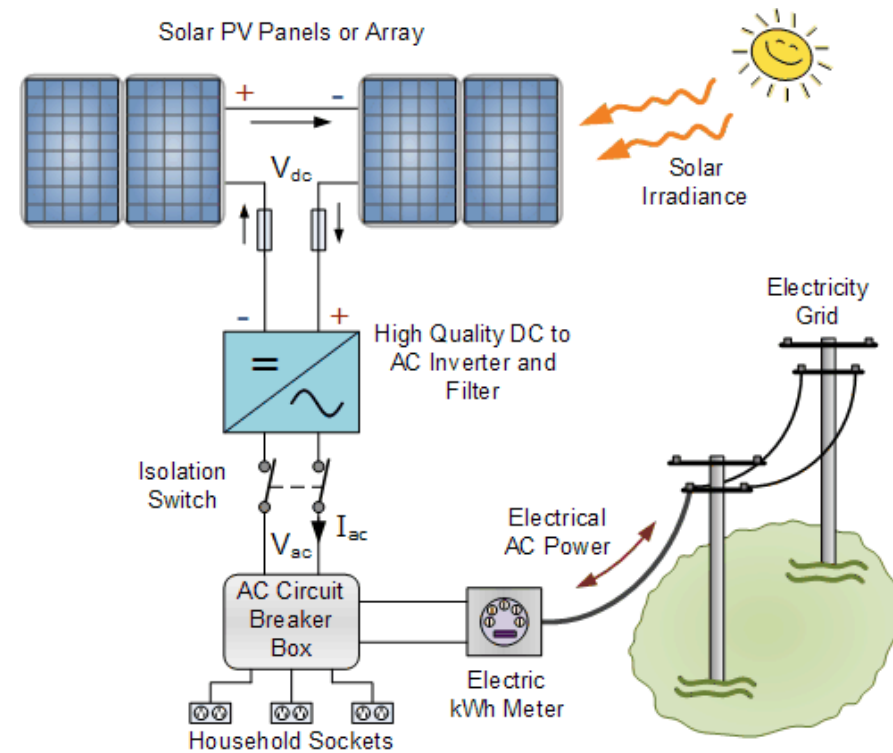
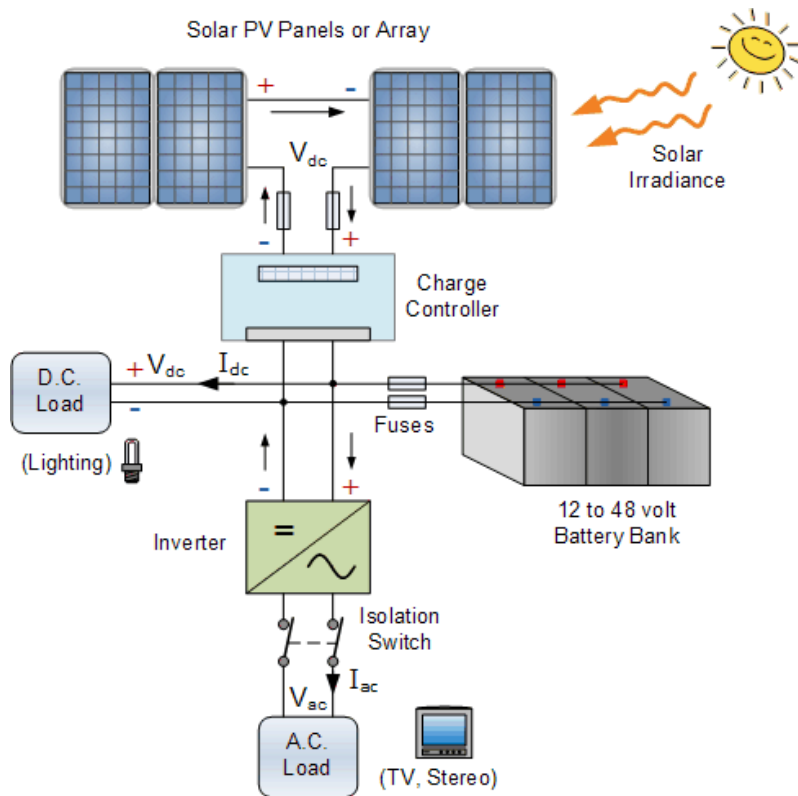
La puissance délivrée par le GPV notée P_{pv} est plus ou moins éloignée du potentiel productible noté P_{MAX} en fonction de l'étage d'adaptation utilisé pour réaliser la conversion et le transfert énergétique (onduleur, convertisseur DC-DC, connexion directe...).

$$\eta_{MPPT} = \frac{P_{PV}}{P_{MAX}}$$

$$\eta_{conv} = \frac{P_{out}}{P_{PV}}$$

Pour transférer la puissance électrique produite, le mode de transfert utilisé peut présenter plus ou moins un taux de pertes lié à sa constitution. Nous définissons pour qualifier ces étages de conversion électrique-électrique et de transfert, le rendement de conversion d'un étage d'adaptation. Là aussi, ce type de rendement dépend du temps et des conditions de fonctionnement.

Photovoltaïque : PV sur Réseau Isolé ou Interconnecté ?



ISEN
ALL IS DIGITAL!


yncréa

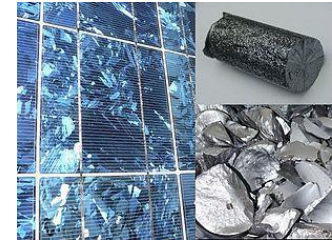
Projet e-MOB

Installation solaire photovoltaïque autonome
Etude technique

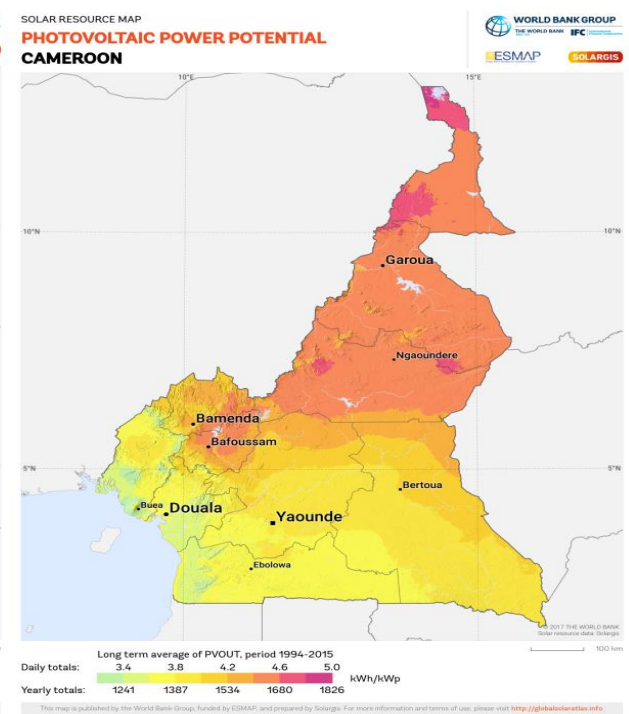
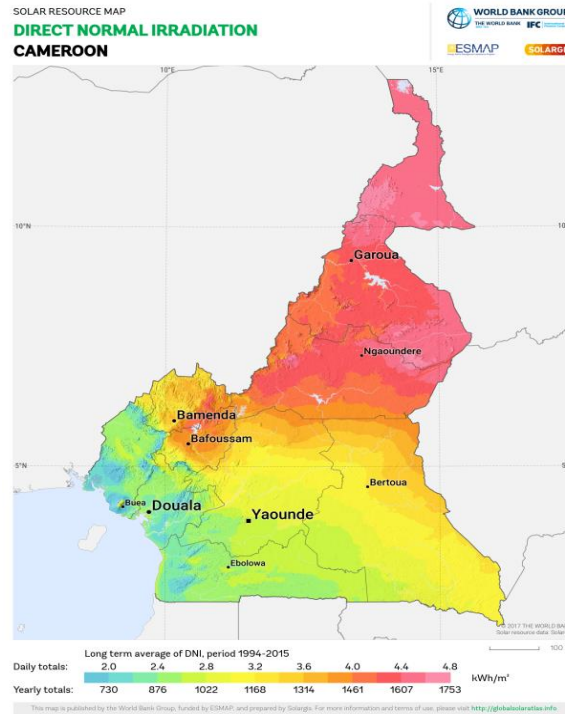
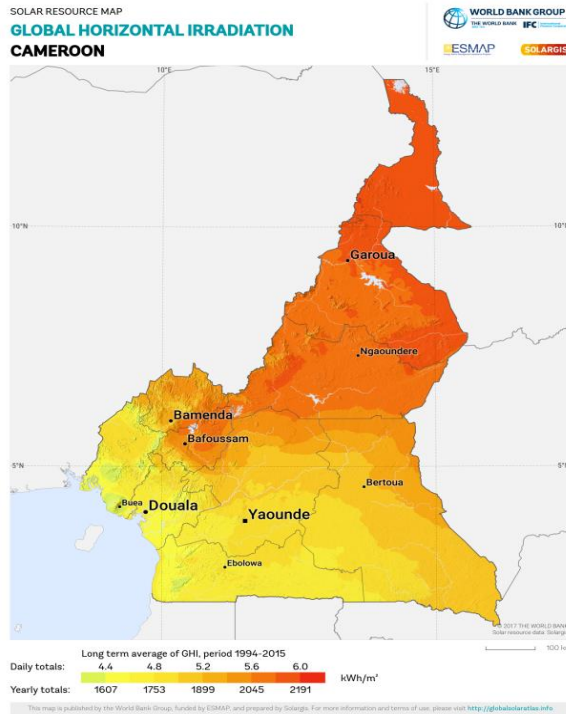
Architectures techniques et fournisseurs



- ☐ **INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE AUTONOME POUR UNE APPLICATION RÉSIDENIELLE (AUTONOMIE 6H ET 12H),**
- ☐ **VILLES CONCERNÉES : YAOUNDÉ, DOUALA, MAROUA, BAFOUSSAM,**
- ☐ **PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES DE TYPE POLYCRISTALLIN (RENDEMENT=15%),**
- ☐ **BATTERIES :** - Batteries de type Plomb gélifié et Lithium Phosphate,
 - Tension : 12V et 12,8V
 - Rendement charge/décharge : 81%,
- ☐ Régulateur MPPT pour l'optimisation de la production photovoltaïque,
- ☐ Onduleur pure sinus pour l'alimentation des appareils domestiques en courant alternatif,
- ☐ Protection de l'installation et des personnes.

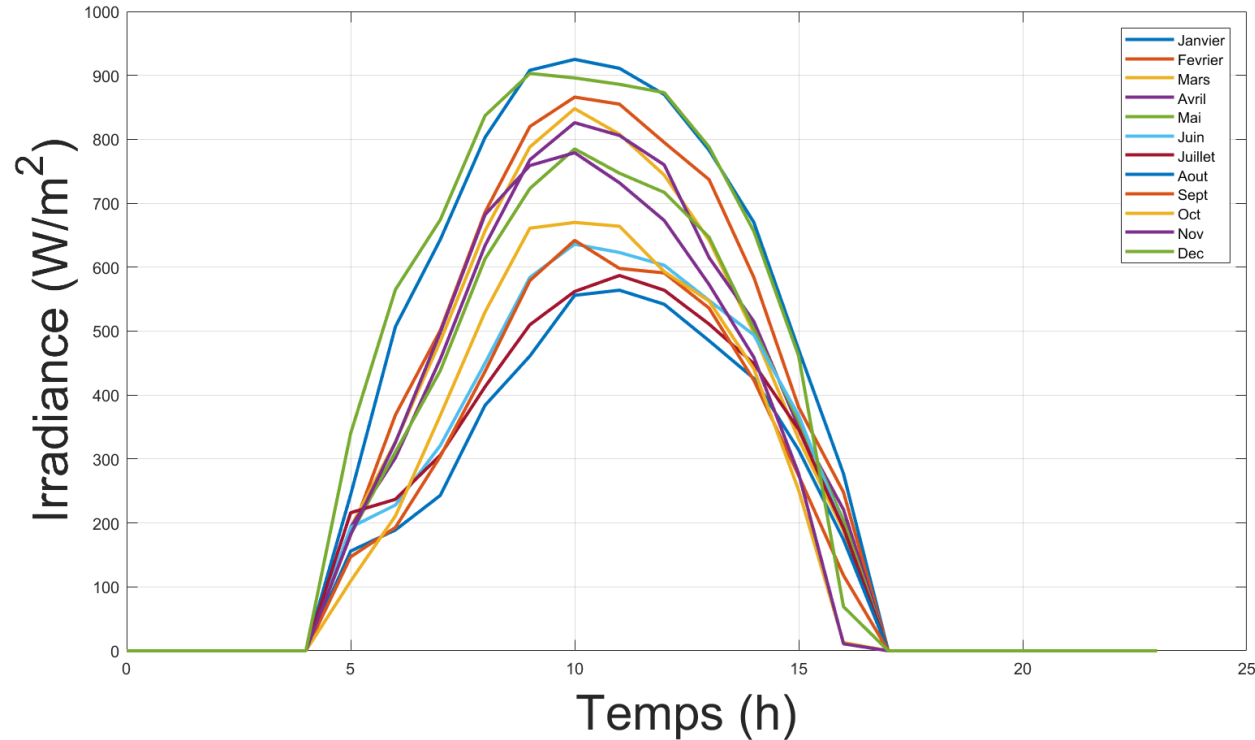


Projet E-MOB : Dimensionnement



Données d'irradiance pour le Cameroun

☐ Données d'irradiance pour la ville de Yaoundé

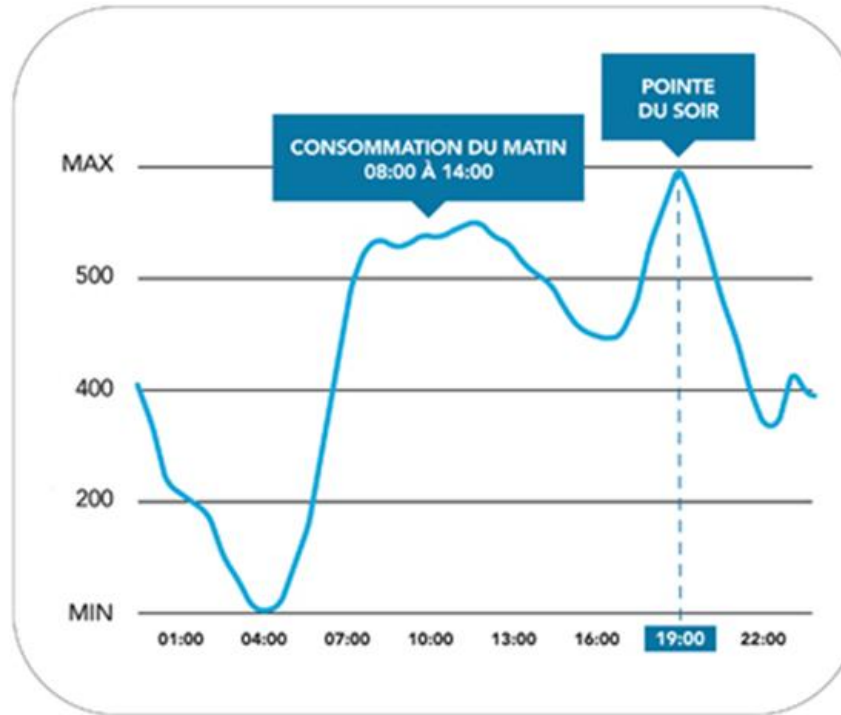


- Le dimensionnement est réalisé pour le mois dont l'ensoleillement est le plus défavorable (Aout).

Sources : http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#PVP

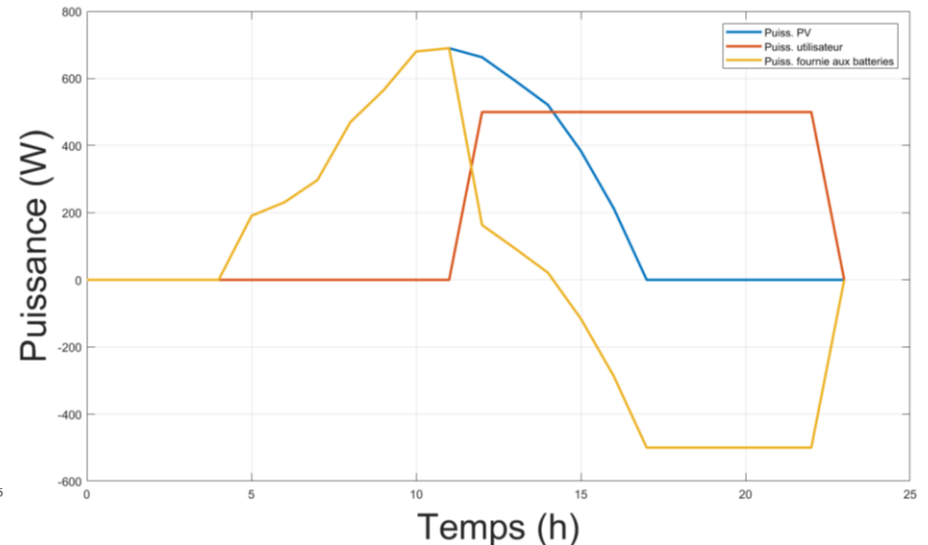
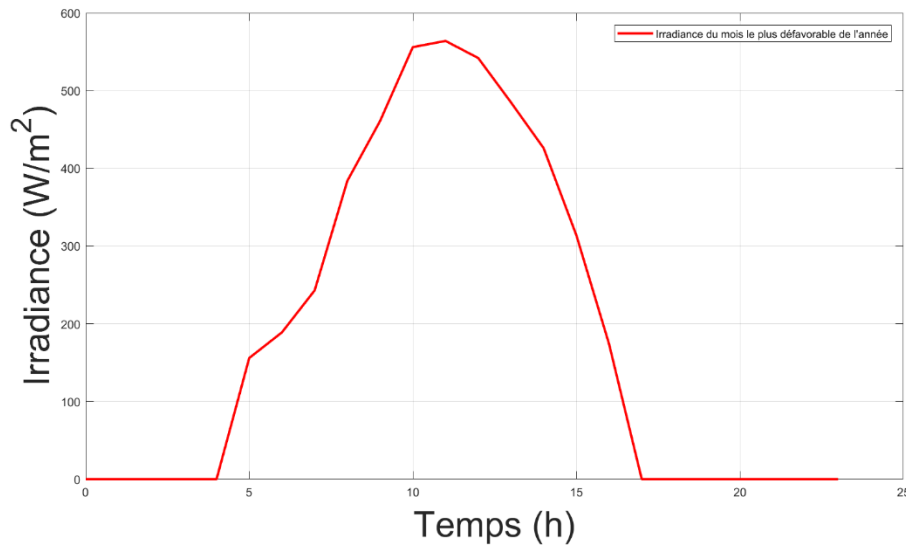
Projet E-MOB : Dimensionnement

□ Profil de charge

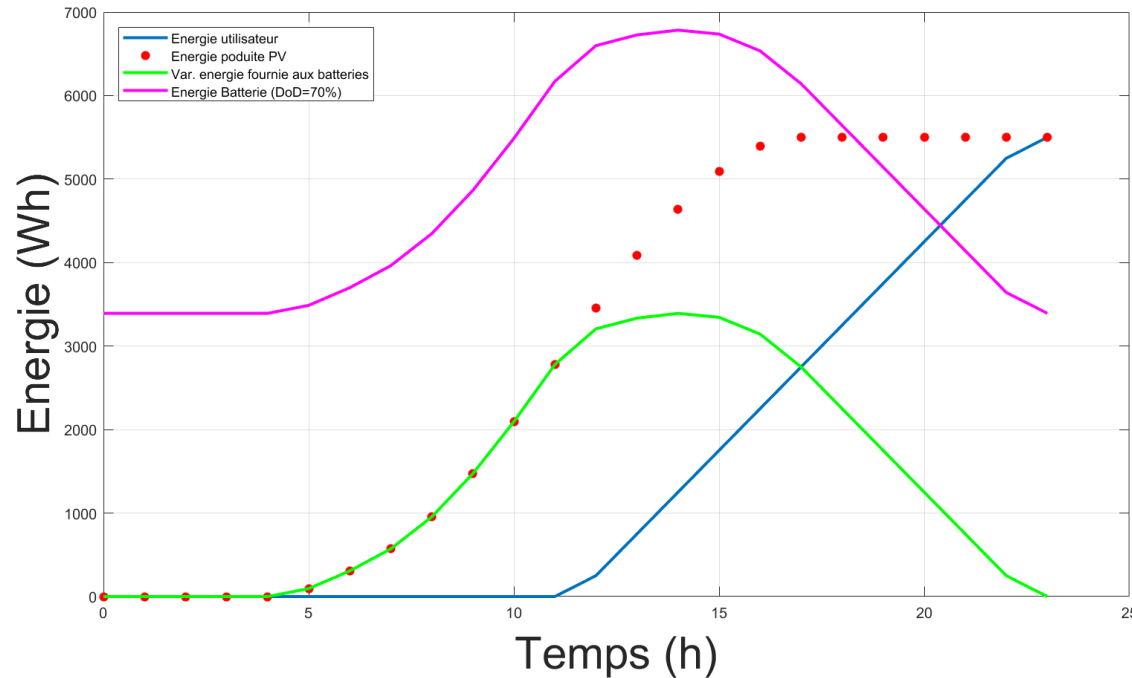


- Puissance maximale de 500W
- Autonomie : 6h et 12h

- ❑ Simulation pour un scénario possible :
- Autonomie de 10h,
- Rendement PV : 15%,
- Batteries Plomb Gélifié, 12V, DoD=50% et rendement de conversion 81%.



Simulation pour un scénario possible



Résultats :

- **Panneaux solaires :**
 - Superficie PV : 11.13 m²
 - Puissance crête installée : 1112.6 Wc
- **Pour une batterie plomb gélifié**
 - Capacité de : 697.96 Ah
 - Puissance de : 690.26 W
 - Masse de : 209.4 Kg
 - Volume de : 0.12 m³

Projet E-MOB : Dimensionnement

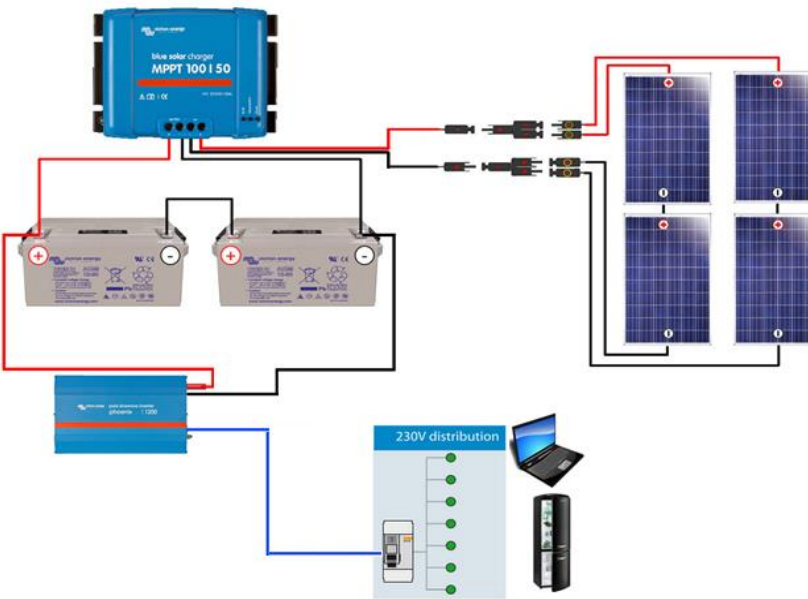
Ville	Panneaux photovoltaïques polycristallin		Plomb gélifié 12 V - DoD=50%		Lithium-phosphate 12,8 V - DoD=80%	
	Superficie (m2)	Puissance crête installée	Capacité (Ah)	Puissance (W)	Capacité (Ah)	Puissance (W)
Yaoundé	4,8	723,2	600	500	351,16	500
Douala	4,95	742,5	614,4	500	360	500
Maroua	3,97	595,78	634	500	371,46	500
Bafoussam	4,34	651	576,8	500	337,9	500

DIMENSIONNEMENT POUR UNE AUTONOMIE DE 6H.

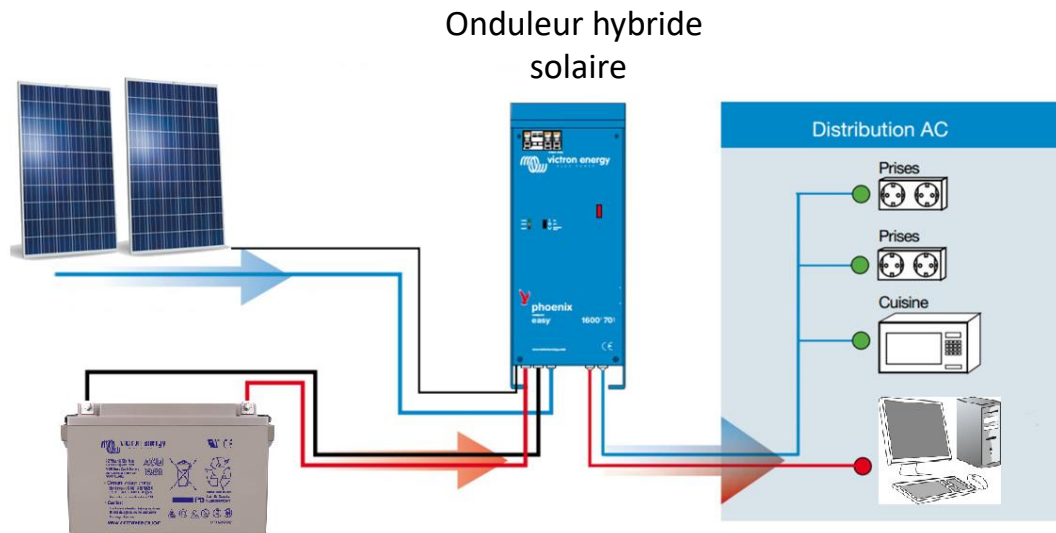
E-MOB V2

Ville	Panneaux photovoltaïques polycristallin		Plomb gélifié 12 V - DoD=50%		Lithium-phosphate 12,8 V - DoD=80%	
	Superficie (m2)	Puissance crête installée (W)	Capacité (Ah)	Puissance (W)	Capacité (Ah)	Puissance (W)
Yaoundé	8,9	1335,2	1114,4	753	652,92	753
Douala	9,14	1371	1134,3	784	664,63	784
Maroua	7,33	1100	1168,5	762,3	684,66	762,3
Bafoussam	8	1202	1108,4	810	649,4	810

DIMENSIONNEMENT POUR UNE AUTONOMIE DE 12H.



Architecture 1

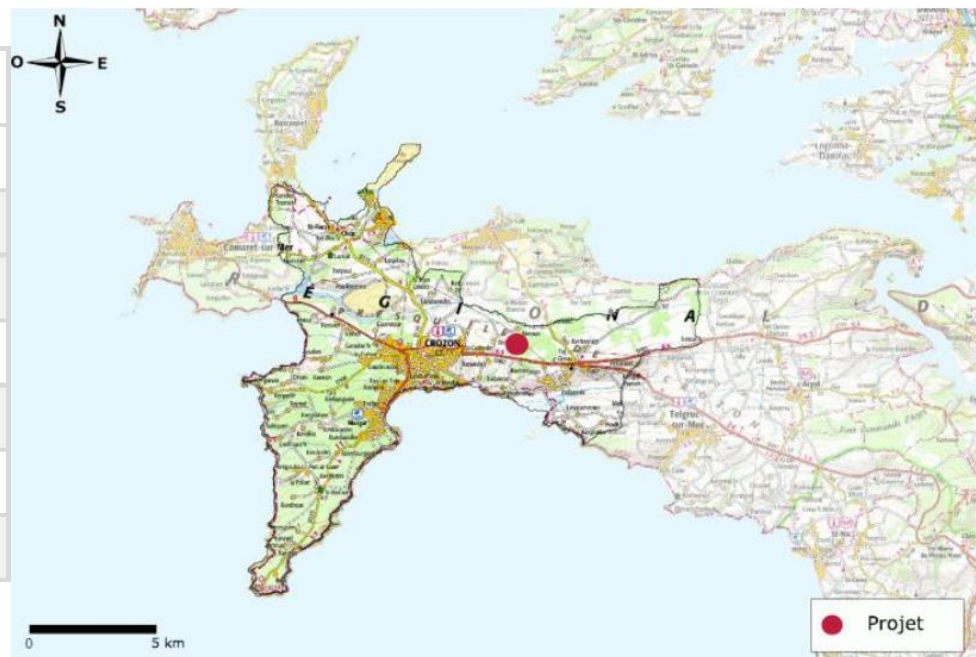


Architecture 2

Projet Crozon

Caractéristiques générales

■ Puissance	1, 84 MWc
■ Surface	6,45 ha
■ Production annuelle	2 296 MWh/an
■ Productible	1 247 kWh/kWc/an
■ Equivalent consommation ménages	920 foyers
■ Investissement prévisionnel	2 646 160 € HT
■ Distance de raccordement	190 m



Appel à projet

Dépôt de PC

Enquête
publiqueObtention du
PCAO : Dépôt
de
candidatureAO :
RésultatsConstruction
estiméeMise en
service

Juillet 2010

Mai 2012

Du 06/05 au
08/06/2013

Août 2013

Juin 2015

Décembre
20154ème
trimestre 20161er trimestre
2017

QUEST



- **Master Energétique et Environnement UPMC : Philippe Guibert**
- **Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies, Thomas Mambrini**
- **Projet e-MOB, ISEN Yncréa Ouest, Elhoussin ELBOUCHIKHI**
- **Projet PV Communauté de communes de Crozon**