UNIVERSITE PAUL SABATIER TOULOUSE III

Solaire photovoltaïque

Objectifs : Apporter les connaissances de base sur l'énergie solaire et sur l'énergie photovoltaïque en particulier.

PLAN :

1/ Rappel sur les unités.
2/ Place du photovoltaïque (PV) parmi les énergies.
3/ Applications du photovoltaïque.
4/ Solaire thermique
5/ La ressource solaire.
6/ Effet photovoltaïque
7/ Caractéristiques électriques
8/ Systèmes photovoltaïques

L'énergie électrique sert
à alimenter des appareils, aussi ...
avant de récupérer de l'énergie
provenant du soleil
(photovoltaïque ou autre),
regardons notre consommation
...
et les unités associées

1/ Energie-Puissance

À savoir :

P (W) = E(J) / D (s)

P : puissance
E : énergie
D : durée

Puissance = Energie / Durée

Puissance : unité le watt W

1 Watt = 1J / 1S

Energie :

1 **joule** = 1V × 1A × 1s

1 **cal** = 4.18 J ⇒ c'est la quantité d'énergie nécessaire pour faire passer 1g d'eau de 24 à 25°C

1 Wh = une puissance de 1 W pendant 1h = **3600 J**

1 kWh = une puissance de 1000 W pendant 1h = **3.6 MJ**

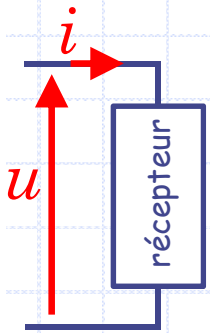
ou une puissance de 100 W pendant 10h

par convention **1Tep = 11700 kWh**

Relation utile pour un appareil électrique (convention **récepteur**) :

$$p\ (W) = u(V) \cdot i\ (A)$$

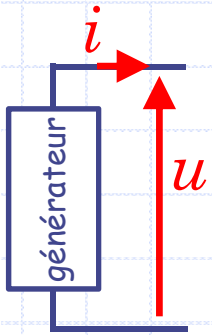
p : puissance **reçue**
u : tension
i : courant



Relation utile pour un appareil électrique (convention **générateur**) :

$$p\ (W) = u(V) \cdot i\ (A)$$

p : puissance **fournie**
u : tension
i : courant



$P(W) = F(N).V(ms^{-1})$ $P(W) = C(Nm)\Omega(rds^{-1})$ $P(W) = U(V).I(A)$ $E = \int_0^t P(t)dt$

1/ Consommation : deux applications

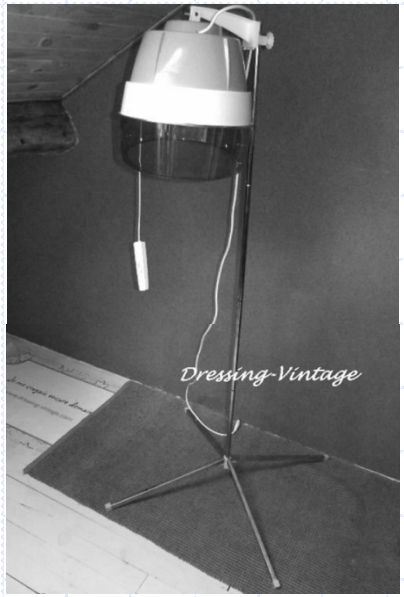
Combien d'énergie pour se sécher les cheveux?

Relation utile :

$$E\,(J) = P(W).\,D(s)$$

$$E\,(Wh) = E(J)\,/\,3600$$

E : énergie utilisée
P : puissance du sèche-cheveux (typiquement 1kW)
D : durée d'utilisation (s)



www.dressing-vintage.com

Combien d'énergie pour faire chauffer 10l d'eau de 14 à 100°C

Relation utile :

$$\Delta U\,(J) = m(g).\rho(g/l).Cm(J/g/°C).\Delta\,\theta(°C)$$

ΔU : variation d'énergie interne de la masse d'eau.
ρ : masse volumique de l'eau
Cm : capacité calorifique massique de l'eau
(4,18 J/g/°C
$\Delta\theta$: variation de température

http://www.matton.fr

1/ Consommation : un téléphone portable

Dans un iphone 4, on trouve une batterie Li-ion polymère.
Caractéristiques :

V = 3,7V

E = 5,25 W.hr

Capacité de cette batterie? (mAh)

Sur le site d'Apple :
Temps de conversation :

jusqu'à 8 heures en 3G

Navigation sur Internet :

jusqu'à 6 heures en 3G

Consommation instantanée (puissance)?
Courant qui sort de la batterie?

Relation utile :
Pour un accumulateur (batterie rechargeable)

E (Wh) = C(Ah). V(V)

E : énergie nominale stockée
C : capacité (attention rien à voir avec la capacité d'un condensateur!)
V : tension

http://www.cnetfrance.fr/
http://www.france-digital-phone.com/
http://www.apple.com/fr/iphone/specs.html

1/ Consommation : un ordinateur portable

Dans un ordinateur portable (de 2007), on trouve aussi une batterie Li-ion :

Caractéristiques 11,1V 5400mAh 440g

Énergie de la batterie (Wh)?

Des mesures réalisées avec un wattmètre (cf photo) placé avant le chargeur donnent (avec la batterie déjà chargée):

Consommation : 30W (avant le chargeur)

Le rendement du chargeur est de 80%

Quel est la consommation du portable (W)?

Quel est son autonomie (h)?

Relation utile :

Pour un acumulateur (batterie rechargeable)

E (Wh) = C(Ah). V(V)

E : énergie nominale stockée

C : capacité (attention rien à voir avec la capacité d'un condensateur!)

V : tension

A la fin de ce cours, vous devrez être capable de choisir correctement le panneau solaire qui permettra de recharger ces deux produits (iphone et ordinateur) en énergie.

...

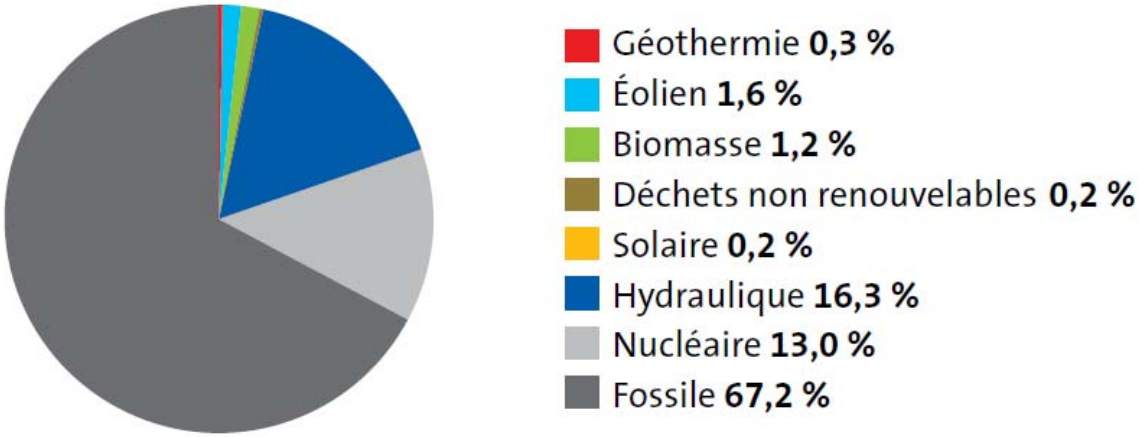
Le photovoltaïque ... abordons le sujet!

...

C'est une énergie renouvelable mais est-ce la principale?

2/ Place du photovoltaïque (PV) parmi les énergies.

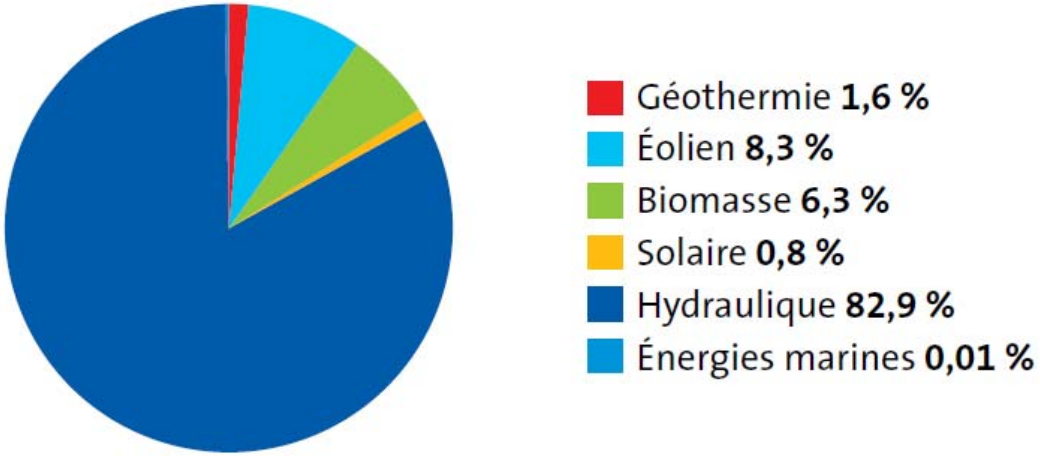
Structure de la production d'électricité – 2010



Total production électrique mondiale en 2010 **d'origine renouvelable**: **4 159** TWh soit **20 %** de la production totale d'électricité (**21 198** TWh).

MONDE

Structure de la production électrique d'origine renouvelable – 2010



Total production électrique **photovoltaïque** mondiale en 2010 : **33,2** TWh soit **0,8**% de la production électrique mondiale d'origine Renouvelable (**7,9** en 2007 ,**2,7** en 2004)

Source (2011):

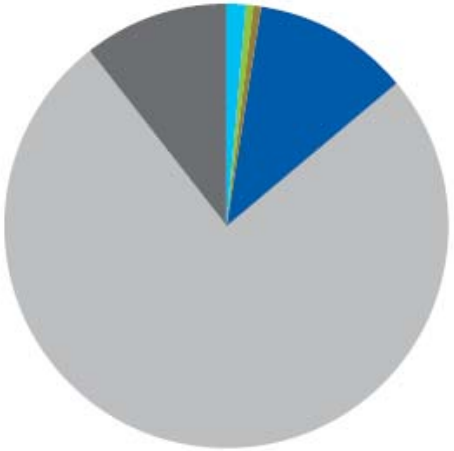
Observ'ER Observatoire des énergies renouvelables

EDF

www.energies-renouvelables.org/electricite_renouvelable.asp

2/ Place du photovoltaïque (PV) parmi les énergies.

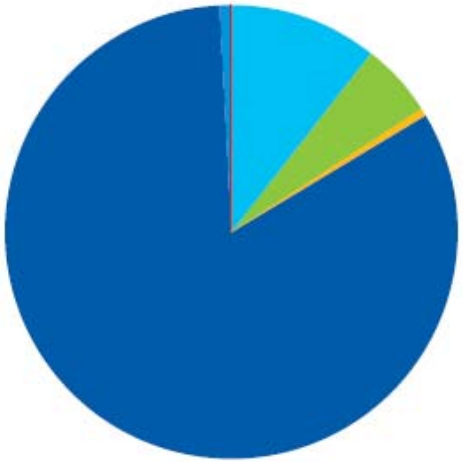
Structure de la production d'électricité – 2010 / *Structure of electricity production – 2010*



- Éolien/*Wind* **1,7 %**
- Biomasse/*Biomass* **0,8 %**
- Déchets non renouvelables /*Non-renewable waste* **0,4 %**
- Solaire/*Solar* **0,1 %**
- Hydraulique/*Hydraulic* **11,9 %**
- Énergies marines/*Marine energies* **0,1 %**
- Nucléaire/*Nuclear* **74,8 %**
- Fossile/*Fossil* **10,3 %**

Structure de la production électrique d'origine renouvelable – 2010
Structure of electricity production from renewable energy sources – 2010

FRANCE



- Éolien/*Wind* **11,6 %**
- Biomasse/*Biomass* **5,2 %**
- Solaire/*Solar* **0,8 %**
- Hydraulique/*Hydraulic* **81,8 %**
- Énergies marines/*Marine energies* **0,6 %**

Source (2011):

www.energies-renouvelables.org/electricite_renouvelable.asp

Ce n’est donc pas la principale énergie renouvelable certes mais ...

...

Dans quel cas utilise-t-on du solaire photovoltaïque?

3/ Photovoltaïque : des applications décentralisées

Satellites

Electrification des sites isolés, notamment :

pompage d 'eau

balises…

pays en développement

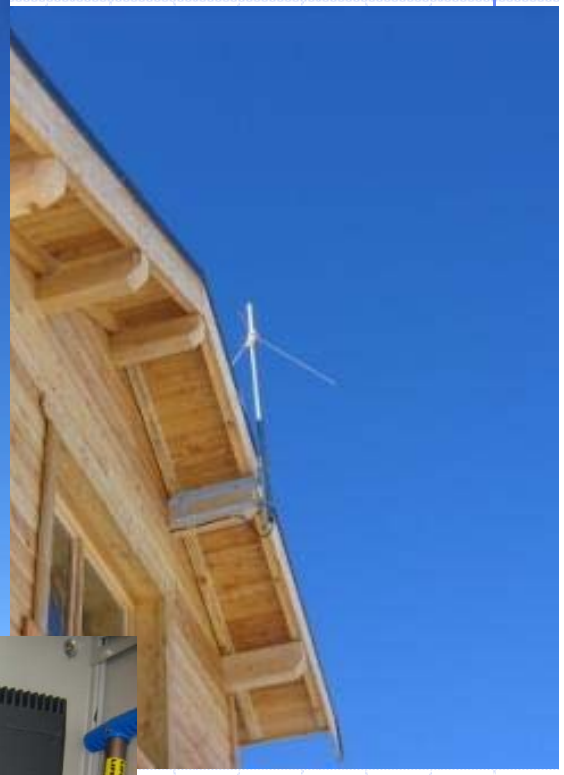
loisirs

De façon marginale : véhicules (courses sunracers),

avions (solar impulse) bateaux..

Sources :
Bernard Multon,
Stephan Astier

3/ Photovoltaïque : des applications décentralisées



Communication radio
pisteurs station
Saint Léger les mélèzes

3/ Photovoltaïque: plus de puissance ... et le réseau

Toit solaire

utilisation
« individuelle »

raccordés au
réseau électrique

Centrale de grande puissance

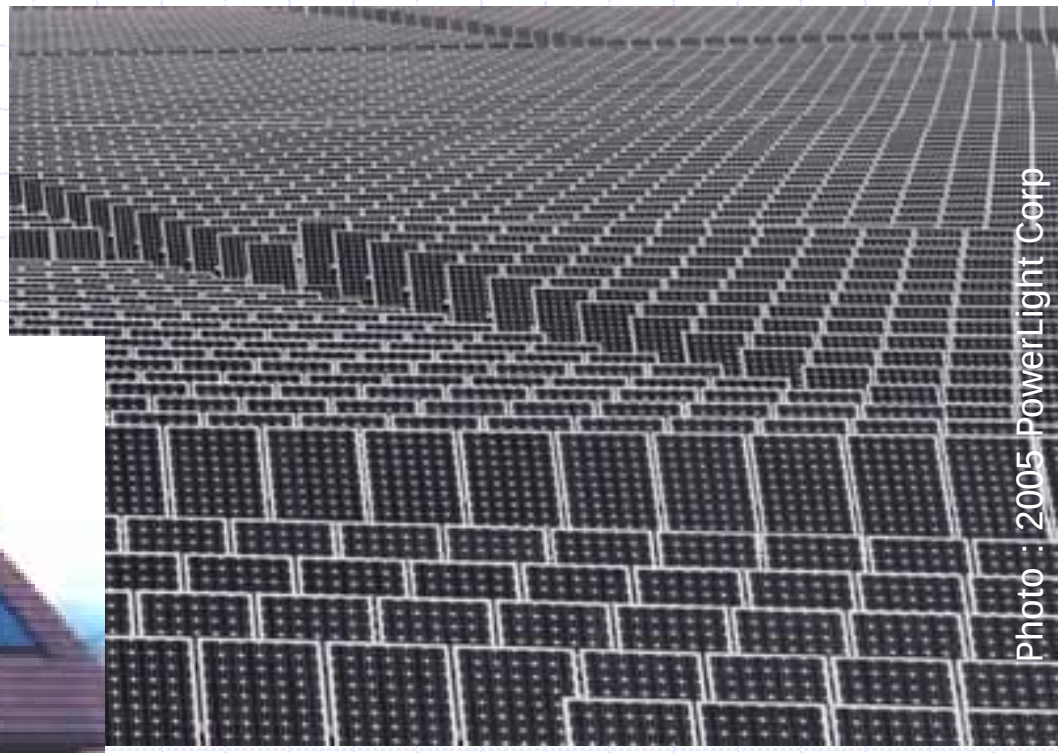


Photo : 2005 PowerLight Corp

Bavaria solarpark (Allemagne)
62 000m² de panneaux
pour 10 MW

3/ Photovoltaïque: plus de puissance ... et le réseau

Toit solaire utilisation « individuelle »

Université Paul Sabatier

2,3 kWc Si amorphe

cellules_souples_
Technologie amorphe
En rouleau

3/ Photovoltaïque: plus de puissance ... et le réseau

Ancien silo de missiles (plateau d'Albion)
Ferme photovoltaïque au sol de Ferrassières (Drome) 14 500 modules / 1.726 Mwc / 8.6 ha

Nous venons de voir les deux types d'utilisation du PV :

- Sites isolés (non connecté au réseau)
  (avec ou sans stockage de l'énergie)
- Installations de production connectées au réseau.

Avant d'aller plus sur la partie technique du photovoltaïque...

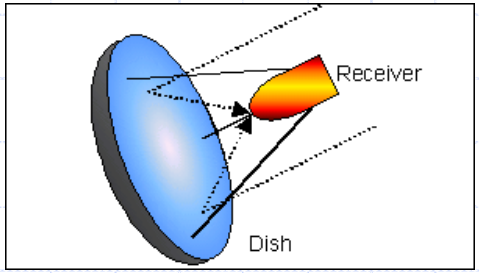
Avec le soleil, on peut aussi récupérer de la **chaleur** et la **convertir ensuite en électricité** ...

4/ Solaire thermique pour la production d'électricité

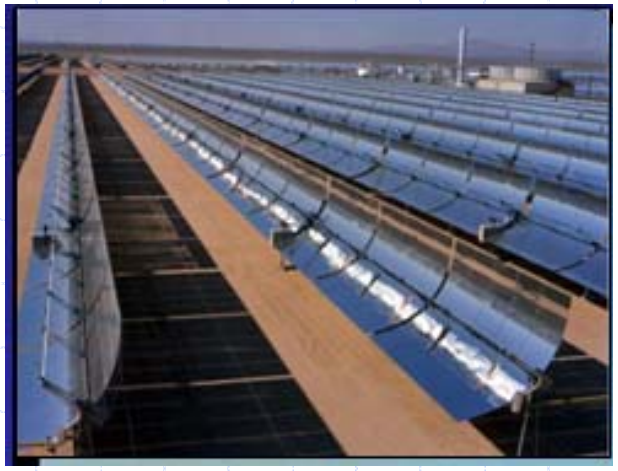
Principe : système concentrateur de chaleur

puis ...échangeur et turbine ou générateur (moteur Stirling)

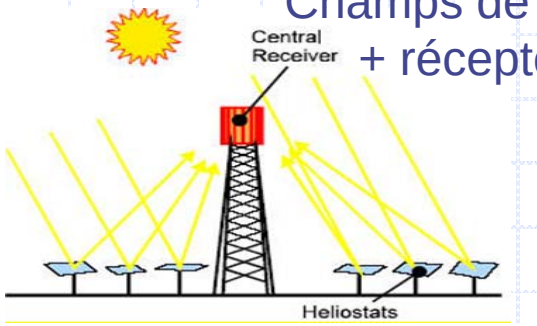
Docs : A. Ferriere PROMES



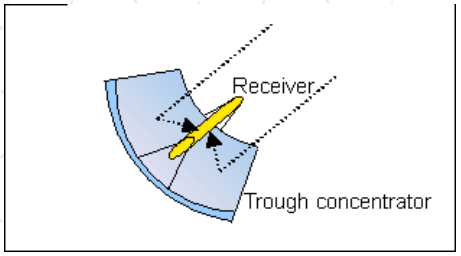
Paraboles
Diam : 8m Pe=10kW



Champs de miroir
+ récepteur



Miroir à auges



4/ Solaire thermique : Exemples

Solar Two
Barstow
Californie 97-2000
85000 m²
12,4 MWe

Désert Mojave
Californie
2000000 m²
cylindro-paraboliques
354 MWe

Tour solaire Manzanares (Espagne)
194 m de haut
6000m2 de miroir

Ancienne installation
Themis en France
(83-86) 10740 m² miroir
2,5 MWe

4/ Solaire thermique pour la production d'électricité

354 Mwe exploité depuis 1985 en californie
(hybride : 80%solaire , 20% gaz) 11 Mwe en Espagne
Miroir cylindro parabolique, soleil génère soit directement de la vapeur soit chauffage d'un sel ou huile, puis échangeur de chaleur
=> vapeur
=> entraîne turbine
=> prod. Électricité

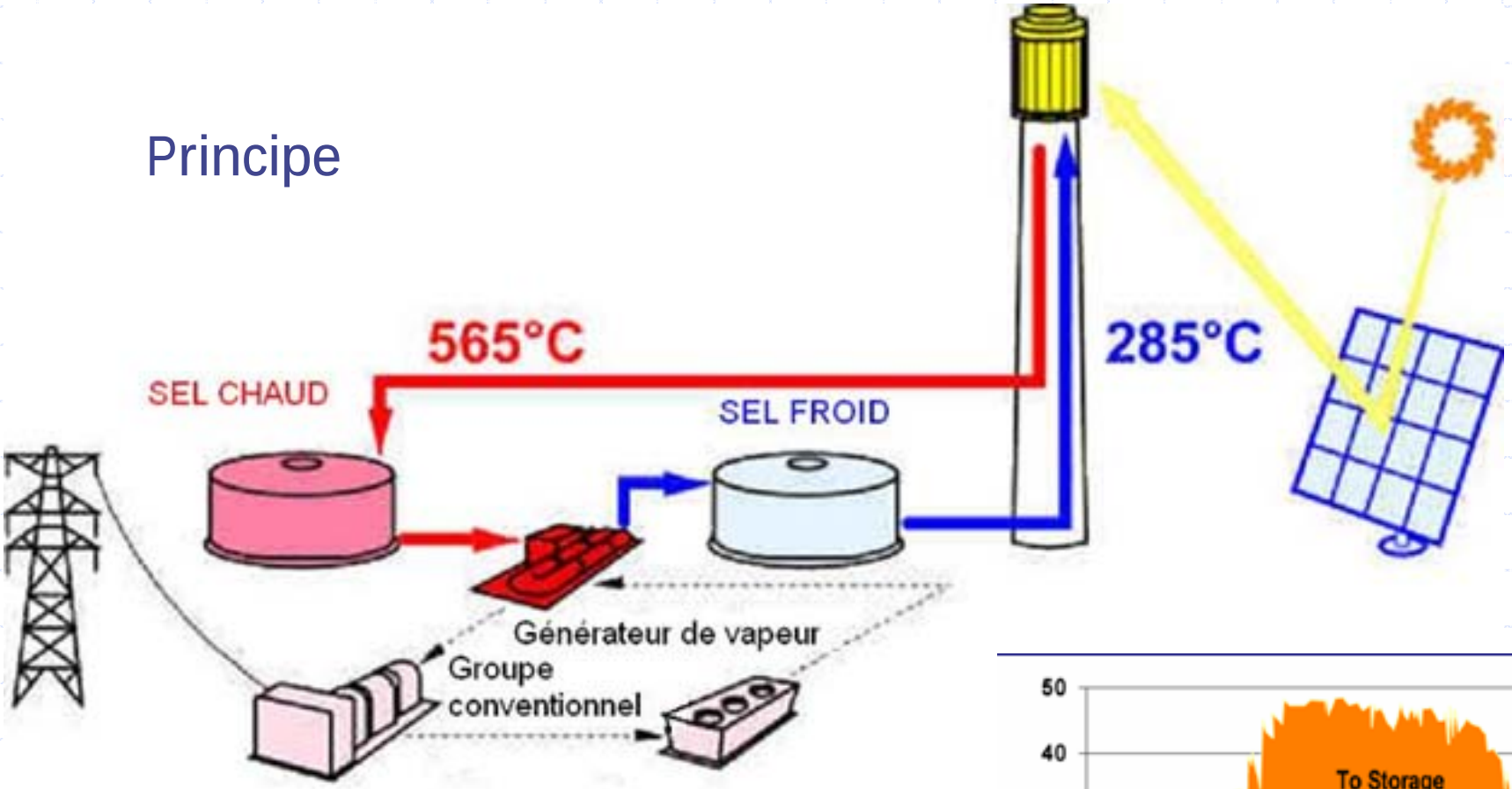
rend 16%

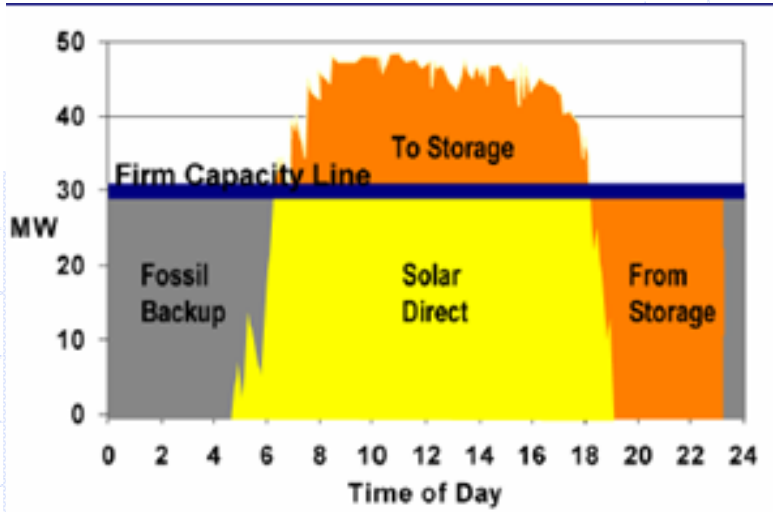
Dans une centrale solaire thermique (ici, en Andalousie), des rangées de miroirs "cylindro-paraboliques" chauffent un fluide.

Science et Vie
Mai 2009

4/ Solaire thermique pour la production d'électricité

Principe





Docs : A. Ferriere - PROMES

- avec le soleil, on peut donc faire de l'électricité directement: solaire photovoltaïque ou indirectement : récupérer de la chaleur et la convertir ensuite en électricité via une turbine.

Avec le soleil, on peut aussi utiliser directement la chaleur produite ...

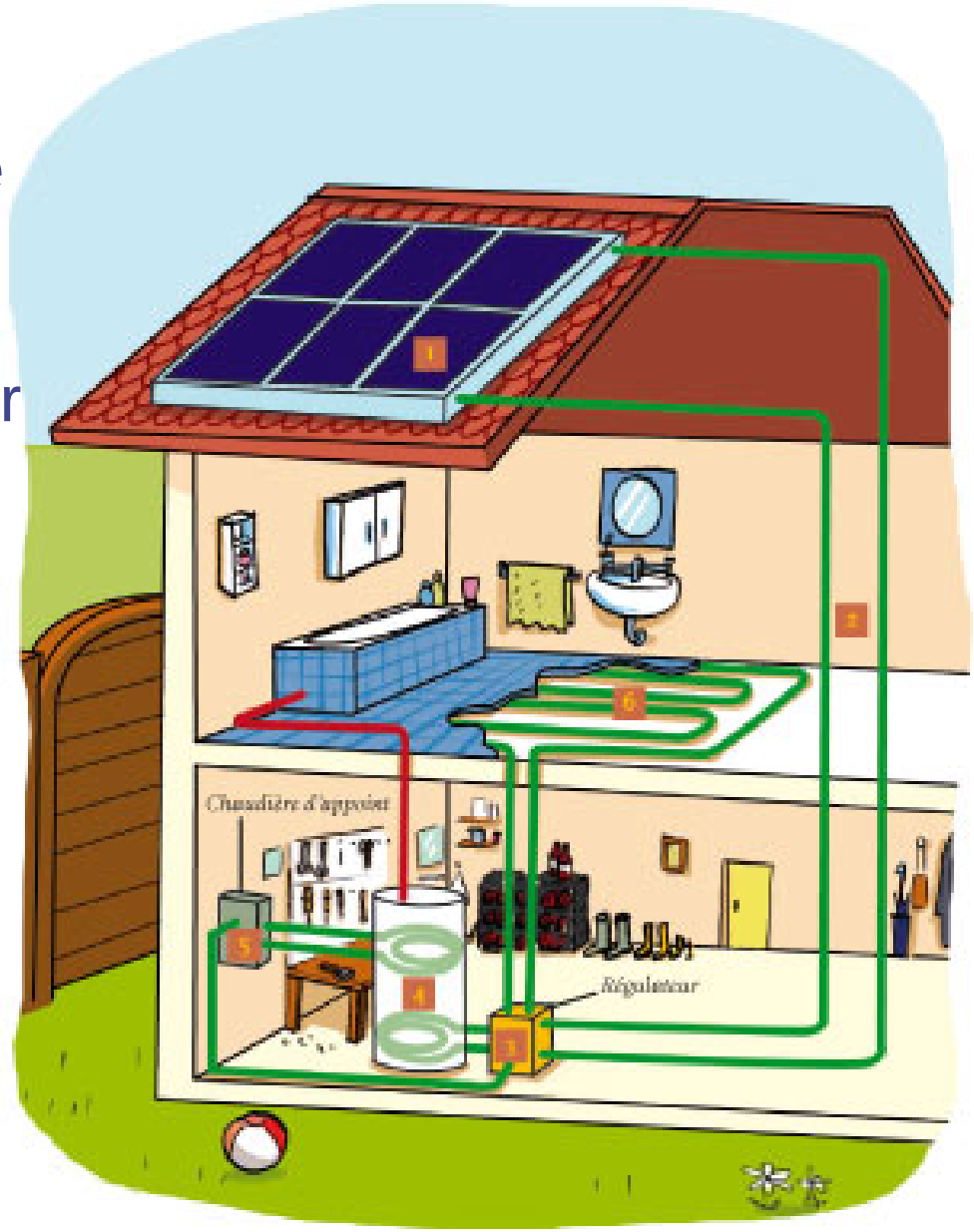
4/ Solaire thermique pour le chauffage

le chauffage de l'eau

un chauffe-eau solaire couvre entre 40 et 80 % des besoins en eau chaude
(surface entre 2 et 5 m² pour 4 personnes - 200l)

le chauffage de la maison

le système solaire combiné couvre 25 à 60 % des besoins en chauffage et en eau chaude
(surface environ 1 à 1,2 m² pour 10 m² de maison).



www.energies-renouvelables.org/f-solaire_thermique.asp : dessins Claire Laffargue

4/ Solaire thermique pour le chauffage

EXERCICE : Et si on enlevait la chaudière au gaz ?

Maison 200 m², consommation gaz 20 000 kWh,
2000 kWh pour la cuisine

Et si on enlevait la chaudière au gaz ?

Rendement thermique 80%, chauffage entre oct et mars

Quelle surface de panneau thermique sur le toit?

Relation utile : $E_{(kWh)} = E_{J(kWh/m^2/jour)} . N . S . \eta$

E : énergie récupérée dans les radiateurs (**kWh**)

E_J : énergie récupérée sur le toit par jour par m² de panneaux (**kWh / m² / jour**)

N : nombre de jours S : Surface de panneaux disponible (**m²**)

η : rendement de l'installation

Choix de la ville : Toulouse Prendre en compte un masque : non

Inclinaison du plan : 20° Orientation du plan : +45° Albédo du sol : 0.2

Irradiation sur un plan d'inclinaison 20° et d'orientation 45°. Comparaisons

Irradiation :	jan	fév	mars	avr	mai	juin	juil	août	sep	oct	nov	déc	année
Globale (IGP)	1.54	2.62	3.9	4.71	5.99	6.27	5.92	5.54	4.49	3.19	1.81	1.2	3.94

Logiciel Calsol

4/ Solaire thermique : la cuisine!

http://images.wikia.com/solarcooking/images/7/73/Minimum_Solar_Box_Cooker_Photo.jpg

http://solarcooking.org/Bender-Bayla-Somalia.htm

Solar Steam cooking system installed at Sangi Industres, Hyderabad for their industrial canteen to cook for 500 workers.
http://www.gadhiasolar.net/solarsteam.html

Solar Steam cooking System installed at Sri Saibaba Santhan Shirdi to cook for 3000 people per day

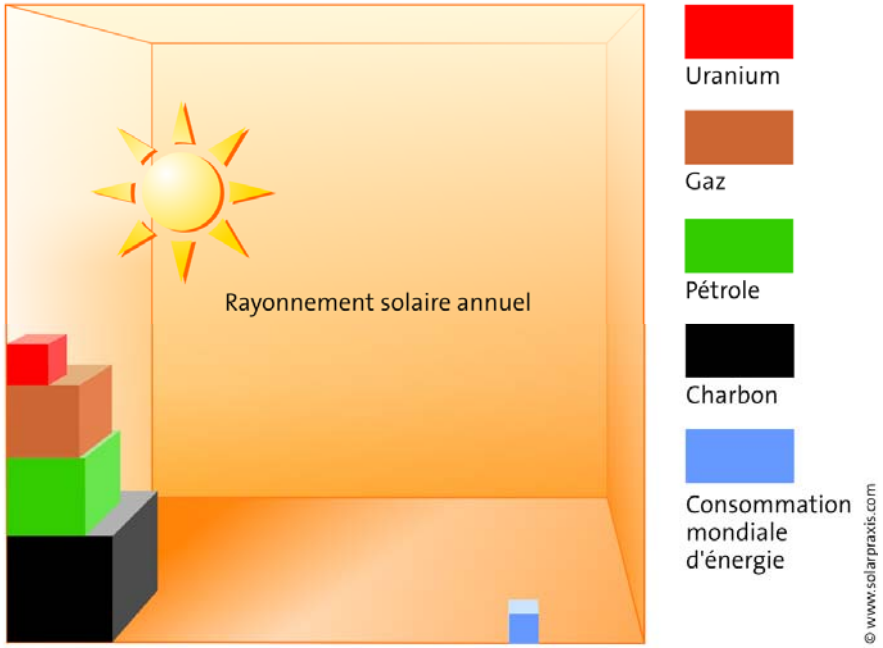
Avec le soleil, on peut donc récupérer :
de **l'électricité** directement
ou indirectement,
de la **chaleur.**

Oui mais la ressource n'est pas toujours là... :

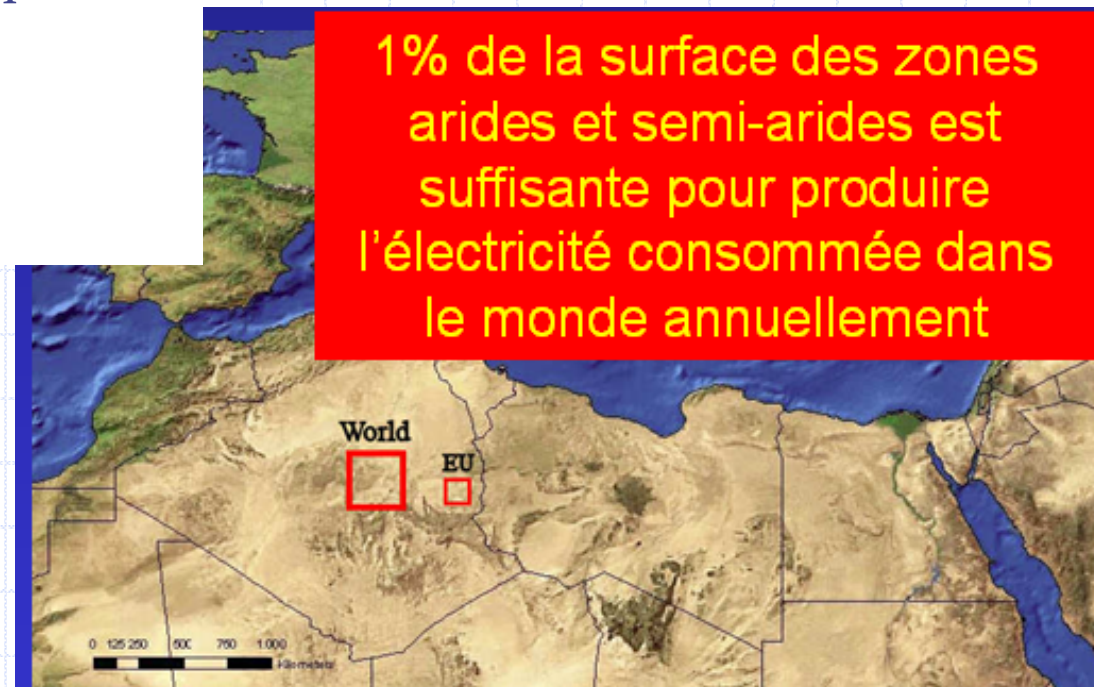
Une ressource inépuisable mais variable ...

5/ La ressource solaire

18 % de la surface de la France
= 99300km²
avec 2000 kWh/m²/an
et 10% de rendement global,
on obtient une production
électrique de
20 000 TWh =
conso élec de la planète.



Réserves mondiales d'énergie primaires

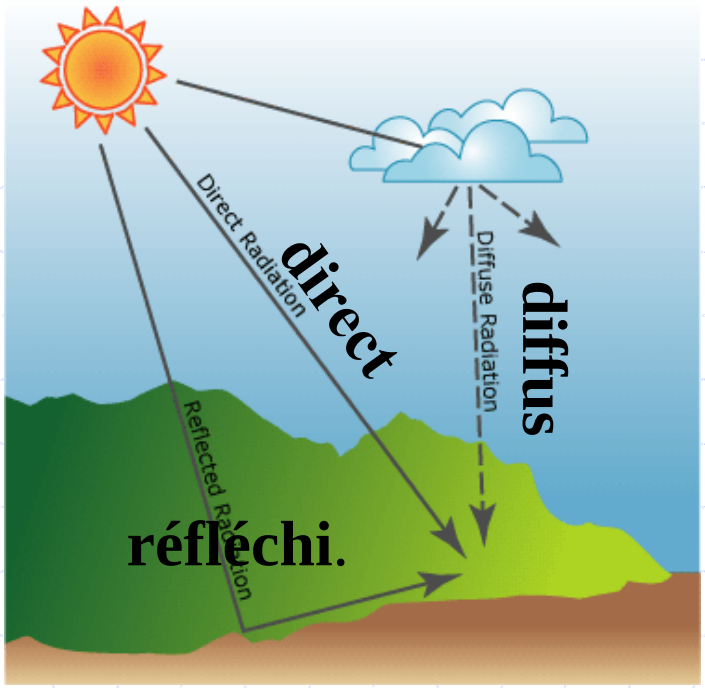


Docs : A. Ferriere PROMES

5/ La ressource solaire

Selon les régions, une **énergie** de **900 kW.h à 2300 kW.h/m²/an**, soit une puissance moyenne de 100 à 260 W/m²
et une **puissance crête** de plus de **1000 W/m²**
En France environ **1000 kWh/m²/an**

Une grande part de cette puissance par unité de surface peut être directement et aisément convertie en chaleur,
une plus faible part (8 à 25%) peut être transformée directement en électricité

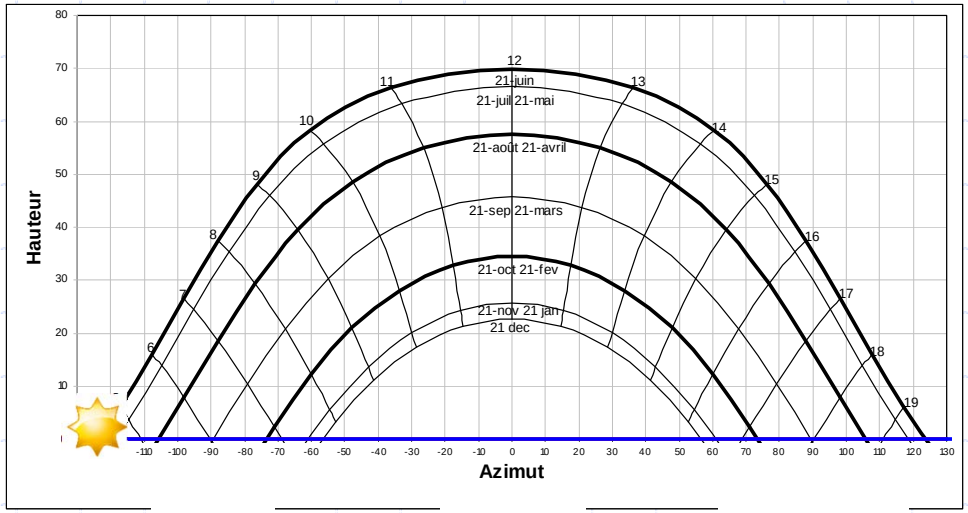


Trois composantes dans le rayonnement reçu au sol : le **direct**, le **diffus** et le **réfléchi**.

5/ Une ressource variable.

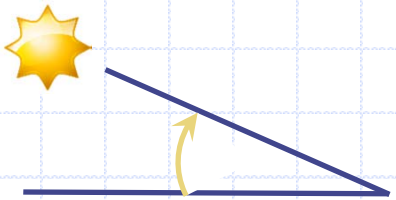
…la position du soleil
varie sur la journée, …
sur l'année …
et en fonction du lieu.

Toulouse.

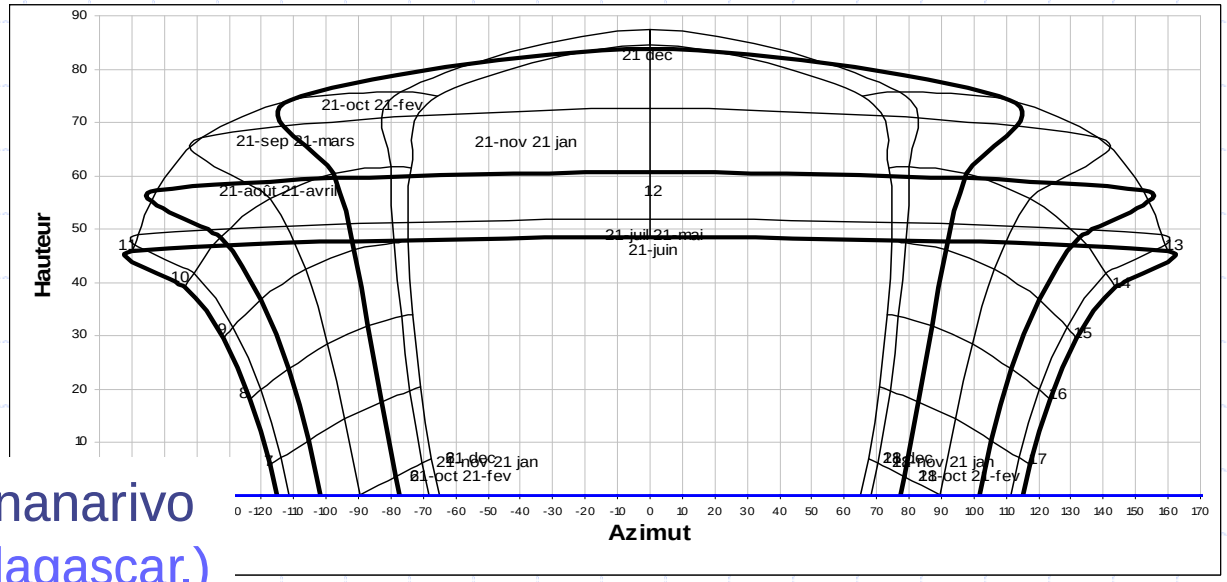


Est Sud Ouest

Course du soleil
au fil des jours..



hauteur(°)

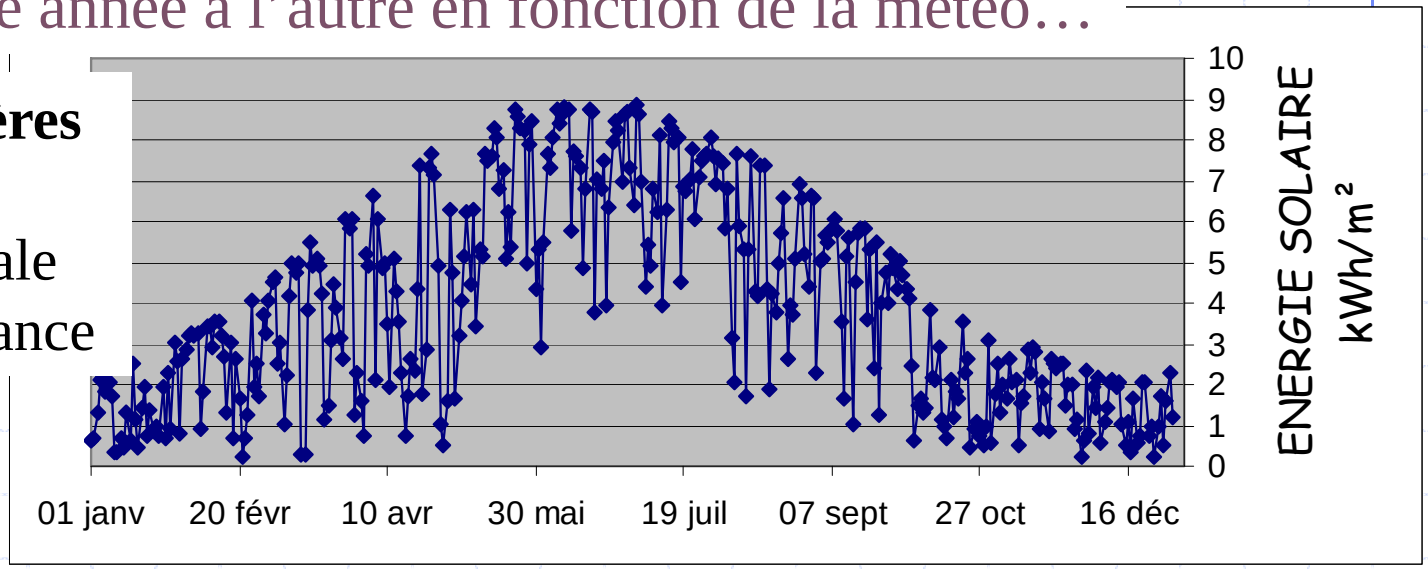


Antananarivo
(Madagascar.)

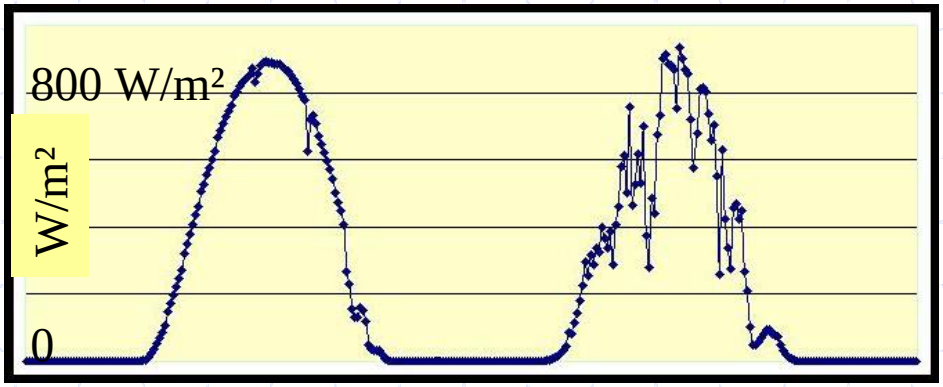
5/ Une ressource variable.

…variable …
d'une année à l'autre en fonction de la météo…

Energies journalières
(Millau 2005)
Surface Horizontale
données : Météo France



…variable sur
la journée …

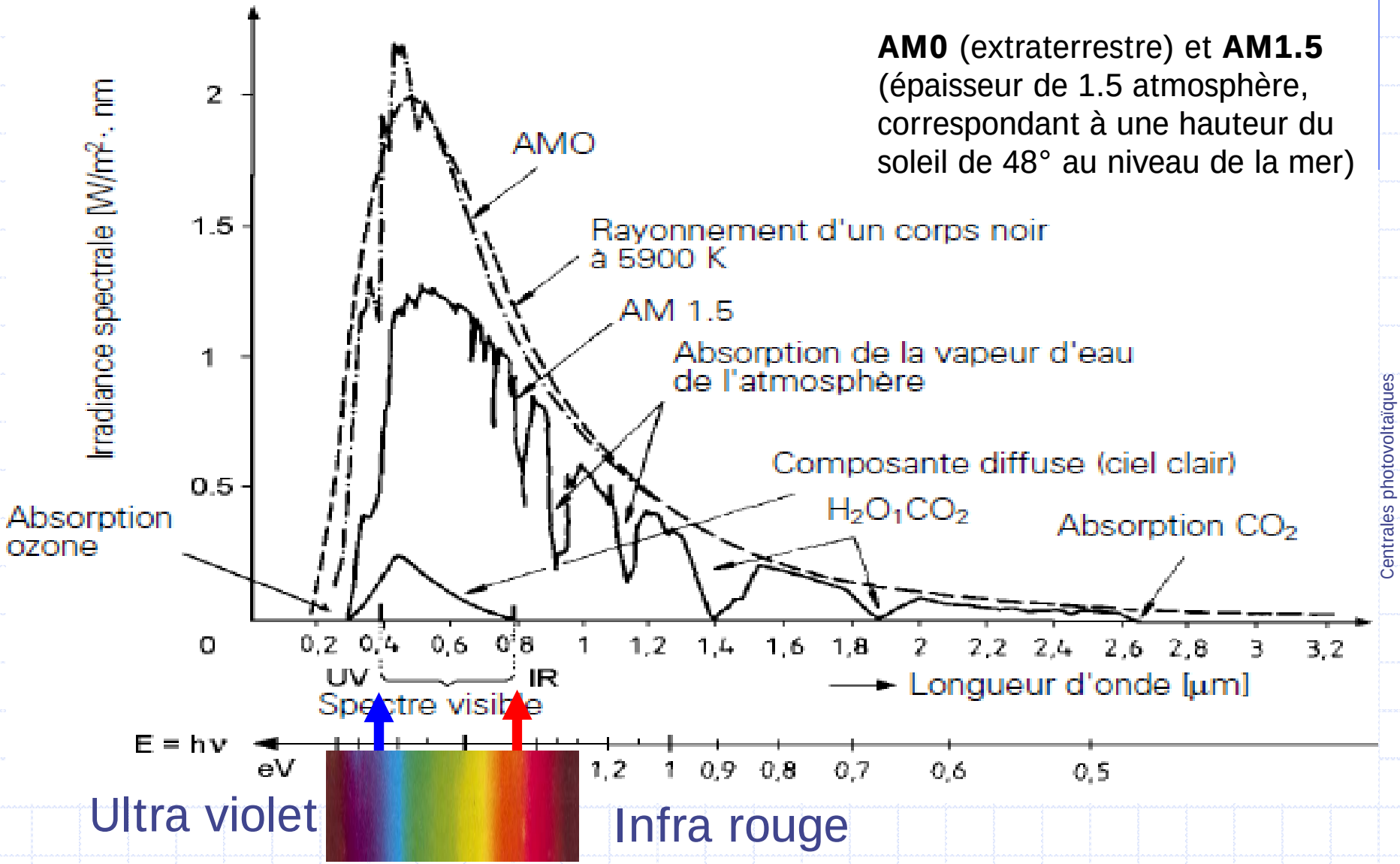


Journées du 20 et 21 /07/2006
données : LAAS)
Irradiation sur une surface horizontale Échelle entre 0 et 1000 W/m² (Max vers 13h30)

5/ Spectre du soleil

Densité spectrale de l'irradiation

AM0 (extraterrestre) et **AM1.5** (épaisseur de 1.5 atmosphère, correspondant à une hauteur du soleil de 48° au niveau de la mer)

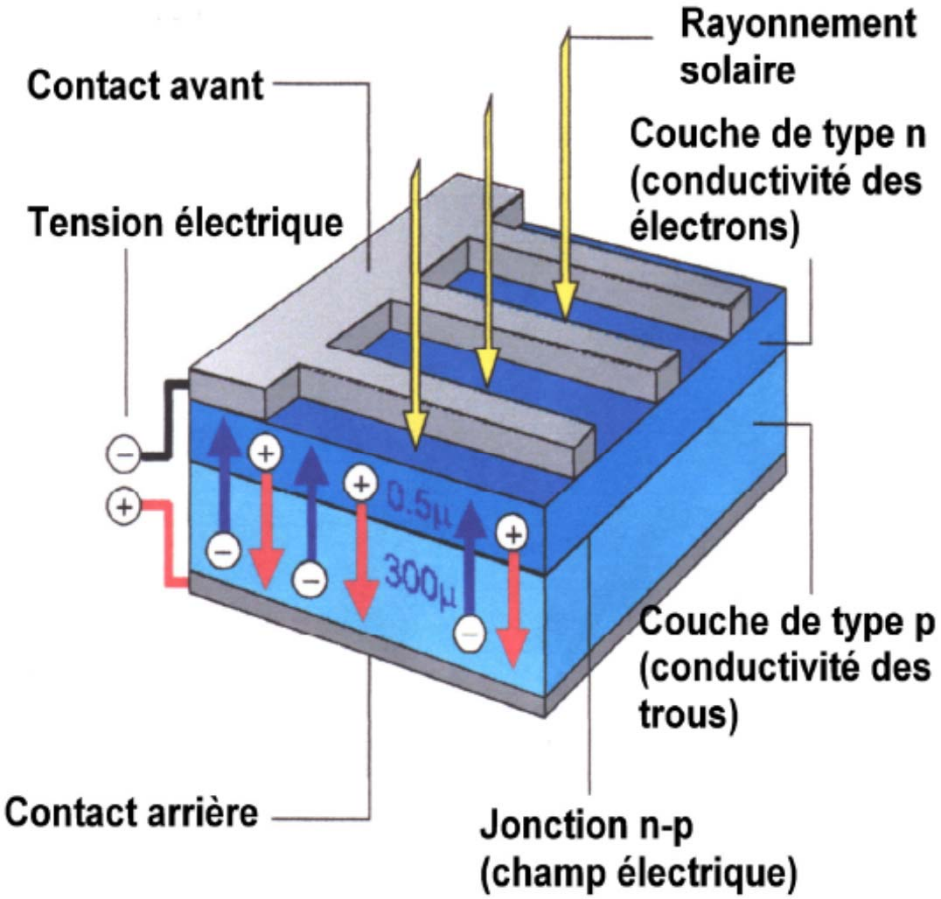


Centrales photovoltaïques
ISBN 3-905232-26-X

La ressource est inépuisable, variable ...

Quand il y a du soleil, comment les cellules font-elles de l'électricité? ...

6/ Effet photovoltaïque



Un **photon** arrive avec une énergie **E=hC/λ**. si il a assez d'énergie il arrache un électron lié au réseau cristallin du semi-conducteur

⇒ électron devient libres

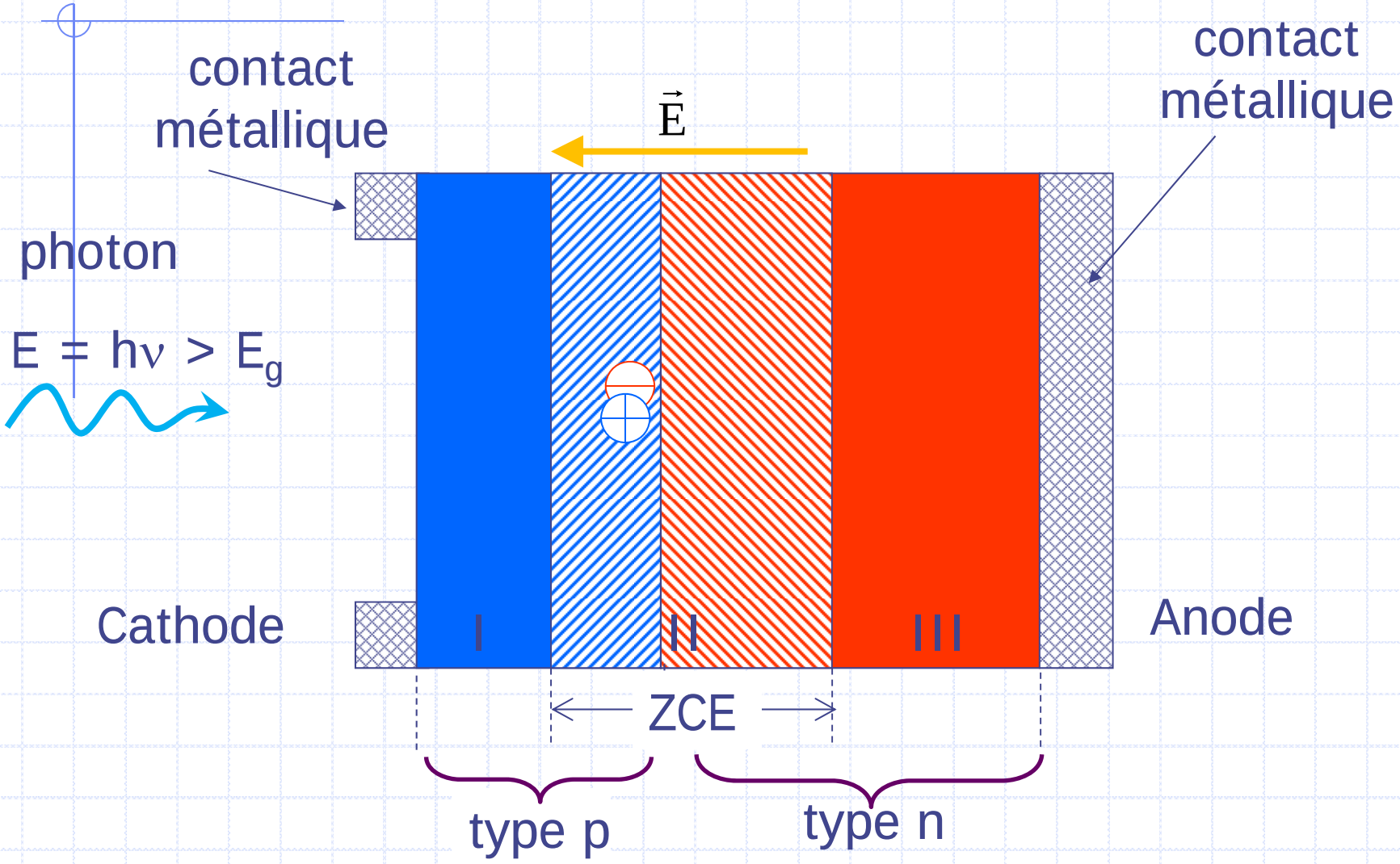
⇒ **création paire électron-trou**, naturellement il y a une recombinaison mais comme il y a un **champ électrique dans la ZCE** (Zone de Charge d'Espace) à l'nterface entre les zones N et P

⇒ l'électron va d'un côté, le trou (charge +) de l'autre

⇒ les charges + s'accumulent d'un côté, les – de l'autre ⇒ création d'une **tension électrique** entre les deux côtés de la cellule. ⇒ création d'un **courant électrique** si la cellule est refermée sur une charge.

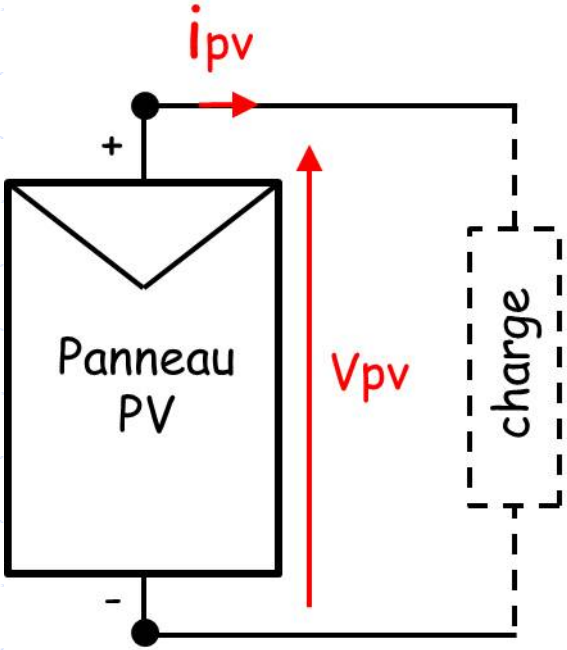
6/ Effet photovoltaïque

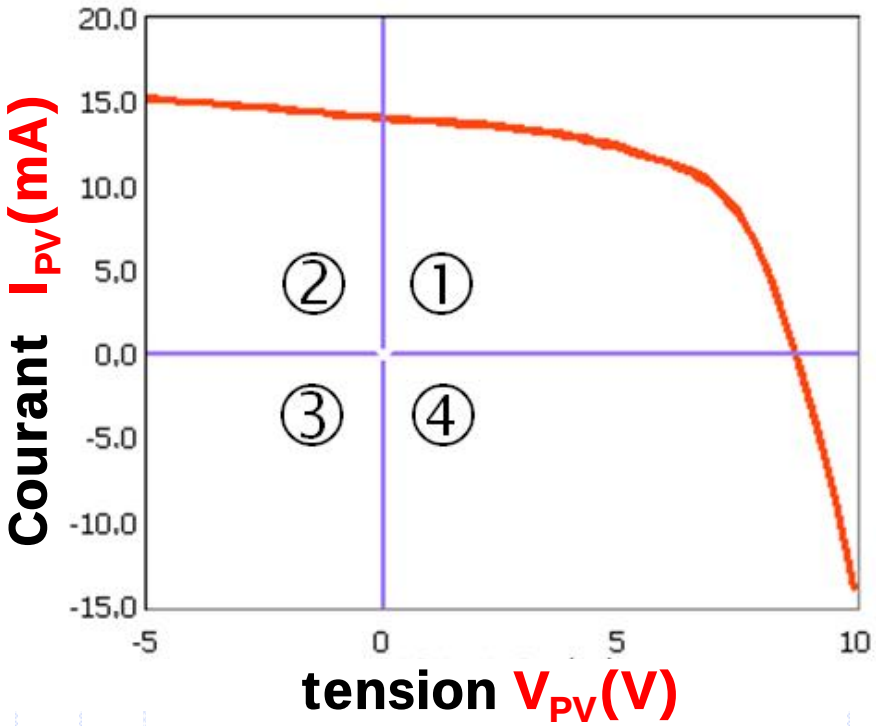
Conversion : lumière / électricité.



Et quelles performances peut-on attendre? ...

7/ Caractéristiques électriques





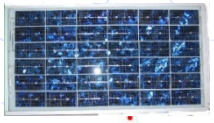
convention **générateur**

$$p_{PV} = v_{PV} . i_{PV}$$

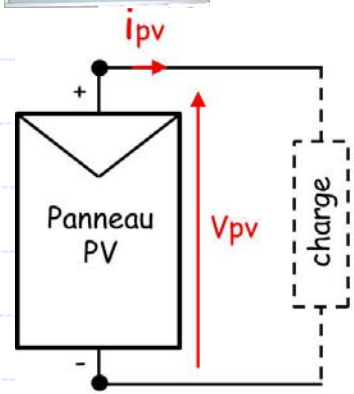
Ppv> 0 dans le **quadrant 1**

le panneau **fournie** de l'énergie.
Le panneau travaillera toujours dans ce cadran.

Caractéristique **I(V)** d'un petit panneau
15cm x 5cm



7/ Caractéristiques électriques



convention **générateur**

$$p_{PV} = v_{PV} \cdot i_{PV}$$

Placez sur les dessins :

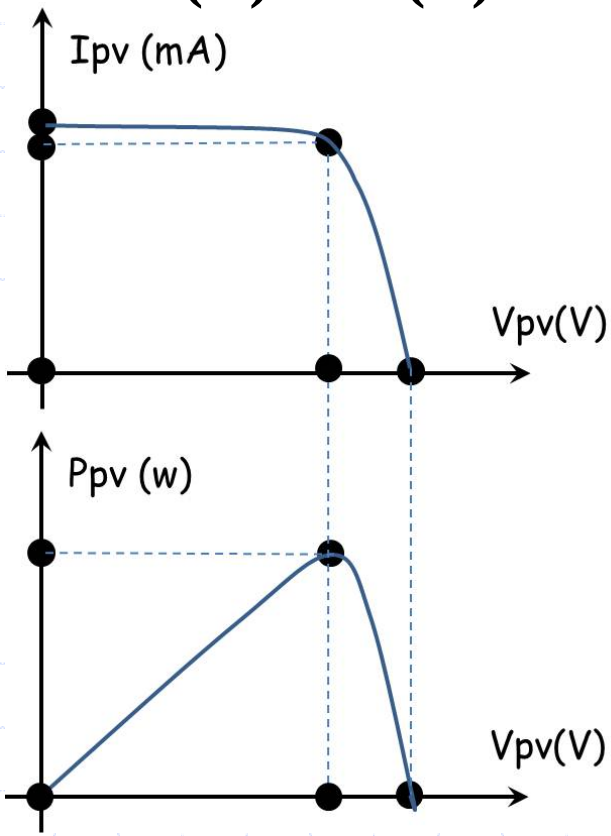
Voc (V) : tension de circuit ouvert

Isc(A) : courant de court circuit

Pmax (W) : puissance maximale

Vmp, Imp : tension et courant @ pmax

Caractéristiques **I(V)** et **P(V)**



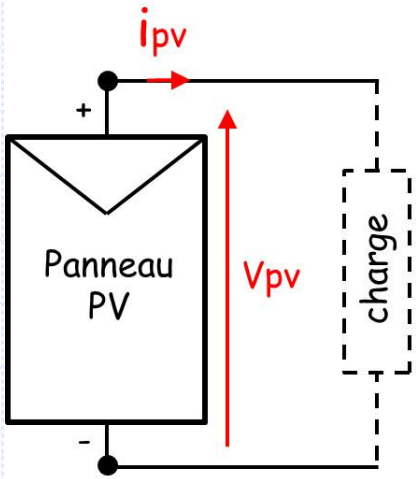
PW1650		
Puissance typique	**W**	165
Puissance minimale	**W**	160
Tension à la puissance typique	**V**	17,2
Intensité à la puissance typique	**A**	9,6
Intensité de court circuit	**A**	10,2
Tension en circuit ouvert	**V**	21,6

Specifications de puissance à 1000 W/m² : 25°C : AM 1,5

Taille du module	mm	1237 x 1082 x 45

Les docs techniques donnent ces paramètres dans les STC (1000W/m², AM1.5 et 25°C)

7/ Caractéristiques électriques



La **tension maximale** (Voc) est proportionnelle au nombre de cellules en série. Si N cellules

$$\mathbf{Voc = N.\ Voc_{cell}}$$

Le **courant de court-circuit** est proportionnel à la surface $\mathbf{S_{cell}}$ **(m²)** de chaque cellule et à l'irradiation **G (W/m²)**.

$$\mathbf{Isc = K\ .\ S\ .\ G}$$

K =12 mA/cm² pour du Sic @1000 W/m² et 25°C

La **puissance maximale d'un panneau** est aussi proportionnel à l'irradiation **G** (W/m²) (cf diapo suivante).

$$\boxed{\mathbf{Pmax\ = K'\ .\ G}}$$

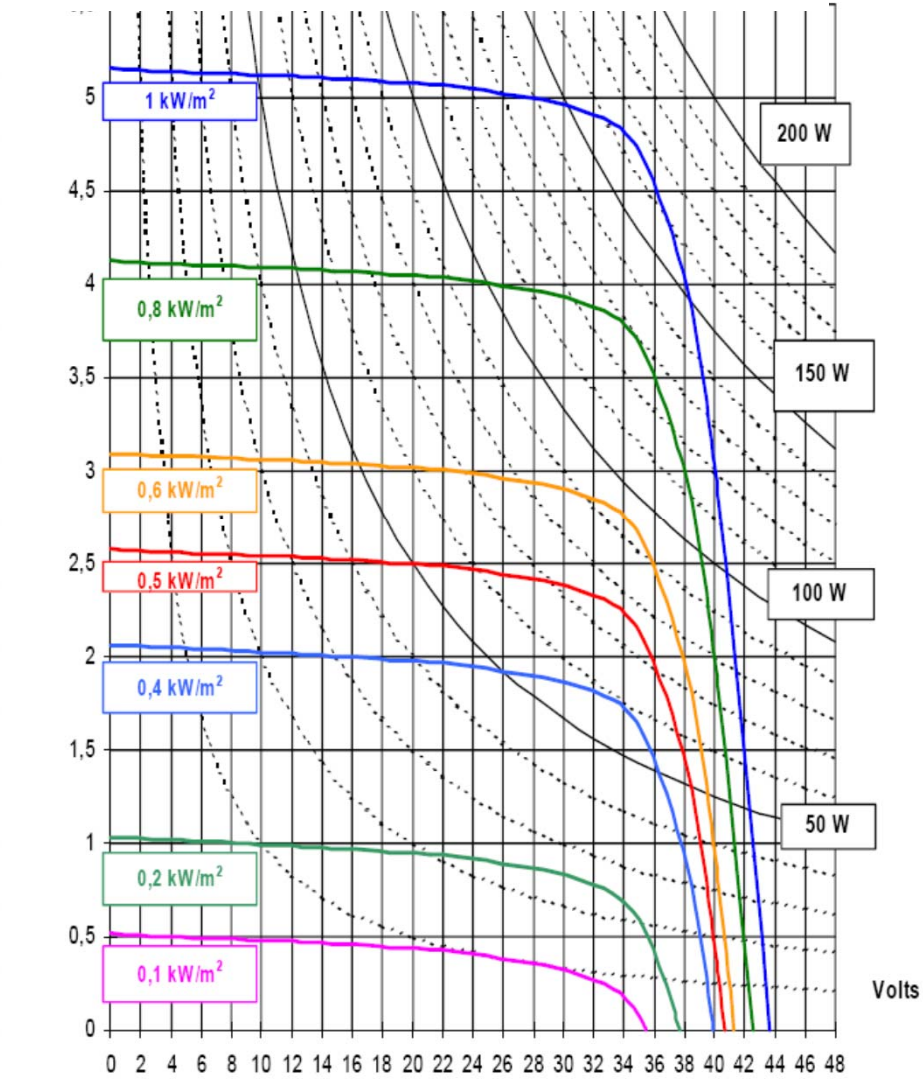
Le **rendement photovoltaïque** η_{PV} est défini par

$$\boxed{\eta_{PV} = p_{max} / (G.S)}$$

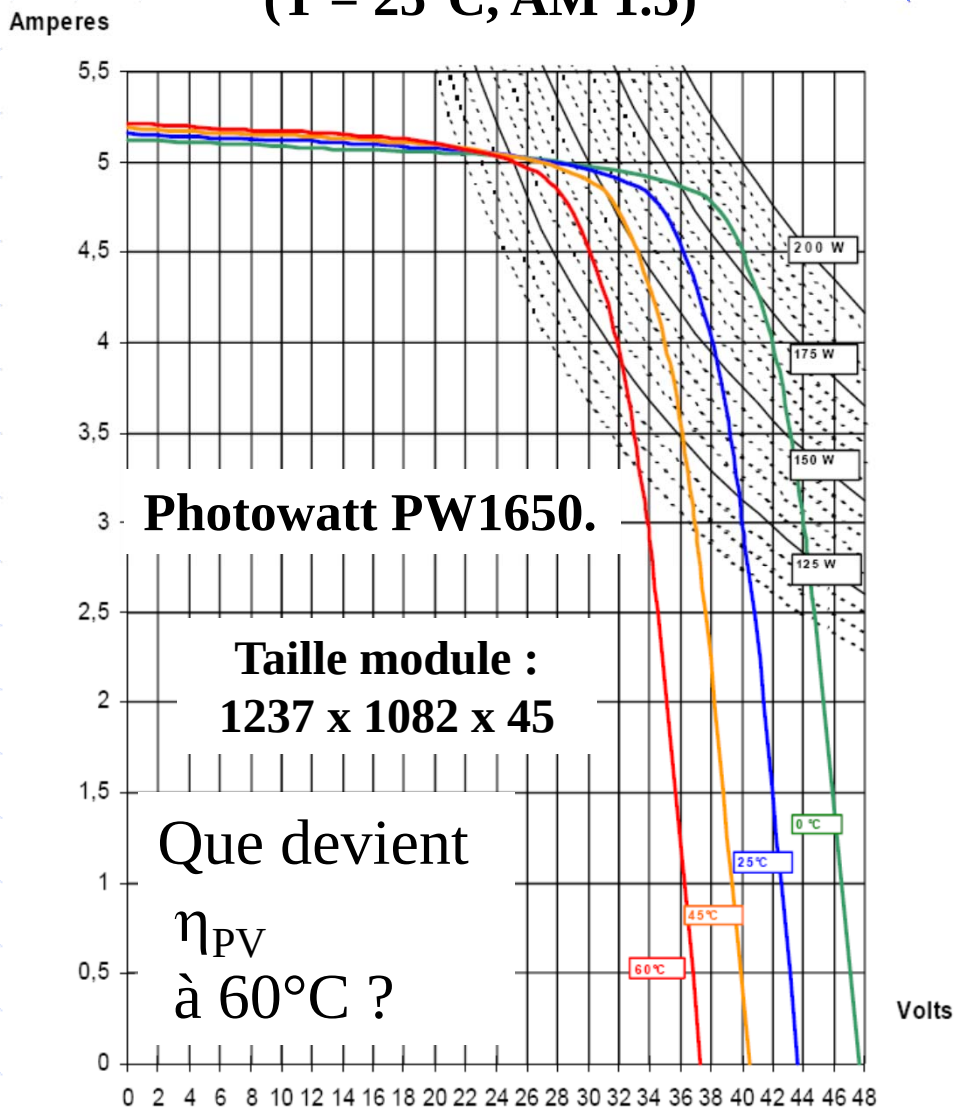
S (m²) étant la surface du panneau.

7/ Influence de G et T sur Pmax

Irradiation G (W/m²)
(T = 25°C, AM 1.5)



Température T (°C)
(T = 25°C, AM 1.5)

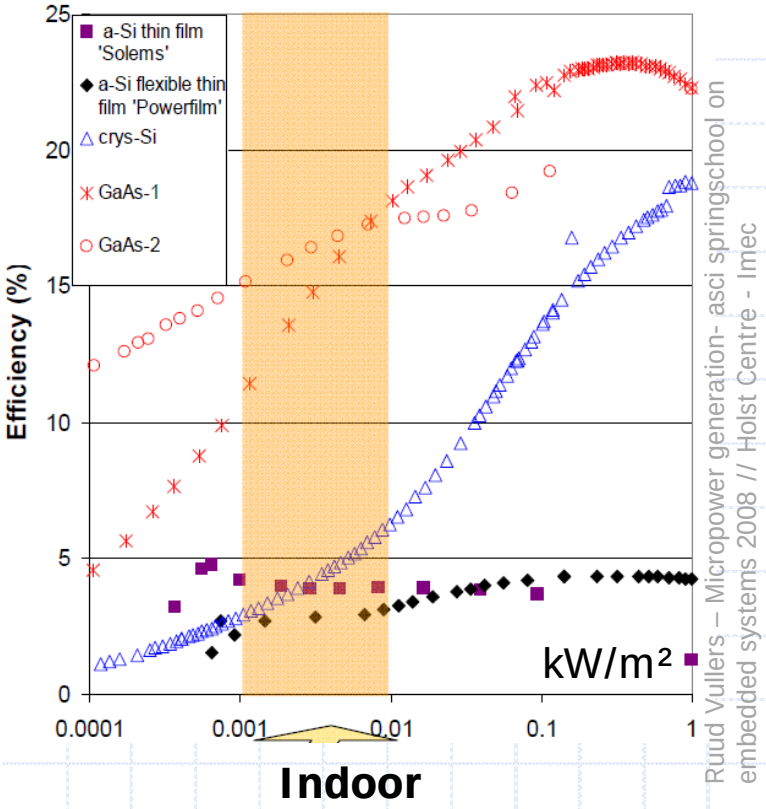


Photowatt PW1650.

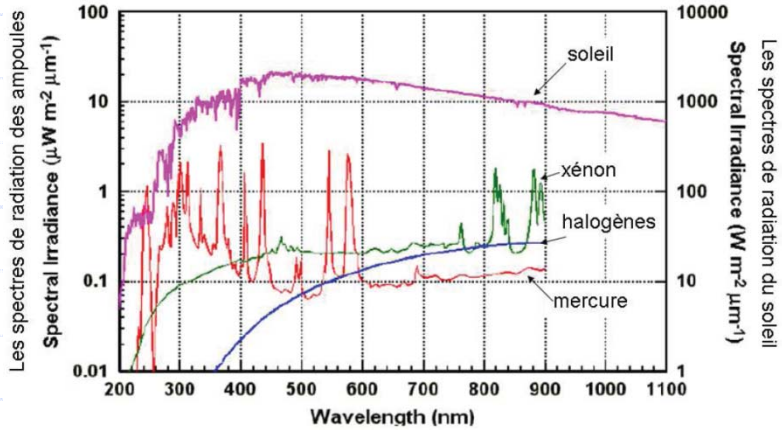
Taille module :
1237 x 1082 x 45

Que devient
η_{PV}
à 60°C ?

7/ Utilisation en intérieur du photovoltaïque



conditions	caractéristique de la source	rendement	Puissance récupérée
intérieur	100 µW/cm²	5% - 10%	5 µW/cm²
extérieur	100 mW/cm²	10% – 25%	10 mW/cm²



Comparé à une utilisation extérieure, le PV est moins favorable en intérieur :

- Une intensité lumineuse beaucoup plus faible
- Un spectre lumineux différent
- Le rendement des cellules est plus faible
- Les surfaces disponibles sont plus petites

⇒ La puissance récupérée est réduite.

⇒ Le PV peut alimenter des systèmes peu gourmand!

7/ Les différentes technologies

Silicium multicristallin :

ηlabo ≈ **19%.**

ηcellules indus ≈ **11, 14%.**

62 % du marché

Silicium monocristallin :

ηlabo ≈ **25%.**

ηcellules indus ≈ **12, 16%.**

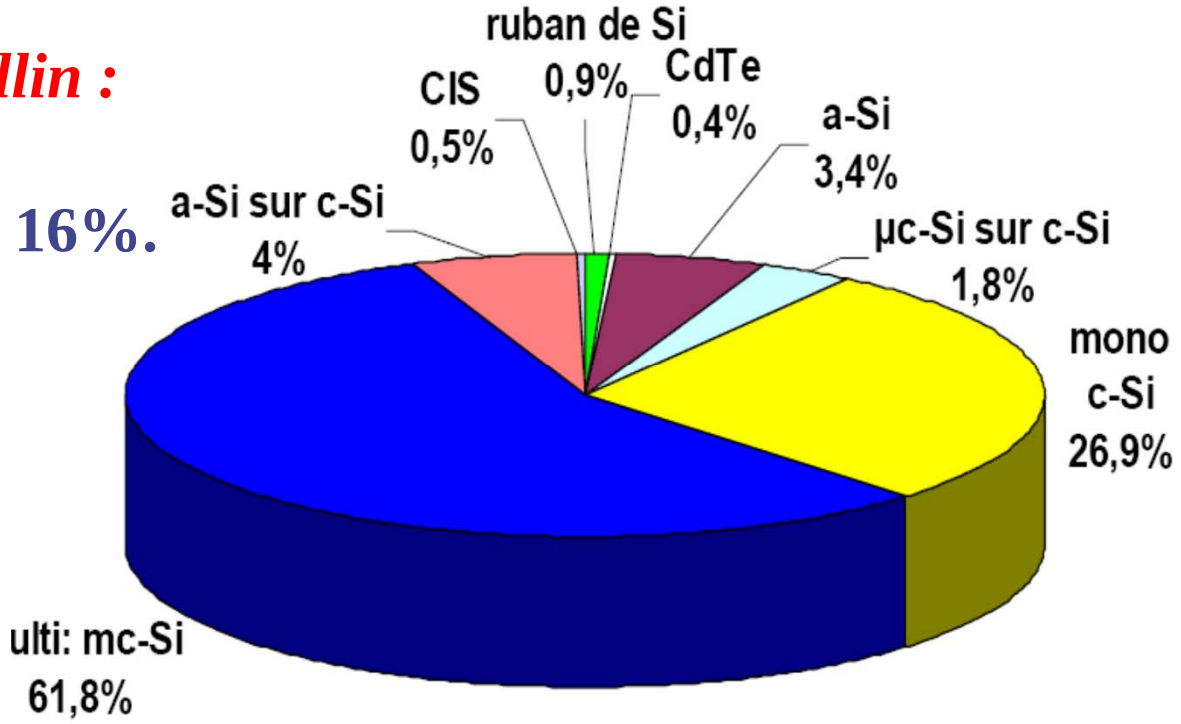
27 % du marché

Silicium amorphe

ηlabo ≈ **13%.**

ηmodules ≈ **6 à 8%.**

< 3% du marché

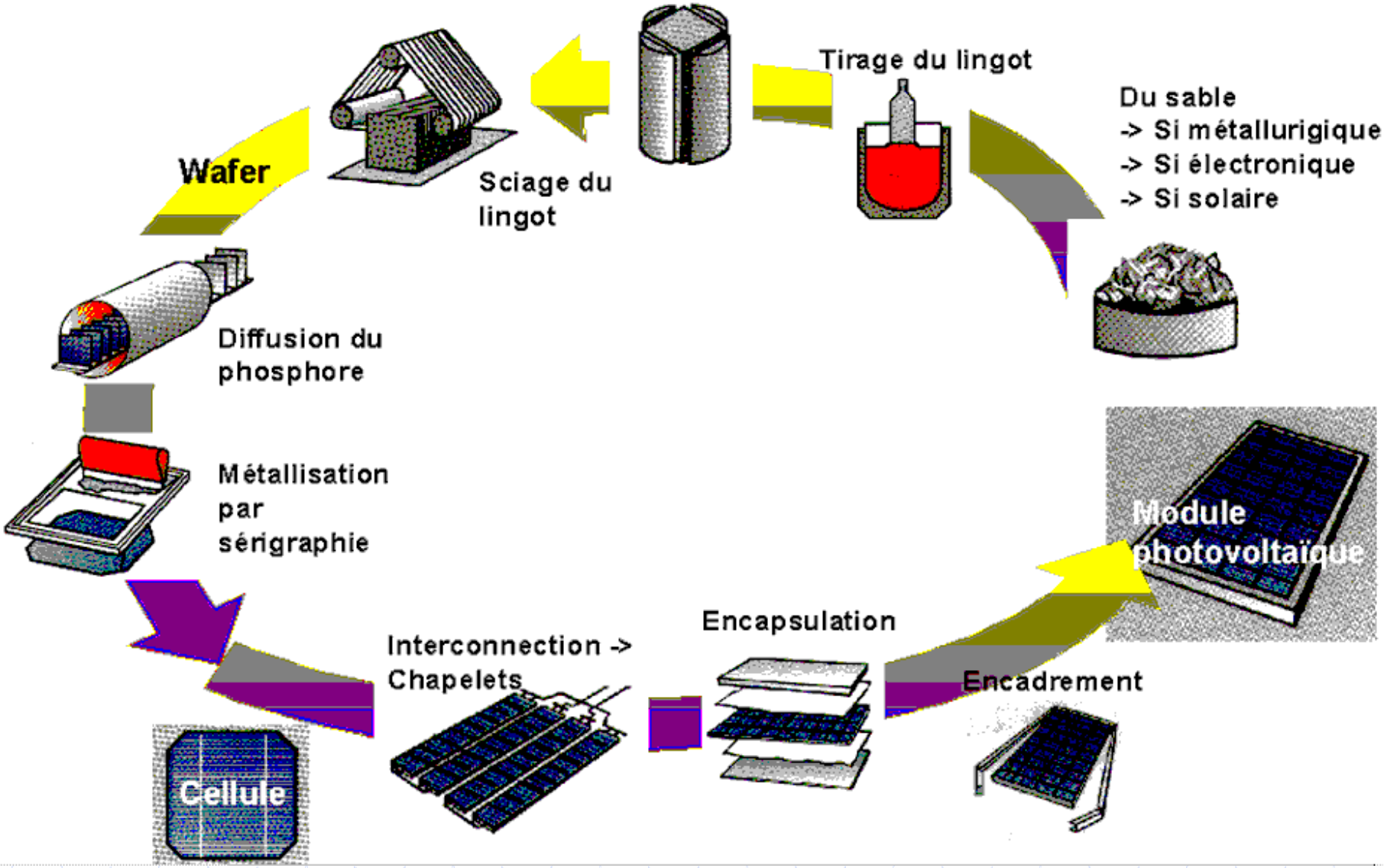


Le top :

Cellules multi-jonction avec système concentrateur.

η≈ **40%.** ***(12-2006)***

7/ Fabrication.

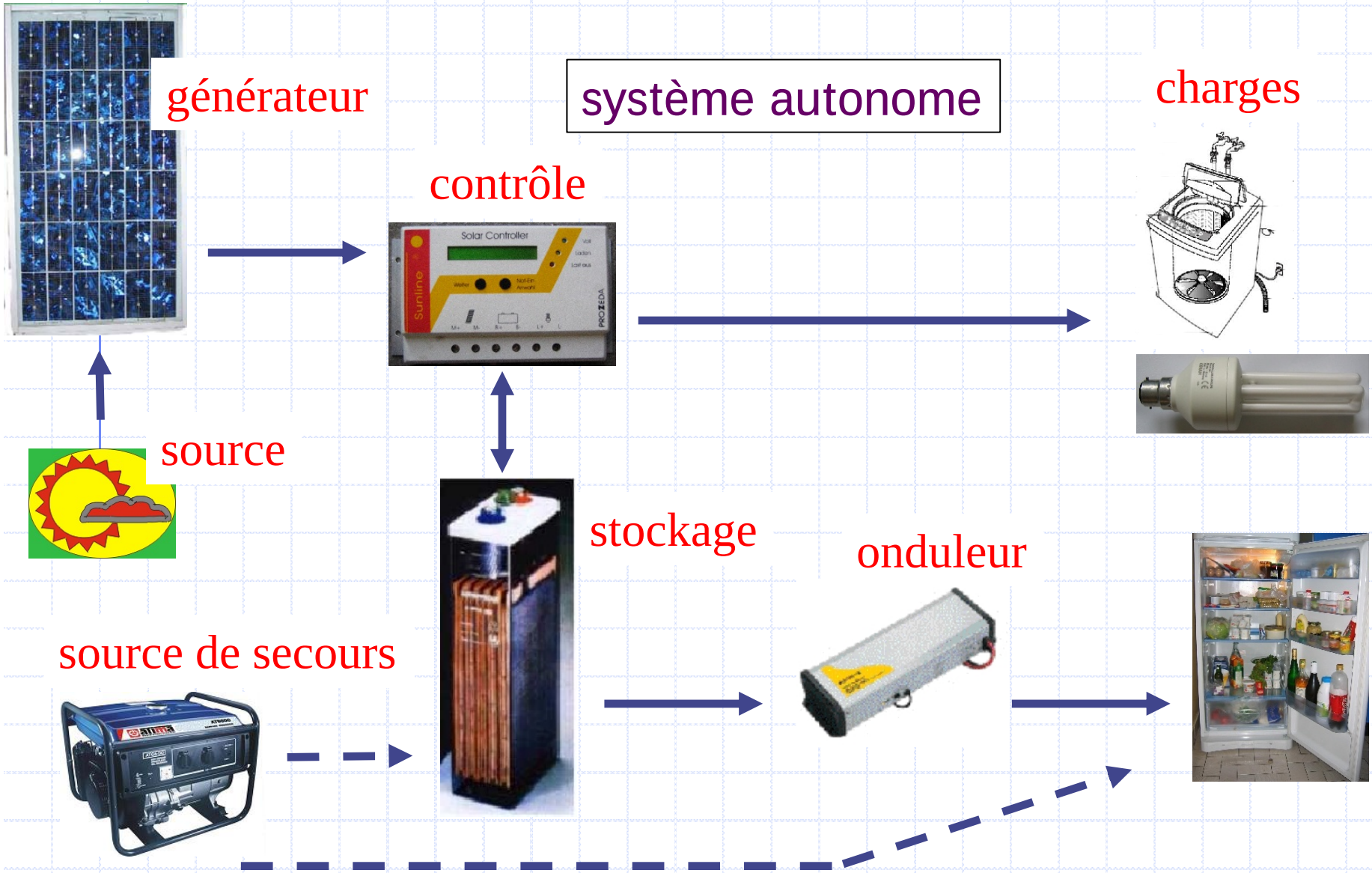


Un morceau de lingot brut

Une tranche avant le dépôt de la couche anti-reflet.

Revenons au photovoltaïque : que faut-il savoir pour ne pas se faire escroquer lorsque on achète un panneau PV?

8/ Systèmes PVs - Production



LOGICIEL CALSOL

Rend PV : 12 %

Choix de la ville : Toulouse

Inclinaison du plan : 20° Orientation du plan : +45° Albédo du sol : 0.2

Cliquer ici pour valider votre choix et lancer les calculs

Irradiation sur un plan horizontal en kWh/m² par jour ⦿ ou en kWh/m² cumulés ○ SOURCES

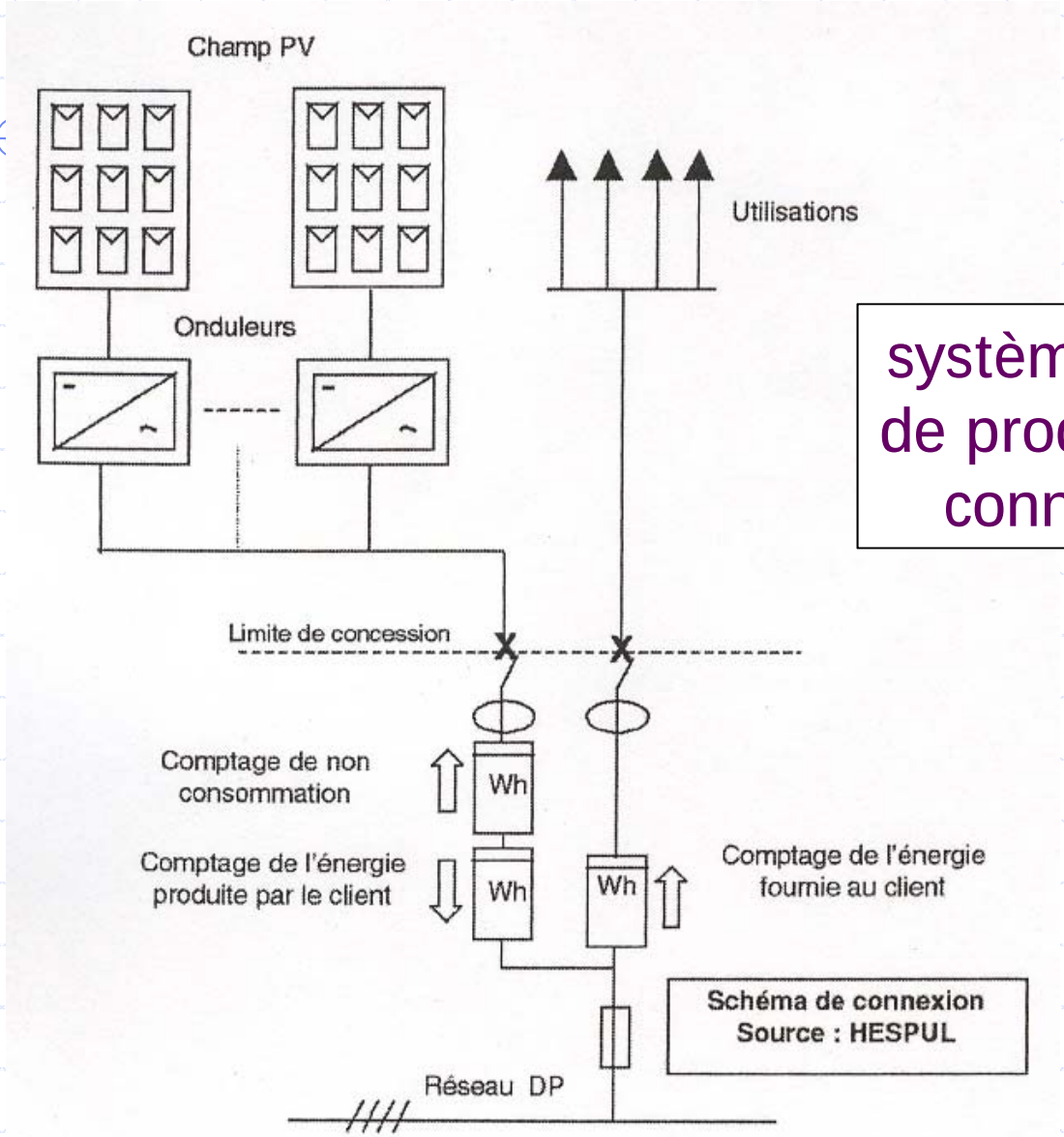
Irradiation :	jan	fév	mars	avr	mai	juin	juil	août	sep	oct	nov	déc	année
Globale (IGH)	1.31	2.28	3.56	4.56	5.98	6.37	5.98	5.42	4.18	2.8	1.55	1.03	3.76
Directe (IBH)	0.44	0.98	1.76	2.21	3.32	3.55	3.21	3.03	2.26	1.4	0.58	0.3	1.92
Diffuse (IDH)	0.87	1.3	1.8	2.35	2.66	2.82	2.77	2.39	1.92	1.4	0.97	0.73	1.83

Irradiation sur un plan d'inclinaison 20° et d'orientation 45° COMPARAISONS

Irradiation :	jan	fév	mars	avr	mai	juin	juil	août	sep	oct	nov	déc	année
Directe (IBP)	0.71	1.35	2.16	2.41	3.36	3.46	3.19	3.2	2.65	1.87	0.91	0.51	2.16
Diffuse (IDP)	0.84	1.26	1.74	2.28	2.58	2.74	2.68	2.32	1.86	1.36	0.94	0.71	1.78
Réfléchie (IRP)	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02	0.01	0.01	0.02
Globale (IGP)	1.56	2.63	3.92	4.72	5.97	6.24	5.91	5.56	4.54	3.25	1.85	1.22	3.96

À côté de Toulouse j'ai un cabanon de vacances.
Je veux être autonome (non relié au réseau).
Quelle surface de panneau me faut-il?
1/consommation 2/ gisement solaire entre juin et septembre
2/ surface de panneaux PV (avec marge de sécurité de 20%)

8/ Systèmes PVs - Production

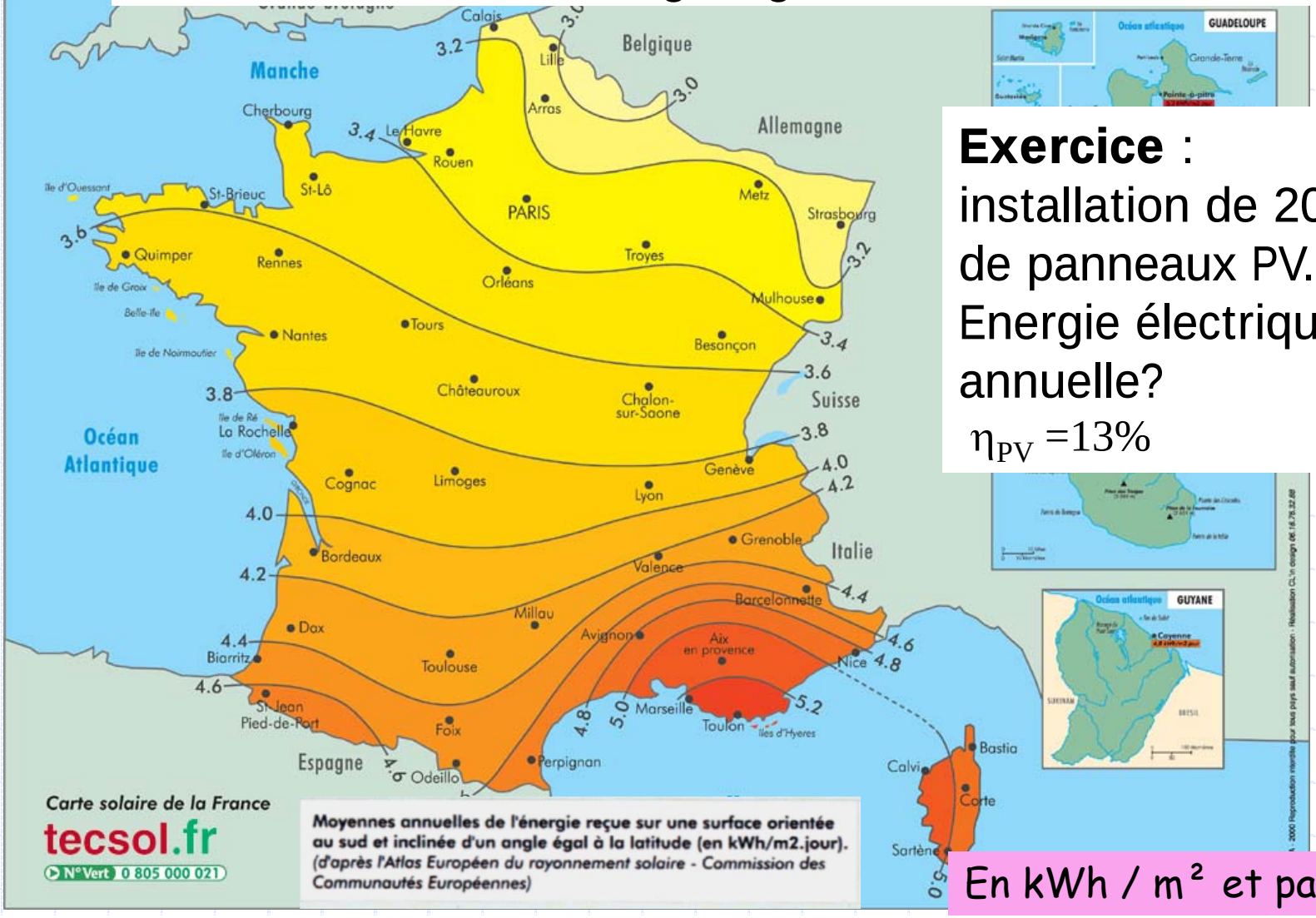


système photovoltaïque de production électrique connecté au réseau

Et les protections … disjoncteurs différentiels, parafoudre, sectionneurs, …

8/ Systèmes PVs - Production

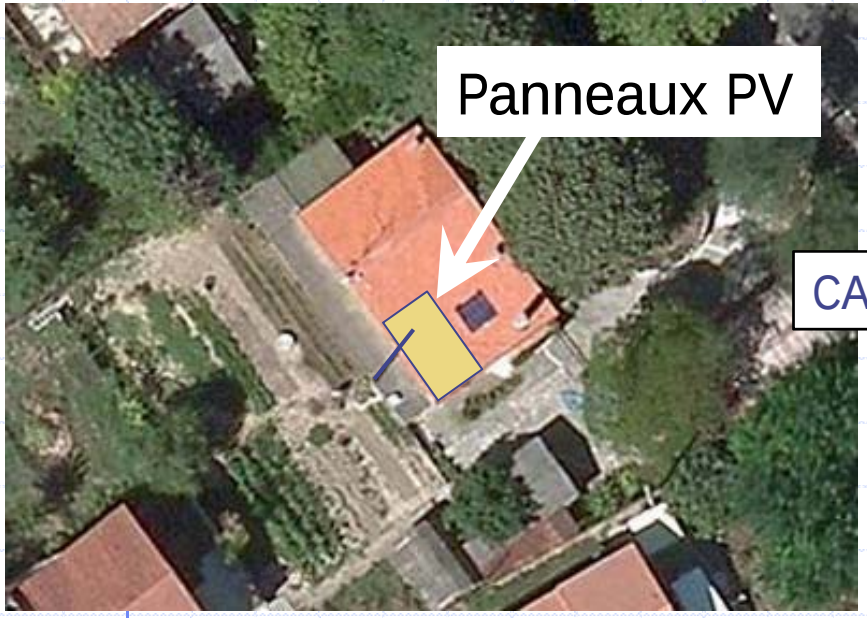
Moyenne annuelle pour une surface orientée au Sud et inclinée avec un angle égal à la latitude du lieu.



Exercice :
installation de 20 m² de panneaux PV.
Energie électrique annuelle?
η_{PV} =13%

En kWh / m² et par jour

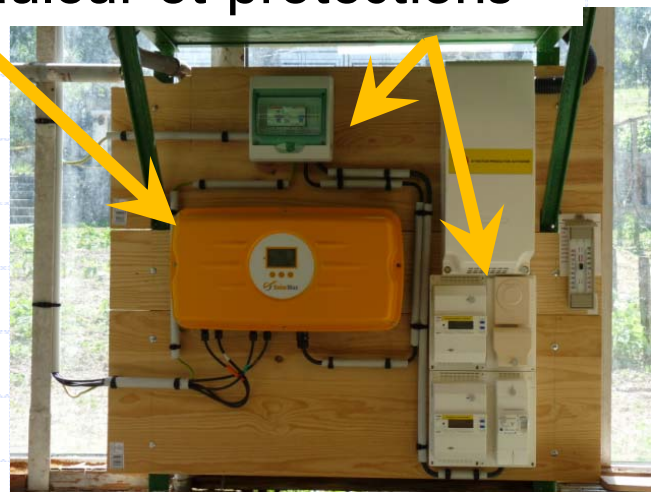
8/ Exemples de systèmes PV connectés au réseau



CASTANET

2,96 kWc, 21,25 m² 25 500 €
Prod 3665 kWh/an
Recette 2150 € / an
Tps retour énergétique : 2,5 ans
Tps de retour investissement10 ans

Onduleur et protections



TOULOUSE

2,20 kWc, 20 m² 18400 €
Prod 2400 kWh/an
Recette 1320 € / an
Tps de retour brut 8 ans

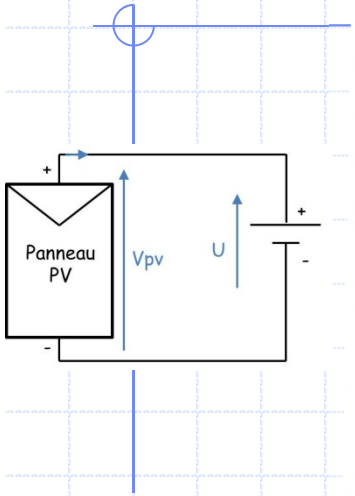
TARBES

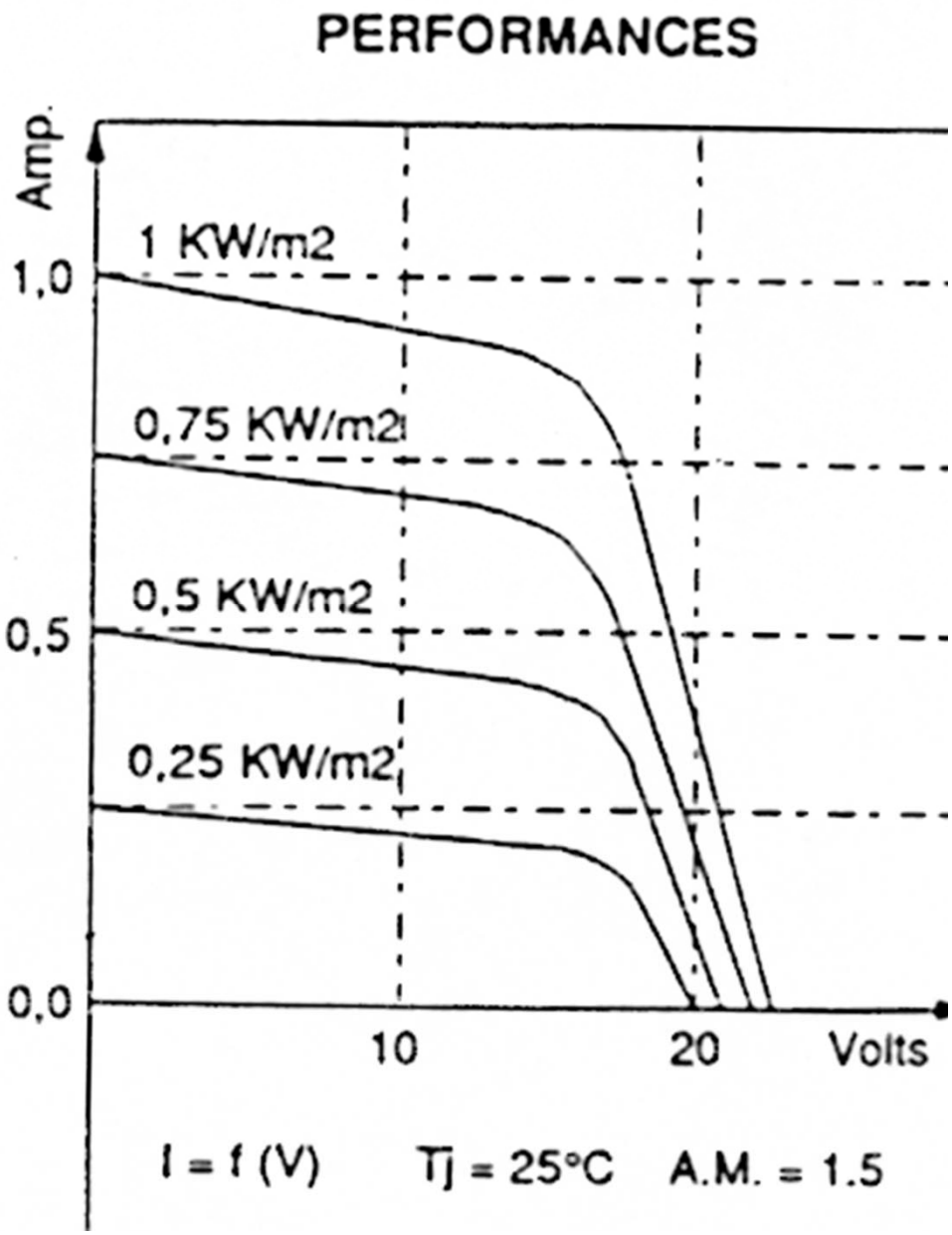
3,00 kWc, 19,8 m²
19800 €
– 8400 € crédit impôt

Conclusion

Il fait beau, le soleil fournit 1000 W/m²
Par an en France, le soleil fournit 1000kWh/m²
Pmax proportionnelle à l'irradiation (W/m²).
Le nombre de cellules fixe la tension, la surface des cellules fixe le courant.
Rendements PV varient selon la techno 5% (aSi) à 15% (Sic et Si mc) en pratique.
Tps de retour énergétique est 2,5 ans en France.
Utilisations : Systèmes autonomes :
éclairage, réfrigération, pompage (fil de l'eau)
alimentation avec ou sans stockage
Energie chère mais systèmes fiables (durée de vie >20 ans pas de parties tournantes), problème du stockage (batteries : éléments faibles à changer de tps en tps).
Systèmes connectés au réseau
Pas de stockage (c'est le réseau qui gère ce problème)

Exercice : alimentation d'une batterie / Panneau+diode+batterie (la fin de charge est détectée par l'opérateur.)





Batterie 12V, 50 Ah : source de tension i.e. **U = cte = 12V** même si le courant change.

1/Tracez la caractéristique de la batterie sur le graphe de Ipv(Vpv)

2/ Quel est le point de fonctionnement pour **G = 750 W/m²**? Ibatt = Ipv, Vbatt = U = Vpv.

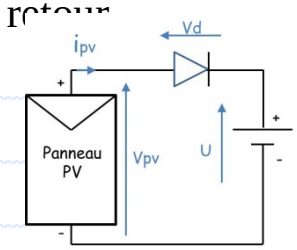
3/ En déduire la puissance fournie par le panneau.

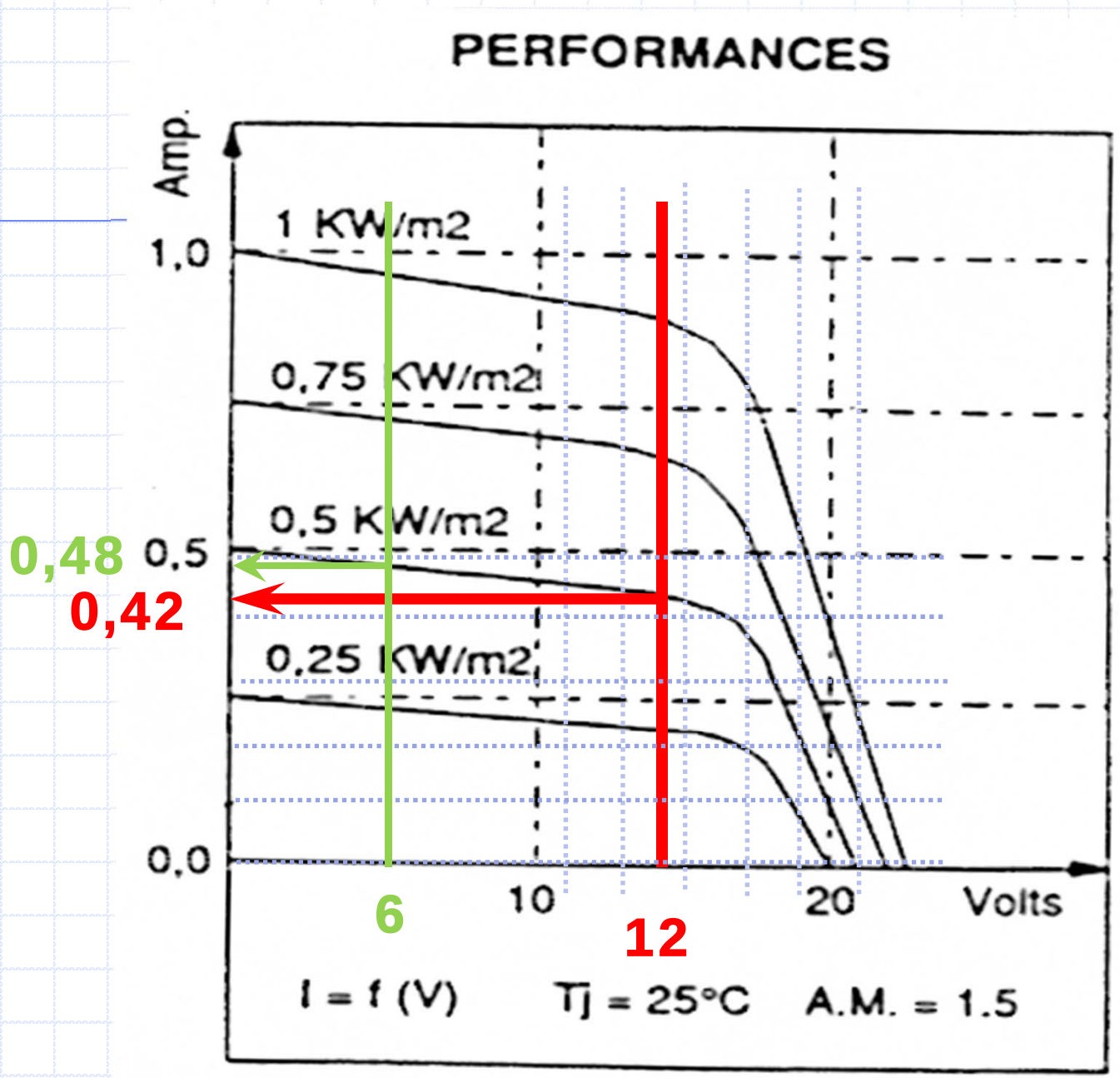
4/ Le soleil reste constant pendant **2h**, quelle sera l'énergie récupérée dans la batterie? (en Wh et en J)

5/ Combien de temps pour remettre 10% de l'énergie totale de cette batterie dans la batterie? (sur une batterie de voiture on peut prendre 10% max de l'énergie sans abîmer la batterie.)

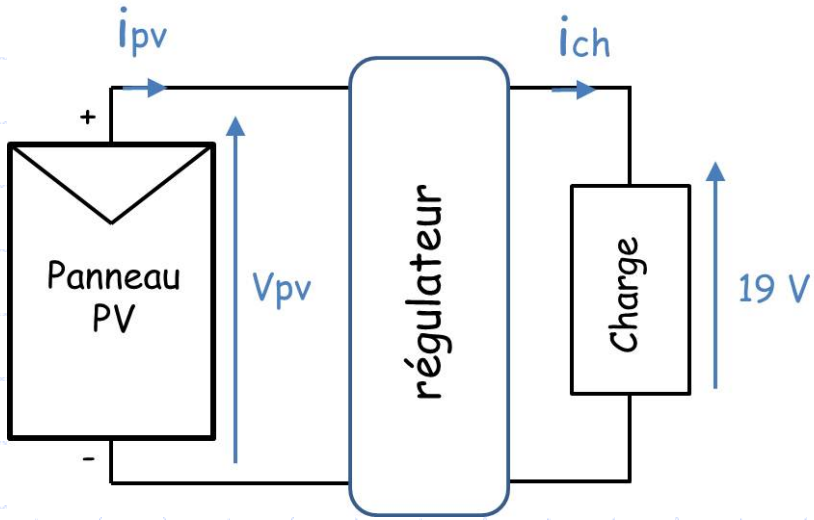
6/ Mêmes questions si on a pris une batterie de 6V?

Montage avec dio
de protection anti-
retour




PERFORMANCES
Amp.
1,0
0,5
0,0
1 KW/m2
0,75 KW/m2
0,5 KW/m2
0,25 KW/m2
0,48
0,42
6
12
10
20
Volts
I = f (V)
Tj = 25°C
A.M. = 1.5

Exercice : alimentation d'un ordi portable



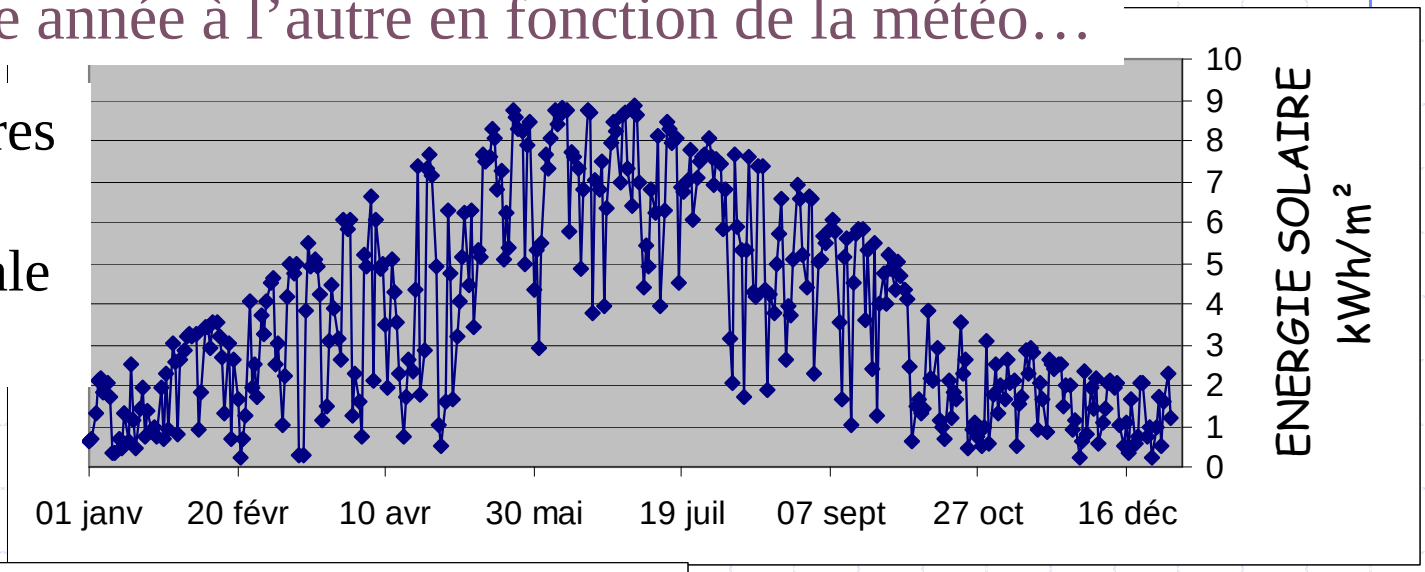
Consommation de l'ordinateur : 30W, tension d'alimentation 19Volts.
On intercale un régulateur qui fait travailler le panneau au point de puissance maximal et fournit 19V.
Le rendement de ce convertisseur est de 90%
On utilise un panneau Flexcell « sur mesure » dont le rendement photovoltaïque = 5%
Quel surface de panneau est nécessaire?
Avec G= 800 W/m²
Puis G = 400 W/m².

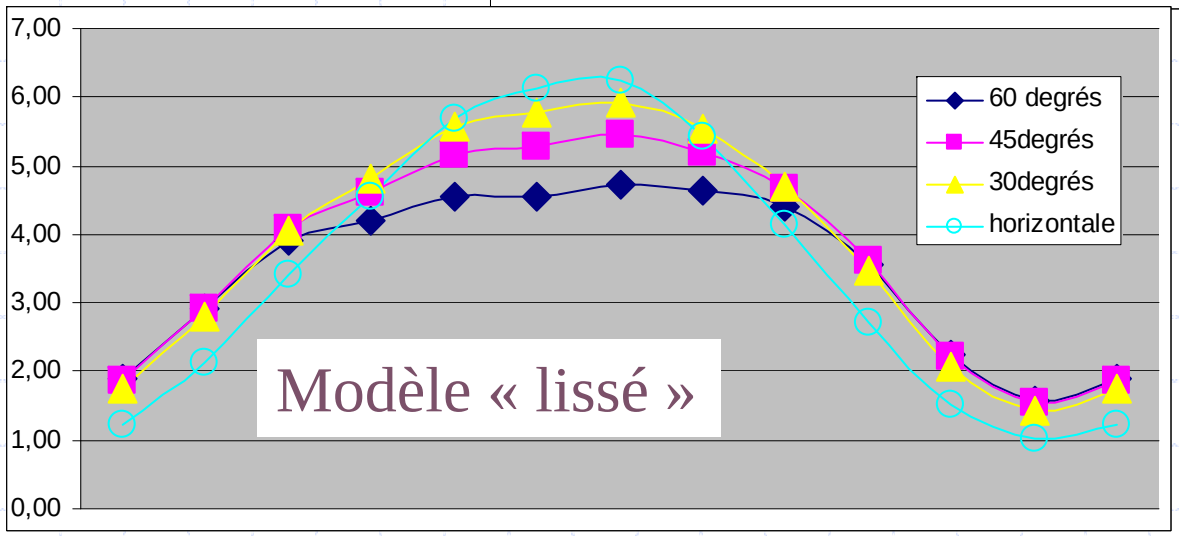
FIN.

5/ Une ressource variable. Pour un TD

…variable …
d'une année à l'autre en fonction de la météo…

Données journalières
(Millau 2005)
Surface Horizontale
Météo France





Données mensuelles
Energie journalière
(kWh/m²/j) (Toulouse)
sur une surface horizontale
Orientation Sud (de janvier à janvier)

Doc : Atlas solaire français