

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances
énergétiques d'un
système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST

IUT GEII NÎMES

DUT 2 - Alternance Le Solaire Photovoltaïque

Yaël Thiaux

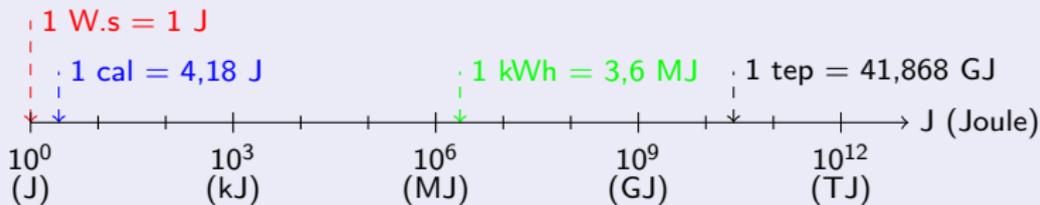
yael.thiaux@iut-nimes.fr

Septembre 2012

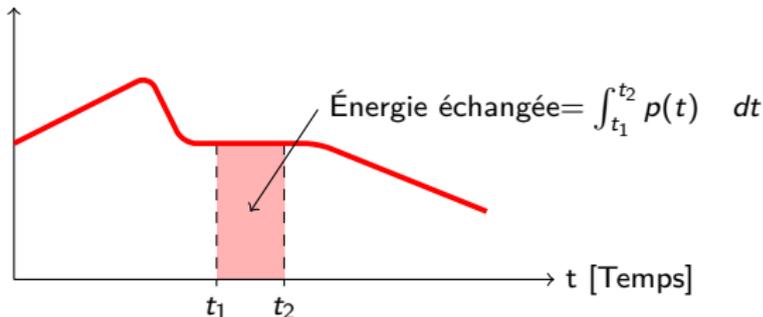


Rappels Puissance/Énergie

- Wikipédia : "L'énergie est une mesure de la capacité d'un système, à modifier un état, à produire un travail entraînant un mouvement [...] ou de la chaleur"
- Unité du système international : le Joule (J)
- Autres unités : W.s, kWh, tep (tonne équivalent pétrole), cal (calorie)...



$p(t)$ [Puissance instantanée]



Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un système PV autonome

Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de systèmes PV à l'aide du logiciel PVSYS

Rappels Puissance/Énergie

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST

- Wikipédia : "**La puissance** est la quantité d'énergie par unité de temps fournie par un système à un autre. **La puissance correspond donc à un débit d'énergie**" \simeq vitesse d'échange d'énergie
- Unité du système international : le **Watt (W)**
- Autres unités : ch (cheval vapeur)



Exercice :

On cherche à déterminer la puissance d'une pompe à essence lorsque l'on fait le plein de sa voiture. Le pouvoir calorifique inférieur d'un litre de gazole est de 38,08 MJ/l. On considère que le plein de 60 litres d'une voiture dure 5 minutes.

- 1 Déterminer la puissance du pistolet lorsque l'on fait le plein
- 2 Calculer le temps de recharge de la batterie de 7 kWh de la Renault Twizy (100 km d'autonomie) avec une prise de 10 A / 230 V.
- 3 Conclusion

Solution

DUT2-AIt Solaire PV

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST

1 Contexte énergétique

2 L'énergie PV

3 Marché du PV

4 Systèmes PV

5 Performances énergétiques d'un système PV

6 Travaux Pratiques

Ressources énergétiques

Ressources renouvelables

Par définition, une **ressource renouvelable** est une ressource dont le stock se reconstitue à la vitesse de sa consommation. Pour l'énergie solaire, on parle d'énergie renouvelable car c'est une énergie **inépuisable** à l'échelle des temps humains.

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

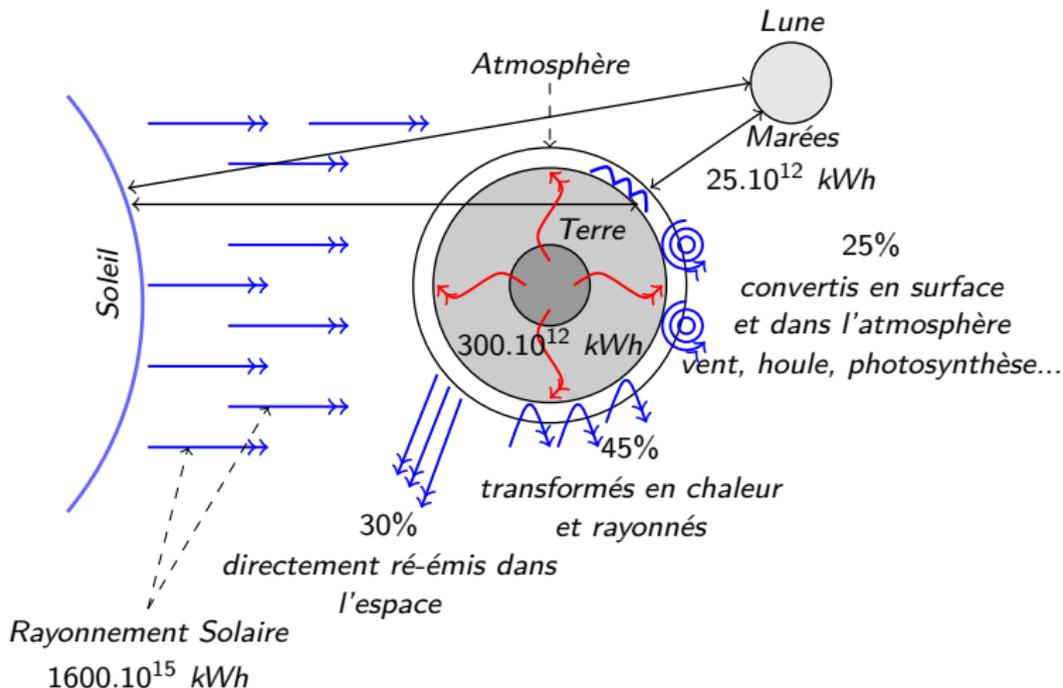
Dimensionnement d'un système PV autonome

Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de systèmes PV à l'aide du logiciel PVSYST



Ressources énergétiques

Ressources non renouvelables

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST

A l'inverse, une ressource **non renouvelable** est une ressource **épuisable**. Les énergies fossiles (pétrole, charbon, gaz) et fissiles (uranium) en font partie.

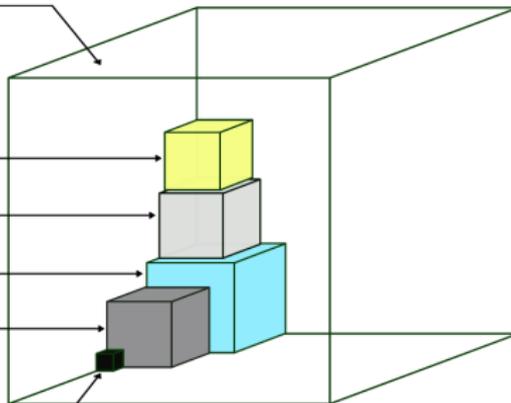
Ressources renouvelables annuelles

Ressources de pétrole

Ressources en gaz

Ressources en charbon

Ressources en uranium



Consommation mondiale annuelle

Ressource	Réserve prouvée / Production annuelle
Pétrole	40 ans
Gaz	57 ans
Charbon	220 ans
Uranium	70 ans

Rapport réserve prouvée / production annuelle des différentes ressources non renouvelables

Besoins énergétiques

Besoins mondiaux en énergie primaire

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un système PV autonome

Performances énergétiques d'un système PV

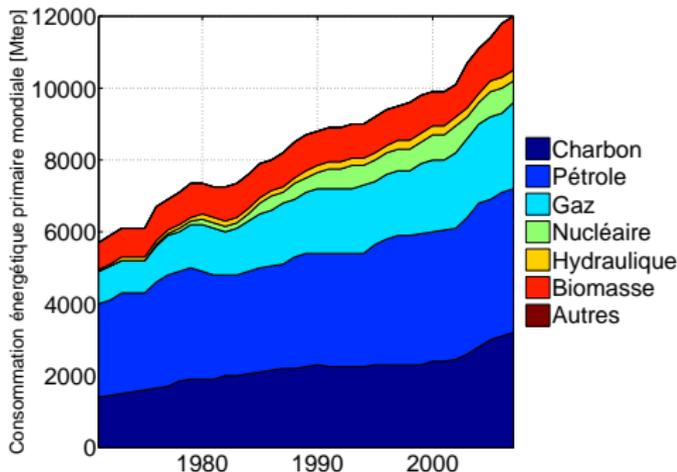
Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de systèmes PV à l'aide du logiciel PVSYST

- Énergie primaire \Leftrightarrow énergie issue d'une ressource naturelle ou brute (combustible fossile, matière fissile, rayonnement solaire)
- Énergie finale \Leftrightarrow forme commercialisée (électricité livrée à l'abonné, essence à la pompe...) ^a

a. Techniques de l'Ingénieur, D3900, "Consommation d'énergie, ressources énergétiques et place de l'électricité"



Evolution de la demande d'énergie primaire mondiale ($\times 2$ en 35 ans!) ¹

Besoins énergétiques

Besoins mondiaux en énergie primaire

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

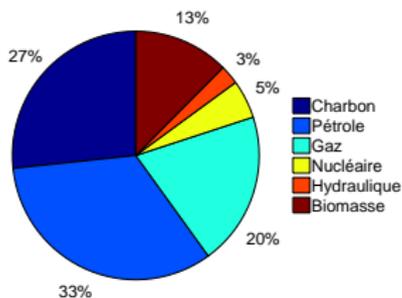
Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances énergétiques d'un système PV

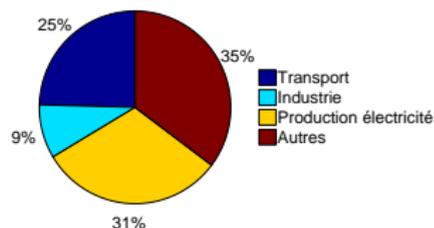
Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST



Mix de l'énergie primaire mondiale (2007)



Répartition par secteur de l'énergie primaire

- Mix à 85% d'origine fossile et fissile (donc non renouvelable!) ^a
- Environ 1/3 de l'énergie primaire mondiale est destinée à la production d'électricité...(η ?) ^b

a. Key World Energy Statistics, International Energy Agency, 2009

b. World Energy Outlook 2004, International Energy Agency, 2004

Besoins énergétiques

Besoins mondiaux en énergie électrique

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

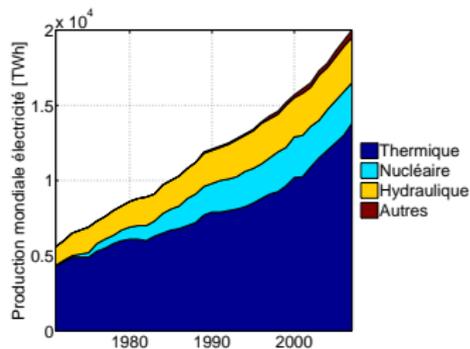
Dimensionnement d'un système PV autonome

Performances énergétiques d'un système PV

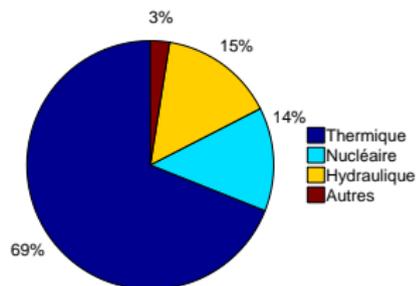
Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de systèmes PV à l'aide du logiciel PVSYST



Évolution de la production mondiale d'électricité



Répartition de la production mondiale d'électricité par source (2007)

- 20000 TWh d'électricité au niveau mondial en 2007
- Demande électrique mondiale : $\times 3$ en 35 ans !^a
- Mix à 85% d'origine fossile et fissile (donc non renouvelable !)
- $\sim 1\%$ de l'électricité mondiale est produite par des générateurs photovoltaïques ou éoliens...

a. Key World Energy Statistics, International Energy Agency, 2009

Besoins énergétiques

Répartition de la consommation française d'électricité par secteur

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

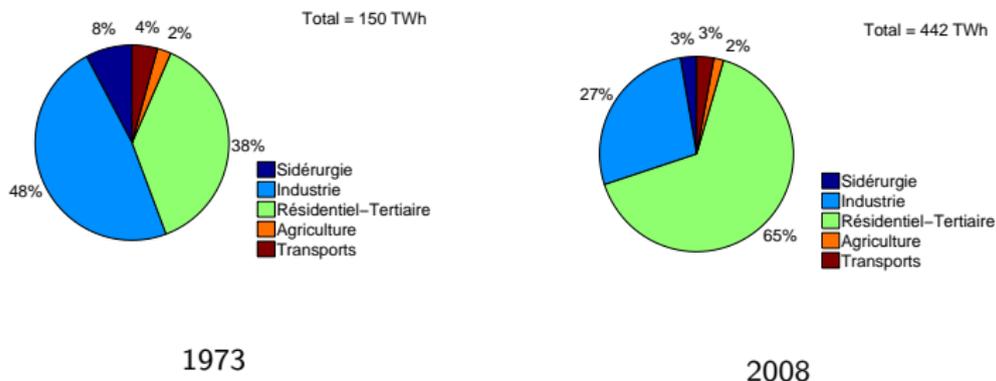
Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST



- Consommation électrique française actuelle : 500 TWh
- Consommation électrique française $\times 3$ en 35 ans^a
- Part du secteur résidentiel en constante augmentation : $\sim \times 2$ en 35 ans

a. <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr>

Contexte énergétique

Énergies renouvelables

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

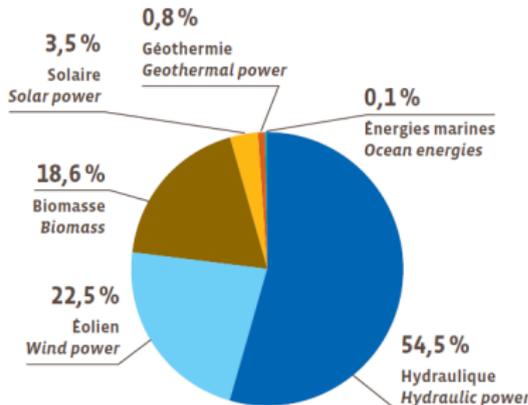
Dimensionnement d'un système PV autonome

Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de modules Photovoltaïques

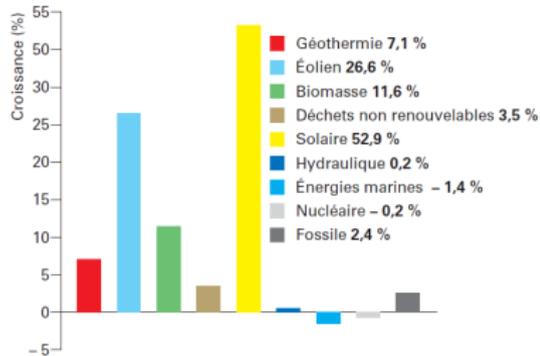
TP2 : Dimensionnement de systèmes PV à l'aide du logiciel PVSYST



2010

Total : 661,4 TWh

Part de chaque énergie dans la production d'électricité d'origine renouvelable en 2010



Taux de croissance annuel moyen (1998-2008) des différents moyens de productions d'électricité

- Production électrique d'origine renouvelable en Europe (664 TWh^2) est environ équivalente à la consommation électrique française (550 TWh)
- Croissance effrénée de l'énergie photovoltaïque en Europe (+50% en moyenne chaque année entre 1998 et 2008³)

2. État des énergies renouvelables en Europe - Édition 2011, 11^e Bilan EurObserv'ER

3. Multon and al., Techniques de l'ingénieur, D3900

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST

Exercice :

Les besoins énergétiques mondiaux en énergie primaire sont évalués à 12000 MTep^a. Les ressources renouvelables annuelles disponibles à la surface de la Terre sont elles évaluées à 1600.10^{15} kWh.

- 1 Convertir les besoins énergétiques mondiaux en kWh.
- 2 Déterminer le rapport entre besoins énergétiques mondiaux et ressources renouvelables.

a. 1 Tep = 42 GJ

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST

- Des ressources renouvelables largement suffisantes pour couvrir durablement nos besoins énergétiques :
 - Besoins mondiaux annuels en énergie primaire : 12000 *MTEp*
 - Rayonnement solaire annuel reçu : $1600 \cdot 10^{15}$ *kWh*
 - $11000 \times$ plus d'énergie renouvelable reçue que de besoins
- Des ressources non renouvelables surexploitées :
 - Pétrole : 40 ans de réserves prouvées⁴
 - Gaz : 57 ans de réserves prouvées
 - Charbon : 220 ans de réserves prouvées
 - Uranium 235 : 70 ans de réserves prouvées
- Des besoins énergétiques en constante augmentation
 - Énergie primaire et électricité $\times 3$ en 35 ans
 - +40% pour l'énergie primaire mondiale d'ici 2030 principalement pour couvrir les besoins électriques⁵

⇒ Il y a urgence à trouver un nouveau modèle énergétique !

4. Au rythme actuel de consommation !

5. World Energy Outlook 2009, Agence Internationale de l'Énergie

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances
énergétiques d'un
système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYSY

1 Contexte énergétique

2 L'énergie PV

- Matériaux semi-conducteurs
- Caractéristique électrique d'une cellule PV
- De la cellule au module
- Potentiel PV
- Exercice

3 Marché du PV

4 Systèmes PV

5 Performances énergétiques d'un système PV

6 Travaux Pratiques

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

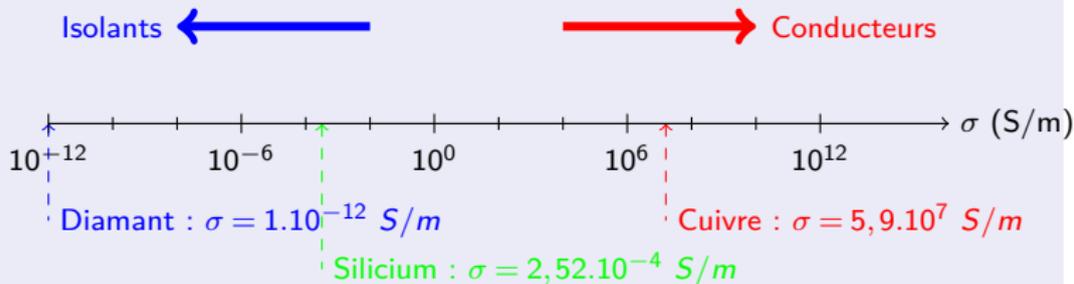
Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST

- La conductivité électrique (σ) d'un matériau semi-conducteur est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants
- Unité du système international : S/m avec S le Siemens ($1/\Omega$)
- Le silicium est le matériau semi-conducteur le plus utilisé



- Il est possible de jouer sur la conductivité d'un matériau semi-conducteur en le dopant (en ajoutant des impuretés dans le réseau cristallin)
 - **Excès d'électrons** : dopage de type **N**
 - **Déficit d'électrons** : dopage de type **P**

L'énergie Photovoltaïque

Dopage d'un semi-conducteur

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

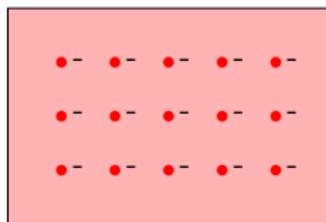
Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

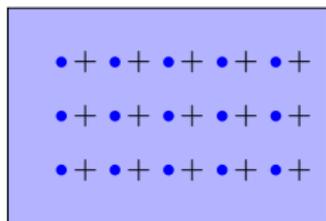
TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST



Dopage de type N

Silicium : $1,5 \cdot 10^{23}$ atomes / cm^3

Atomes dopants : $1,5 \cdot 10^{13}$ atomes / cm^3 !!!



Dopage de type P

 Structure cristalline Silicium

● Atome dopant de type N (Phosphore)

● Atome dopant de type P (Bore)

+ : Absence d'électron libre

- : Présence d'électron libre

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

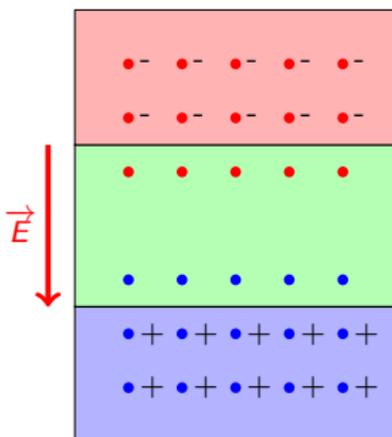
Performances

énergétiques d'un
système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST



Zone de charge d'espace créée par diffusion⁶

Création d'un champ électrique \vec{E}

 Structure cristalline Silicium

• Atome dopant de type N (Phosphore)

• Atome dopant de type P (Bore)

+ : Absence d'électron libre

- : Présence d'électron libre

L'énergie Photovoltaïque

Effet Photovoltaïque

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

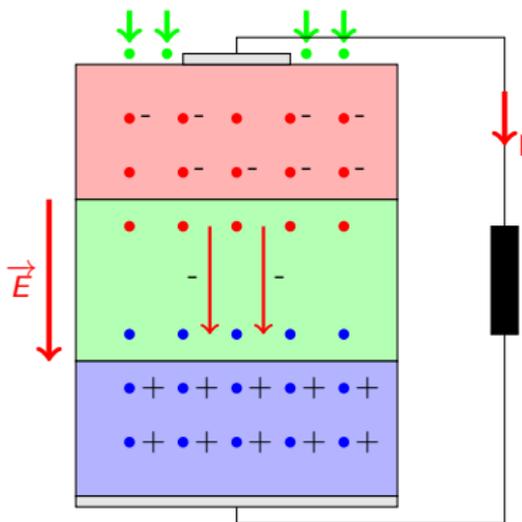
Dimensionnement d'un système PV autonome

Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de systèmes PV à l'aide du logiciel PVSYST



L'énergie apportée par les photons permet d'arracher des électrons
→ Création d'un courant!

□ Structure cristalline Silicium

- Atome dopant de type N (Phosphore)
- Atome dopant de type P (Bore)
- Photon

+ : Absence d'électron libre

- : Présence d'électron libre

Caractéristique électrique d'une jonction PN

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un système PV autonome

Performances énergétiques d'un système PV

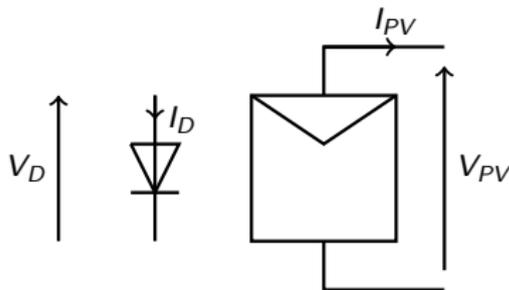
Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de modules Photovoltaïques

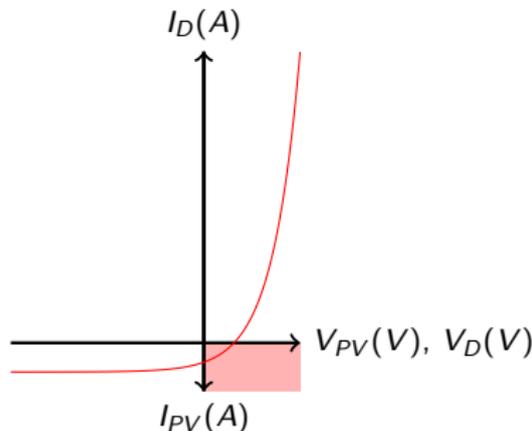
TP2 : Dimensionnement de systèmes PV à l'aide du logiciel PVSYST

Une cellule PV est réalisée en associant 2 matériaux semi-conducteurs dopés différemment (type N et type P). Un courant électrique est généré lorsque la cellule est soumise au rayonnement solaire.

→ La caractéristique électrique d'une cellule PV est donc celle d'une diode

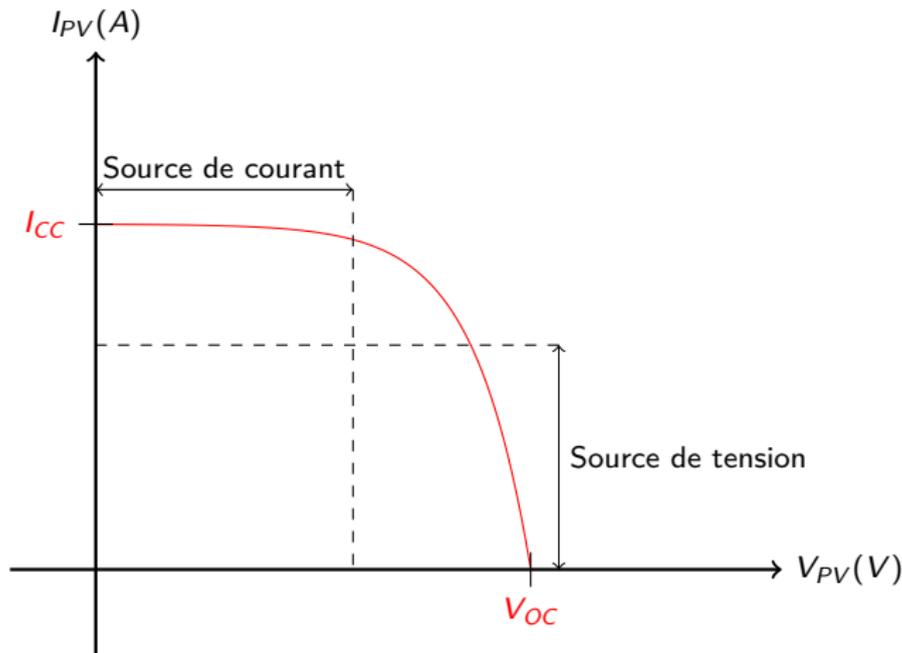


Cellule PV \Leftrightarrow Générateur de courant!



Caractéristique électrique d'une cellule PV

→ Représentation dans le quadrant générateur



- I_{CC} : Courant de court-circuit
- V_{OC} : Tension de circuit ouvert (open circuit)

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances
énergétiques d'un
système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST

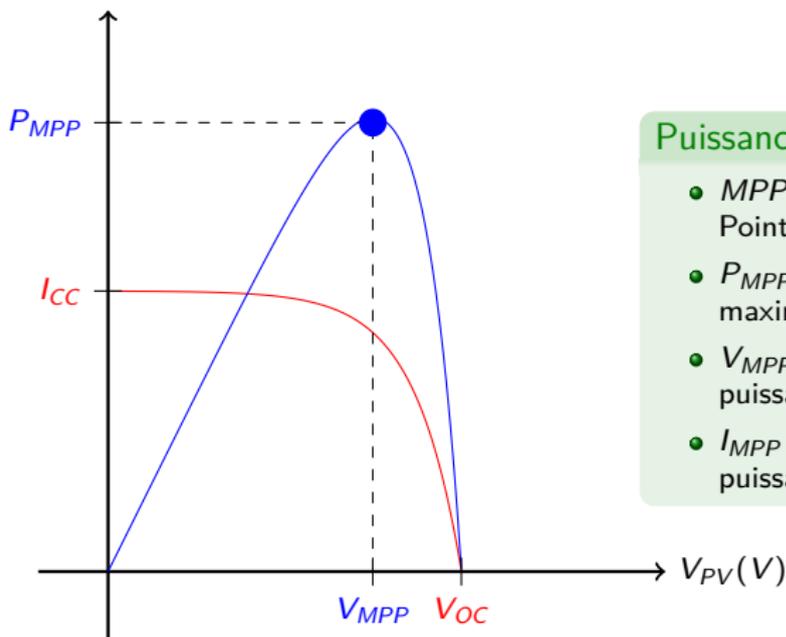
Caractéristique électrique d'une cellule PV

Puissance fournie par la cellule

Régime continu :

$$P_{PV} = I_{PV} \times V_{PV}$$

$I_{PV}(A)$, $P_{PV}(W)$



Puissance maximale

- MPP : Maximum Power Point
- P_{MPP} : Point de puissance maximale
- V_{MPP} : Tension à la puissance maximale
- I_{MPP} : Courant à la puissance maximale

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un système PV autonome

Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de systèmes PV à l'aide du logiciel PVSYST

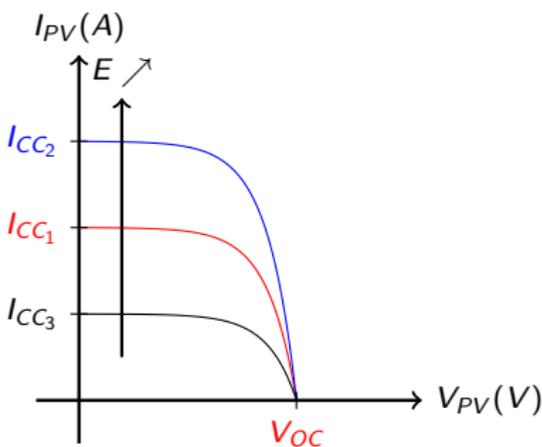
Caractéristique électrique d'une cellule PV

Impact des conditions météorologiques

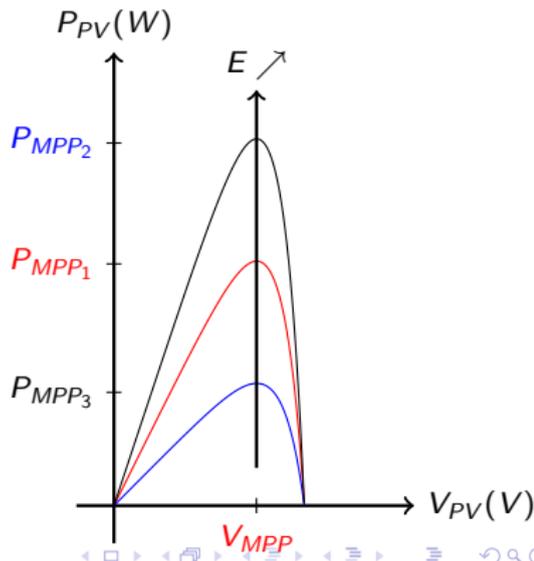
→ La caractéristique $I_{PV} = f(V_{PV})$ d'un générateur PV est donnée pour une ensoleillement E (W/m^2) et une température donnée T ($^{\circ}C$).

Le courant de court-circuit est directement proportionnel à l'ensoleillement ^a

a. On négligera l'impact de l'ensoleillement sur la tension de circuit ouvert



→ si $E \nearrow \Rightarrow P_{MPP} \nearrow$



Caractéristique électrique d'une cellule PV

Impact des conditions météorologiques

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances
énergétiques d'un
système PV

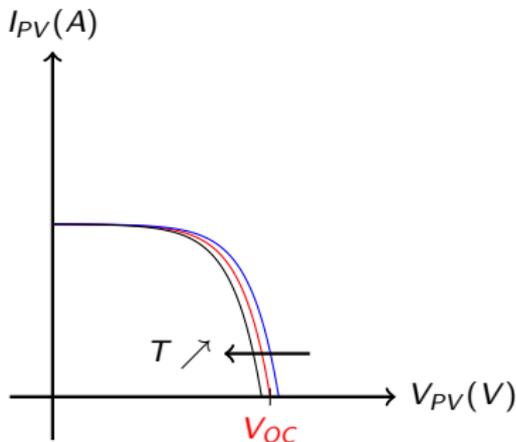
Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST

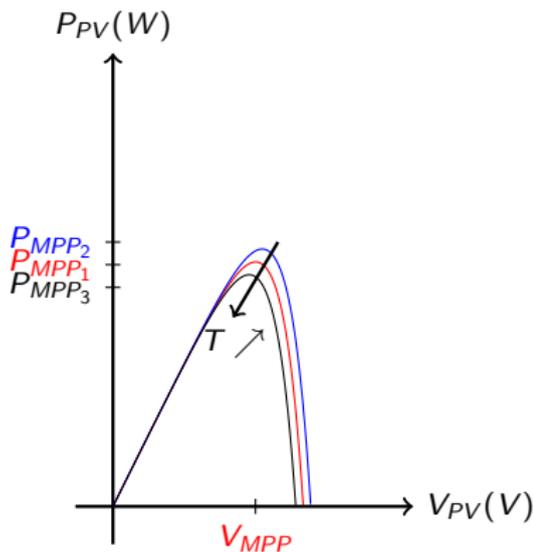
La tension de circuit ouvert est inversement proportionnelle à la température ^a

a. On négligera l'impact de la température sur le courant de court-circuit



→ si $T \nearrow \Rightarrow P_{MPP} \searrow$

Silicium cristallin : $P_{MPP} \Rightarrow -0,5\%/^{\circ}\text{C}$



Caractéristique électrique d'une cellule PV

Filière cristalline

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances
énergétiques d'un
système PV

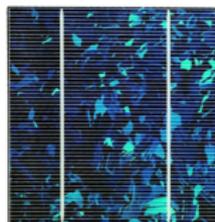
Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYSY

Plusieurs tailles standards existent pour les cellules de la filière cristalline :

- 101 mm × 101 mm : 4"
- 125,5 mm × 125,5 mm : 5"
- 155,5 mm × 155,5 mm : 6"



Silicium poly-cristallin

Caractéristique	Symbole	Valeur	Unité
Tension de circuit ouvert	V_{CO}	0,6	V
Courant de court-circuit	I_{CC}	3	A
Puissance max	P_{MPP}	1,3	W
Tension à puissance max	V_{MPP}	0,47	V
Courant à puissance max	I_{MPP}	2,7	A

Caractéristiques typiques d'une cellule 4" de silicium Poly-cristallin
(conditions météorologiques : 1000 W/m², 25°C)

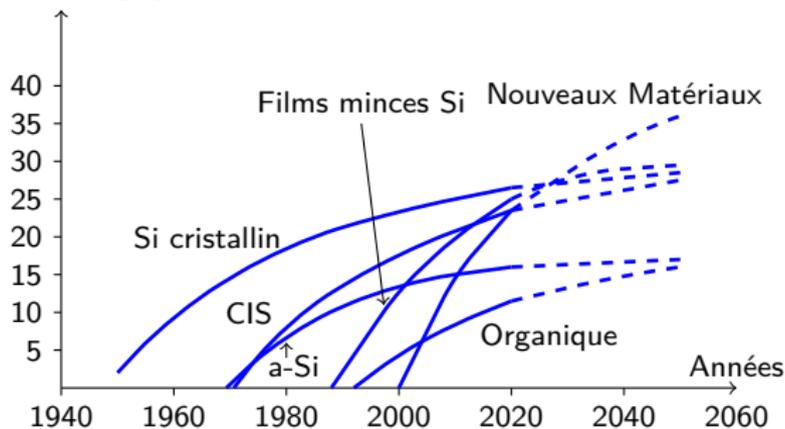
De la cellule au module

Technologies photovoltaïques

2 principales familles coexistent :

- Filière cristalline :
 - Silicium poly-cristallin (p-Si)
 - Silicium mono-cristallin (m-Si)
- Filière couche mince :
 - Silicium amorphe
 - Cuivre Indium Selenium (CIS)
 - Cadmium Tellurure (CdTe)

Rendement [%]



Évolution des rendements des principales familles PV ⁷

De la cellule au module

Filière cristalline

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances
énergétiques d'un
système PV

Travaux Pratiques

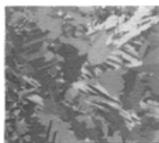
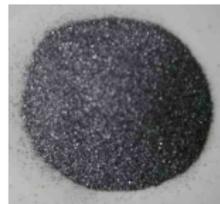
TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST

De la silice au silicium...

Le Silicium (Si) est l'élément le plus abondant
de la croûte terrestre (~ 25,7 % de la masse de
la croûte terrestre)

- Dioxyde de Silicium (SiO_2)
- Silice (sable, quartz...)



Silicium purifié

Lingot

Wafer

Cellule

Module

Systèmes

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST

Purification du silicium

- Du silicium métallurgique au silicium de qualité électronique ($\sim 99,9\%$ de pureté)
- Qualité obtenue par distillation



→ Obtention de lingots de dimension voulue (4", 5", 6 ")

De la cellule au module

Filière cristalline

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances
énergétiques d'un
système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

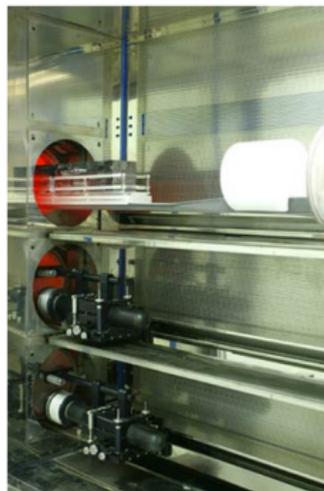
TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST

Dopage du silicium et découpe des "wafers"

- Le silicium de qualité électronique est alors découpé en tranches ("wafers")
- Puis dopé par diffusion



Découpe des lingots en "wafers"



Dopage par diffusion des dopants dans un four ($\sim 800\text{ }^{\circ}\text{C}$)

→ L'épaisseur des wafers est à l'heure actuelle autour de $300\text{ }\mu\text{m}$

→ Les wafers dopés sont par la suite métallisés et encapsulés

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

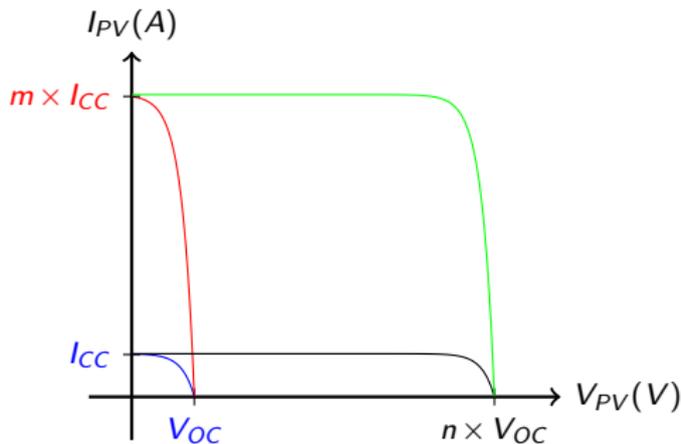
Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYS

→ De façon à augmenter le niveau de puissance, les cellules sont assemblées en série et en parallèle



— 1 cellule

— m cellules en parallèle

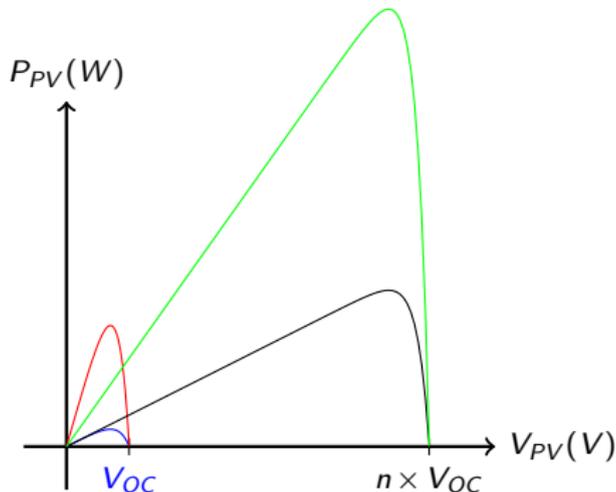
— n cellules en série (1 branche)

— m branches de n cellules en série

De la cellule au module

Module photovoltaïque cristallin

→ De façon à augmenter le niveau de puissance, les cellules sont assemblées en série et en parallèle



— 1 cellule, P_{MPP_1}

— m cellules en parallèle, $m \times P_{MPP_1}$

— n cellules en série (1 branche), $n \times P_{MPP_1}$

— m branches de n cellules en série, $m \times n \times P_{MPP_1}$

De la cellule au module

Facteur de Forme

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

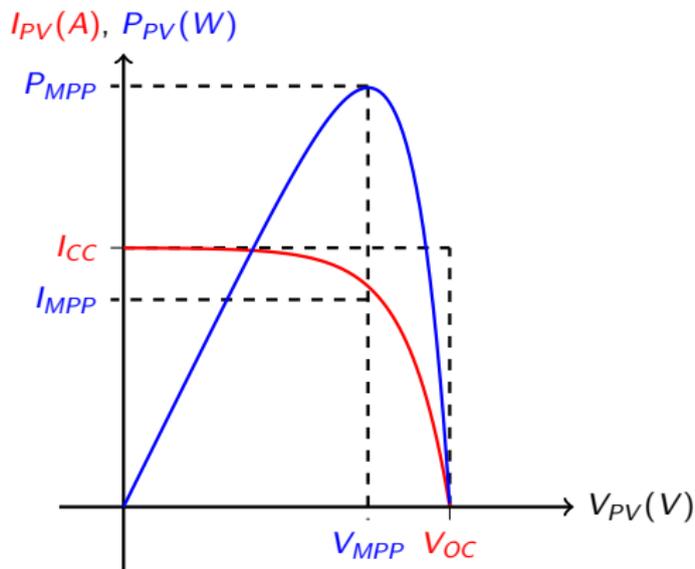
Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances
énergétiques d'un
système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST



Calcul du facteur de forme

$$FF = \frac{V_{MPP} \times I_{MPP}}{V_{OC} \times I_{CC}}$$

→ Renseigne sur la qualité de conception du module PV

De la cellule au module

Du module au système...

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST

→ Pour finir, les modules PV sont eux-mêmes associés en série et/ou parallèle de façon à obtenir un champ PV de la puissance désirée



De la cellule au module

Filière couche mince

Les matériaux sont déposés par voie plasma sur différents substrats :

- Verre
- Céramique
- Plastique

→ Grande variété possible de formes



Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances
énergétiques d'un
système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances
énergétiques d'un
système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST

Ex : Q-Cells Q.PEAK 245-265⁸

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES			SCHEMA TECHNIQUE				
Format	1670 mm x 1000 mm x 50 mm (avec cadre)						
Poids	20 kg						
Face avant	Verre solaire précontraint à durcissement thermique de 3,2 mm						
Face arrière	Film composite						
Cadre	Aluminium anodisé						
Cellules	6 x 10 cellules photovoltaïques monocristallines						
Boîte de jonction	116 mm x 153 mm x 20 mm Indice de protection IP 67, avec diodes de dérivation						
Câble	Câble solaire 4 mm ² ; (+) 1100 mm, (-) 1100 mm						
Connecteur	Yamaichi Y-SOL4 (combinable avec MC4), IP 68						
Points de mise à la terre	ø 4,5 mm						
CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES							
CARACTÉRISTIQUES NOMINALES EN CONDITIONS DE TEST STANDARD (STC: 1000 W/m ² , 25 °C, SPECTRE 1,5 AM)							
CLASSE DE PUISSANCE			245	250	255	260	265
Puissance nominale (+5/-0 Wp)	P_{MPV}	[W]	245	250	255	260	265
Courant de court-circuit	I_{SC}	[A]	8,99	9,04	9,09	9,15	9,20
Tension à vide	U_{OC}	[V]	36,55	36,96	37,35	37,73	38,11
Courant en puissance max.	I_{MPV}	[A]	8,29	8,37	8,46	8,54	8,62
Tension en puissance max.	U_{MPV}	[V]	29,55	29,86	30,16	30,45	30,74
Efficacité moyenne	η	[%]	≥ 14,7	≥ 15,0	≥ 15,3	≥ 15,6	≥ 15,9

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances
énergétiques d'un
système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYS

Ex : Sharp ND 195-R1S⁹

CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES (STC)

		ND-195R1S	ND-190R1S	ND-185R1S	ND-180R1S	
Puissance maximale	P_{max}	195	190	185	180	W_C
Tension à vide	V_{oc}	29,7	29,6	29,5	29,4	V
Courant de court-circuit	I_{sc}	8,68	8,56	8,44	8,32	A
Tension au point de puissance maximale	V_{mpp}	23,6	23,5	23,4	23,3	V
Courant au point de puissance maximale	I_{mpp}	8,27	8,09	7,91	7,73	A
Rendement du module	η_m	14,9	14,5	14,1	13,7	%

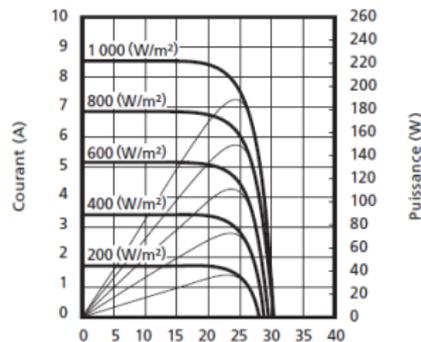
STC = Conditions de test standardisées : rayonnement solaire de 1 000 W/m^2 , masse atmosphérique de 1,5 et température des cellules de 25 °C.

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES

Longueur	1 318 mm (+/-3,0 mm)
Largeur	994 mm (+/-2,0 mm)
Hauteur	46 mm (+/-0,8 mm)
Poids	15,5 kg

COEFFICIENT DE TEMPÉRATURE

P_{max}	-0,440 % / °C
V_{oc}	-0,329 % / °C
I_{sc}	+0,038 % / °C



De la cellule au module

Module PV couche mince CIS

Ex : Q-Cells Q.SMART 80-95¹⁰

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances
énergétiques d'un
système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

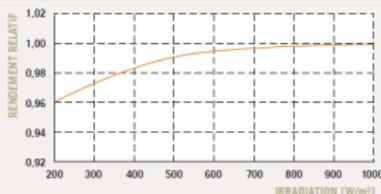
TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST

CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES

CARACTÉRISTIQUES NOMINALES EN CONDITIONS DE TEST STANDARD (STC: 1000 W/m², 25 °C, SPECTRE 1,5 AM)

CLASSE DE PUISSANCE			80	85	90	95
Rendement	η [%]		10,5	11,2	11,8	12,5
Puissance nominale (+5/-0 Wp)	P_{max} [W]		80,0	85,0	90,0	95,0
Courant de court-circuit	I_{sc} [A]		1,66	1,67	1,67	1,68
Tension à vide	U_{oc} [V]		74,5	75,2	76,5	78,0
Courant en puissance max.	I_{mp} [A]		1,42	1,44	1,48	1,53
Tension en puissance max.	U_{mp} [V]		56,4	59,0	60,8	62,1

COMPORTEMENT EN CAS DE FAIBLE IRRADIATION

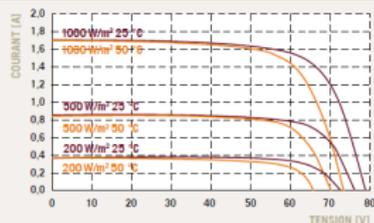


La variation de rendement typique du module pour un ensoleillement de 200 W/m² en comparaison à 1000 W/m² est inférieure à 4% relatif (valeur mesurée à une température de 25 °C et sur un spectre AM 1,5)

COEFFICIENTS DE TEMPÉRATURE (1000 W/m², SPECTRE 1,5 AM)

Coefficient de température I_{sc}	α	[%/K]	+0,00 ± 0,04	Coefficient de température U_{oc}	β	[%/K]	-0,29 ± 0,04
Coefficient de température P_{max}	γ	[%/K]	-0,38 ± 0,04				

CARACTÉRISTIQUES EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE ET DE L'IRRADIATION



De la cellule au module

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances
énergétiques d'un
système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST

Exercice :

Des mesures électriques (courant / tension) d'un panneau photovoltaïque ont été réalisées sous une irradiance de 750 W/m^2 . Les différentes mesures sont regroupées ci-dessous :

Courant (A)	Tension (V)
1,1	0
1,1	4,4
1,05	52,7
1	88,7
0,9	103,8
0,75	114,1
0,6	119,3
0,46	123,4
0,3	127

Le panneau photovoltaïque fait $1414 \text{ mm} \times 1114 \text{ mm}$.

- 1 Tracer la caractéristique courant/tension et puissance/tension sur les documents réponses. Y faire figurer les points caractéristiques.
- 2 Quelle est la valeur de la tension de circuit à vide? du courant de court-circuit?
- 3 Combien vaut la puissance maximale?
- 4 Combien vaut le facteur de forme?
- 5 Combien vaut le rendement du module?
- 6 En déduire la technologie du panneau.

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

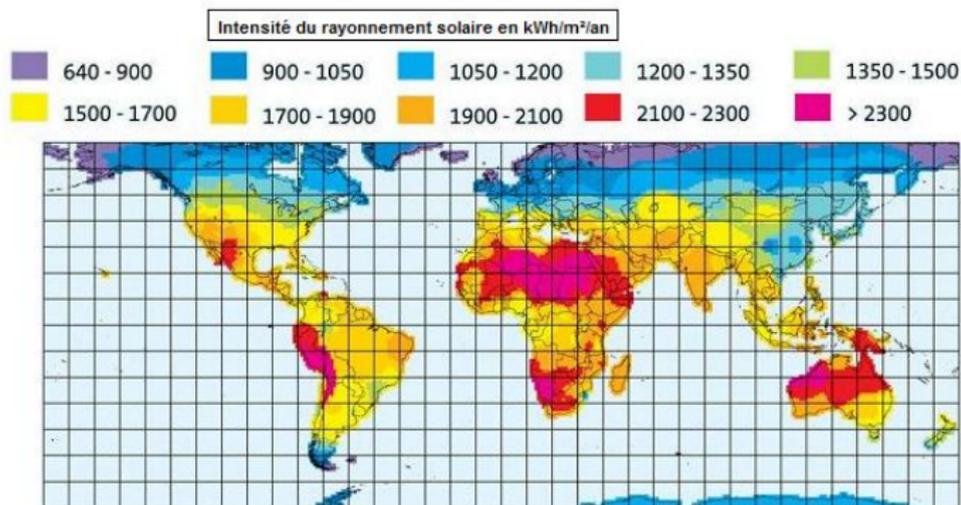
Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST

→ Carte européenne de l'irradiation moyenne annuelle ($kWh/(m^2.an)$)¹¹ :



11. <http://www.photovoltaique.guidenr.fr/>

Potentiel Photovoltaïque

Gisement solaire

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances
énergétiques d'un
système PV

Travaux Pratiques

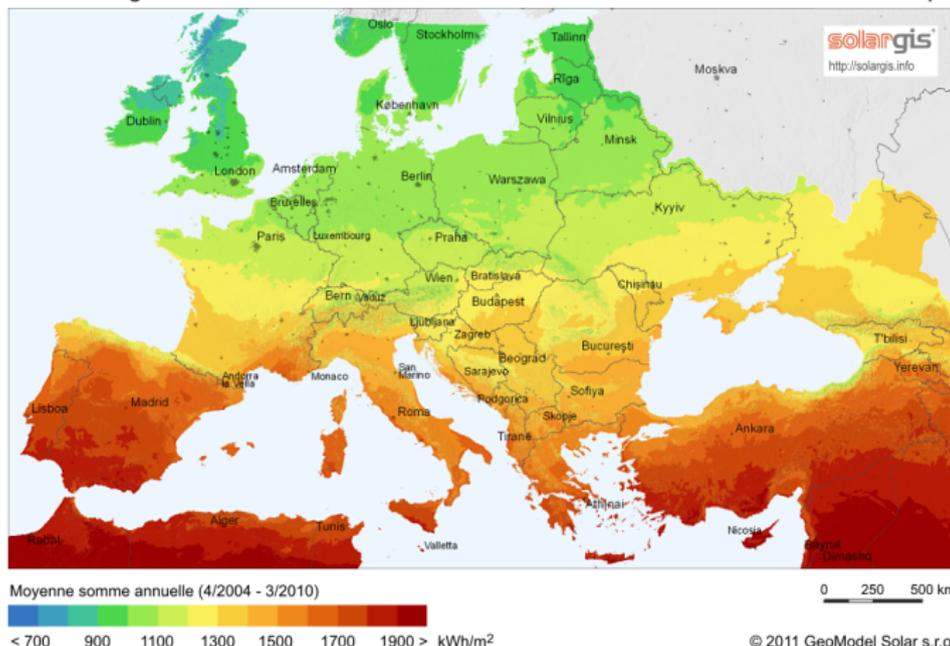
TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST

→ Carte européenne de l'irradiation moyenne annuelle ($kWh/(m^2.an)$)¹² :

Irradiation globale horizontale

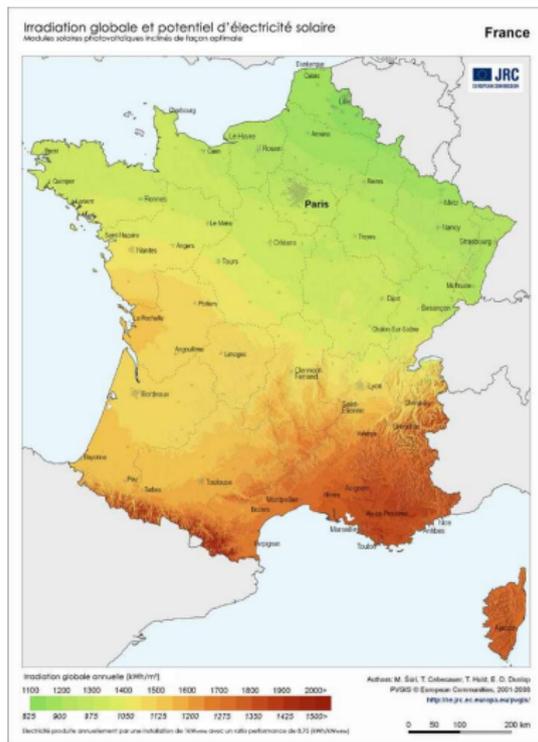
L'Europe



Potentiel Photovoltaïque

Gisement solaire

→ Carte française de l'irradiation moyenne annuelle ($kWh/(m^2.an)$)¹³ :

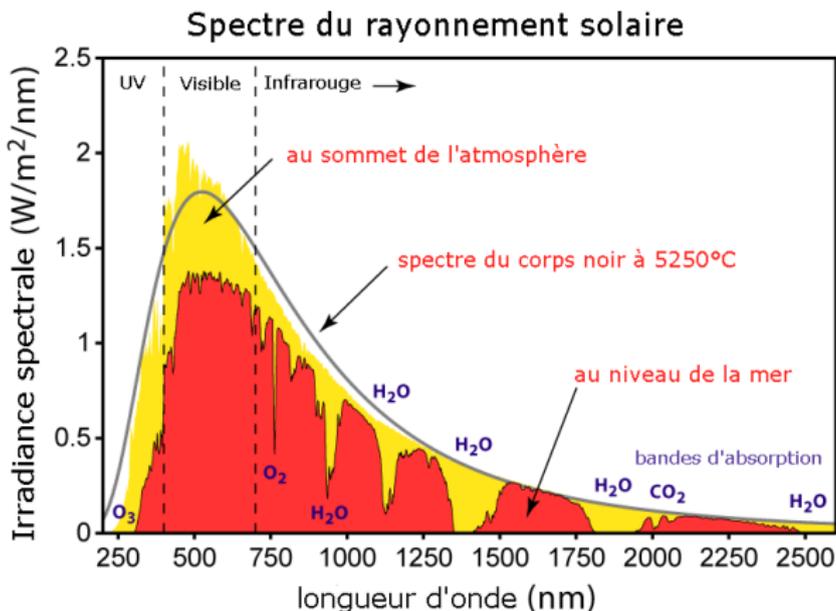


13. <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>

Potentiel Photovoltaïque

Le rayonnement solaire

→ Spectre du rayonnement solaire¹⁴ :



→ Le Soleil est équivalent à un corps noir rayonnant à une température de 5800 K

Potentiel Photovoltaïque

Conditions standard de test (STC)

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances
énergétiques d'un
système PV

Travaux Pratiques

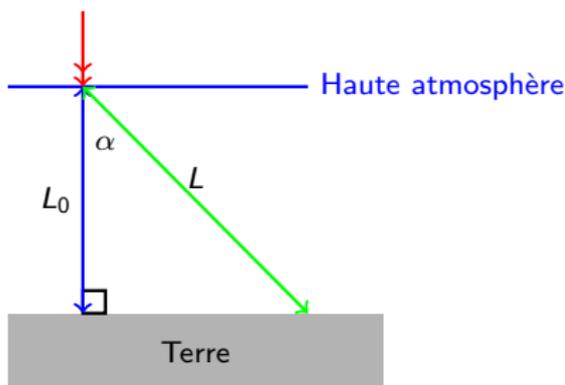
TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST

Les caractéristiques électriques des modules photovoltaïques dépendant des conditions météorologiques, des conditions standard de test ont été définies de façon à harmoniser les documentations techniques :

- 1 Ensoleillement : $E = 1000 \text{ W/m}^2$
- 2 Température du module : $T = 25 \text{ °C}$
- 3 Air Mass : $AM 1.5$

Rayonnement Solaire



- $\alpha = 0 \text{ °} \rightarrow AM = 1$:
Rayonnement solaire
vertical
- $\alpha \sim 48 \text{ °} \rightarrow AM = 1,5$:
Rayonnement STC

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYSY

Exercice :

L'ensoleillement moyen reçu à la surface de la Terre s'élève à 1000 kWh/m^2 chaque année. Le rendement d'un panneau photovoltaïque soumis à un test en condition standard est mesuré à une valeur de 12%. Les besoins mondiaux en électricité sont estimés à $20\,000 \text{ TWh/an}$.

- 1 Quelle est l'énergie annuelle produite par un m^2 de ce type de panneau ? Vous donnerez le résultat en kWh , puis en J .
- 2 En déduire la surface totale de ce type de panneau nécessaire pour subvenir totalement aux besoins mondiaux en électricité. Vous donnerez la réponse en m^2 puis en km^2 .
- 3 Si cette surface de panneaux PV était centralisée dans une même zone géographique de forme carrée, quelle serait la longueur du côté de ce carré ? De la même façon, vous donnerez le résultat en m et en km .
- 4 Serait-il intéressant de centraliser la production mondiale d'électricité ?

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST

Solution :

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST

1 Contexte énergétique

2 L'énergie PV

3 **Marché du PV**

- Puissance PV installée
- Compétitivité du PV
- Production de cellules

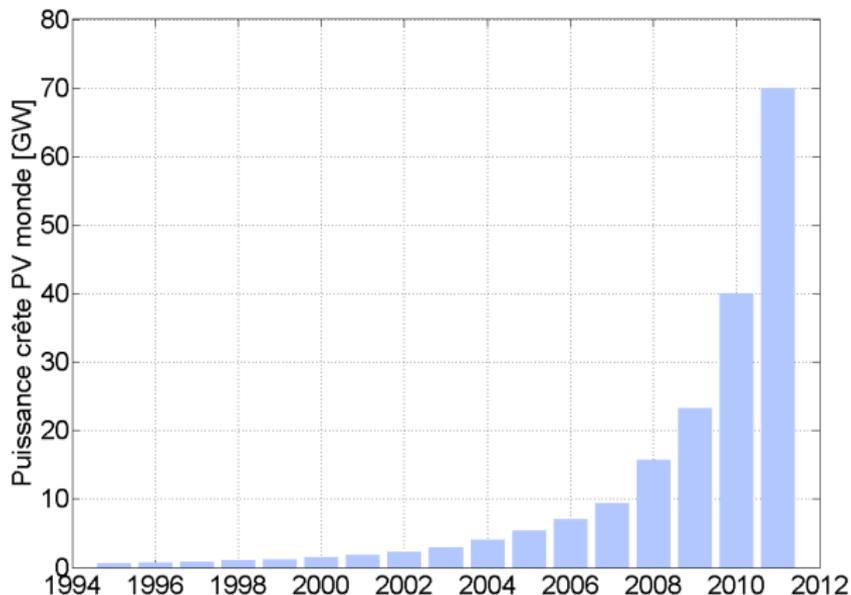
4 Systèmes PV

5 Performances énergétiques d'un système PV

6 Travaux Pratiques

Puissance photovoltaïque installée

Croissance de la puissance PV installée au niveau mondial



- +74 % de croissance en 2011
- 30 GWc installés dans le monde en 2011
- 70 GWc de puissance PV cumulée au niveau mondial fin 2011

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances
énergétiques d'un
système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST

Puissance photovoltaïque installée

Croissance de la puissance PV installée en France

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

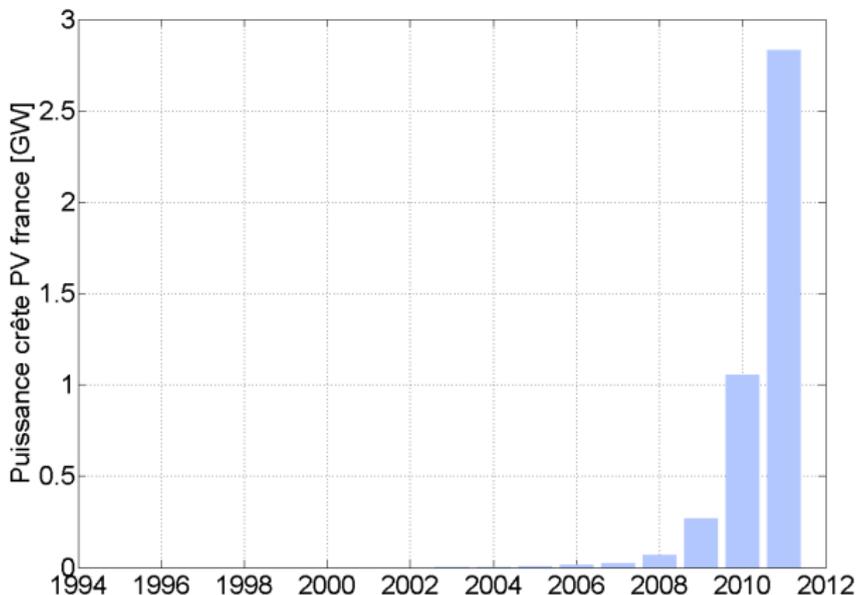
Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST



- +170 % de croissance en 2011
- 1,6 GWc installés en France en 2011
- ~ 3 GWc de puissance PV cumulée en France fin 2011

Puissance photovoltaïque installée

Europe - Fin 2010 (~ 30 Gwc cumulés)

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

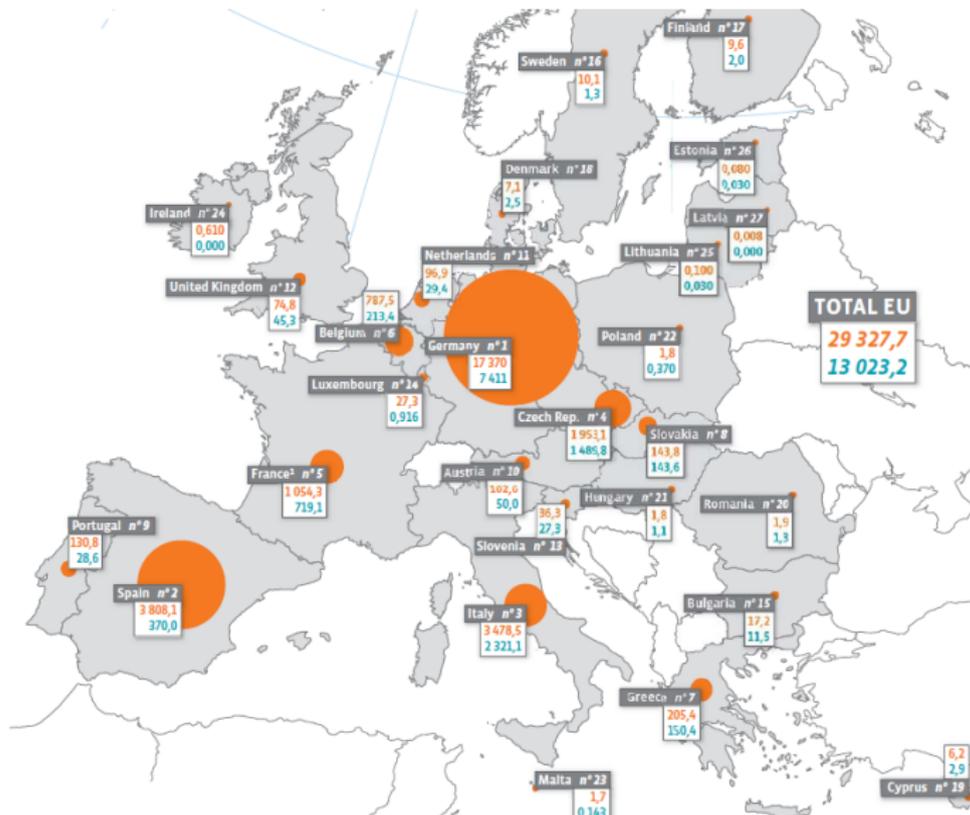
Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances
énergétiques d'un
système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST



Puissance photovoltaïque installée

Europe - Fin 2011 (~ 50 Gwc cumulés)

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

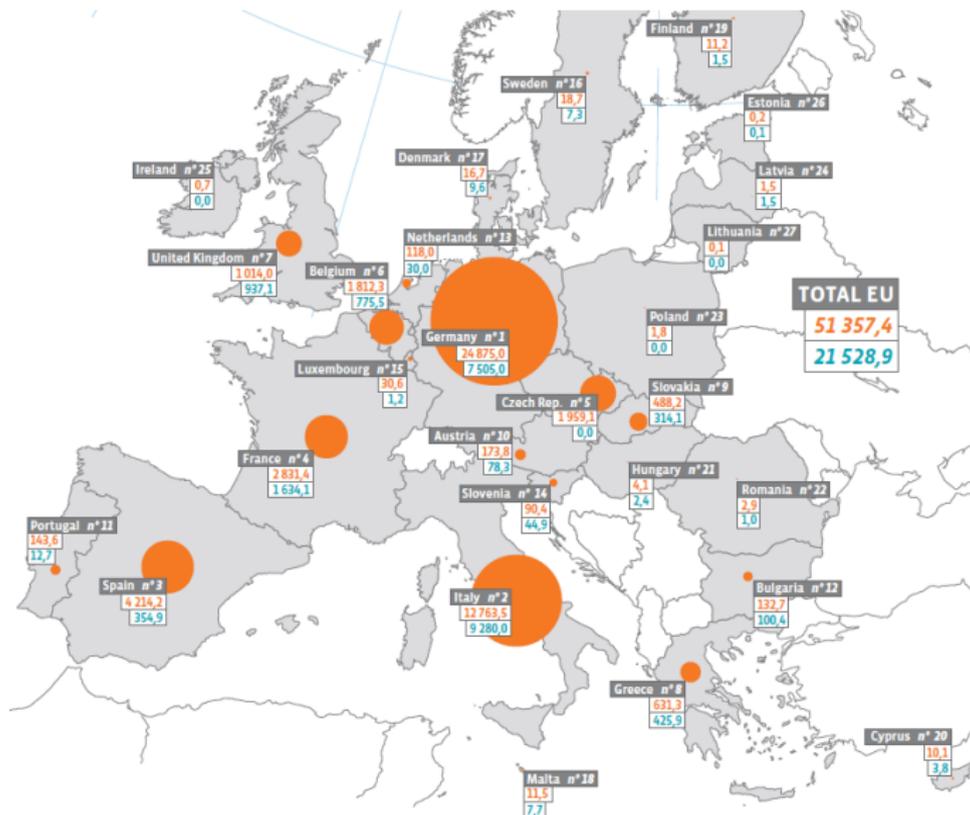
Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances
énergétiques d'un
système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYS



Baromètre PV - Eurobserv'er Avril 2012

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

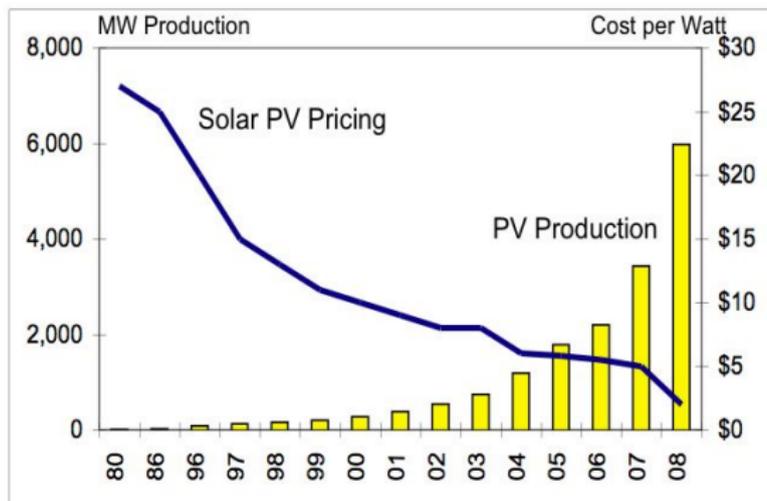
Performances
énergétiques d'un
système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST

Solar PV Global Production and Cost per Watt



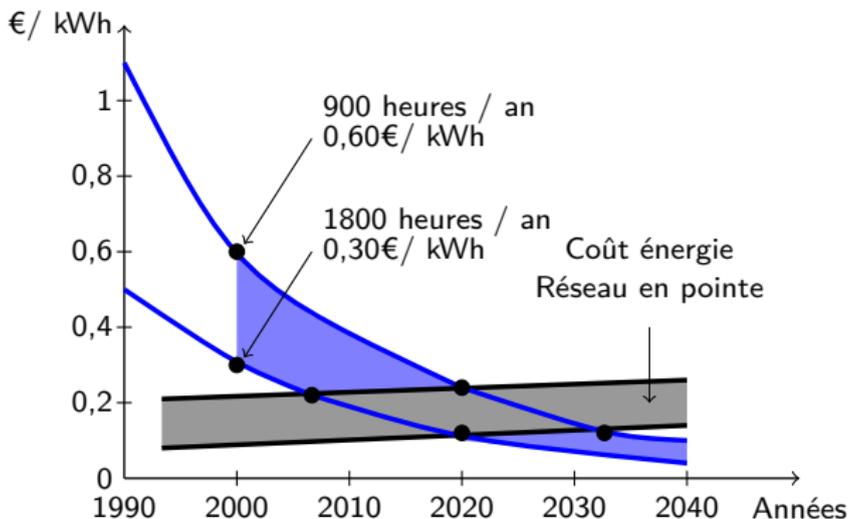
Source Solar Buzz, Company reports, Green Econometrics research

Évolution du prix des modules PV¹⁵

- Baisse vertigineuse du coût des modules PV
 - ~ 25 \$ / W_c au début des années 80
 - ~ 1 à 2 \$ / W_c à l'heure actuelle

Compétitivité du PV

Évolution du coût du kWh d'électricité produit



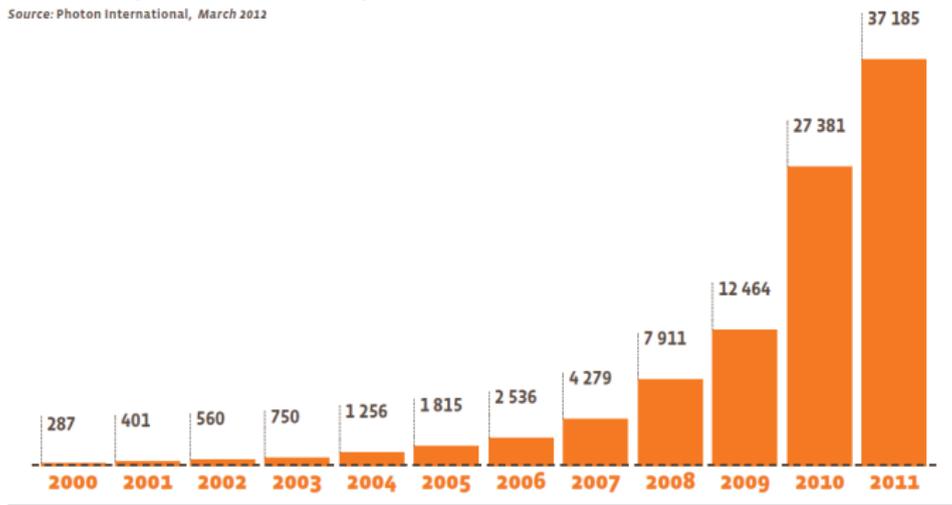
- Les coûts de production des cellules PV vont décroître avec l'augmentation des volumes de production
- En raison du mix énergétique, le coût du kWh en pointe va continuellement augmenter (combustible, démarrage de centrale...)
- PV compétitif avec le réseau en pointe à partir de 2020

Production de cellules

Évolution mondiale de la production annuelle de cellules PV¹⁶

Évolution de la production de cellules de 2000 à 2011 dans le monde (en MWP)
Global solar cell production 2000 to 2011 (MWp)

Source: Photon international, March 2012



Évolution de la production mondiale de cellule PV

La production a été multipliée par 3 en 2 ans !

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances
énergétiques d'un
système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

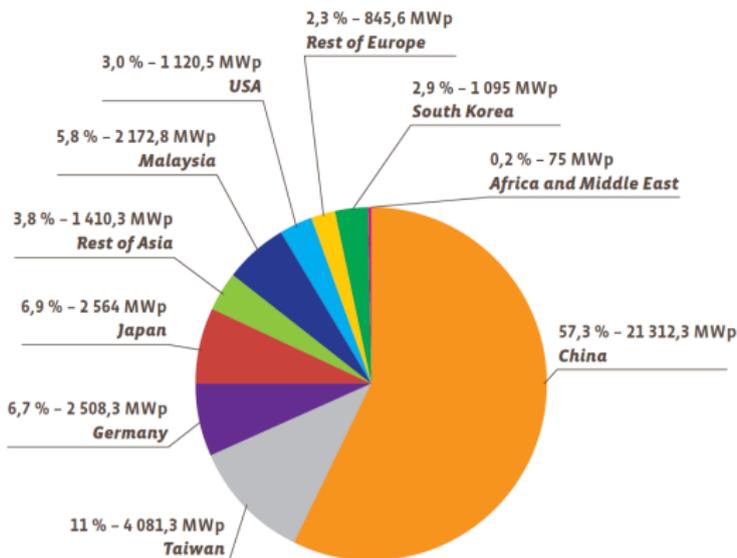
TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST

Production de cellules

Répartition mondiale de la production de cellules PV¹⁷

Répartition géographique de la production de cellules photovoltaïques en 2011
Geographic distribution of PV cell production in 2011

Source: Photon International, March 2012



Répartition mondiale de la production de cellule PV

- Production à ~ 85% d'origine asiatique (dont Chine 57%)
- Production à ~ 9% d'origine européenne (dont Allemagne 6,7%)

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST

Rang	Fabricant	Pays	Production 2011
1	Suntech Power	Chine	2220 MW
2	First Solar	USA	1981 MW
3	JA Solar	Chine	1690 MW
...	...	Chine	...
...	...	Chine	...
...
?	Photowatt	France	70 MW ¹⁸

- Photowatt a déposé le bilan courant 2012, l'entreprise a été reprise par EDF Energie Nouvelle en Février 2012
- Le fabricant Allemand Q-Cells, un des plus gros fabricants mondiaux a aussi déposé le bilan courant 2012

18. De capacité installée !

19. Baromètre Photovoltaïque, Eurobserv'er, Avril 2012

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST

1 Contexte énergétique

2 L'énergie PV

3 Marché du PV

4 Systèmes PV

• Composants d'un système PV

- Système de stockage
- Convertisseurs

• Architectures envisageables

• Dimensionnement d'un système PV autonome

5 Performances énergétiques d'un système PV

6 Travaux Pratiques

Système de stockage

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances énergétiques d'un système PV

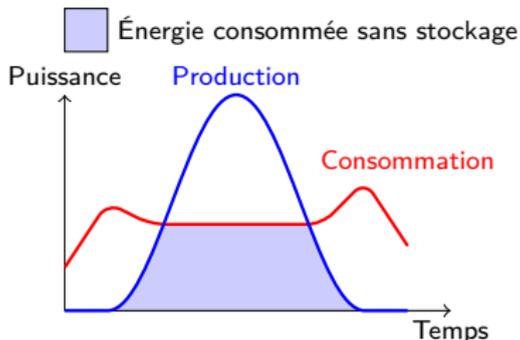
Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST

Le stockage de d'énergie est impératif lorsque production et consommation ne sont pas simultanées :

- Production photovoltaïque intermittente
 - Absence de production la nuit
 - Pic de production au zénith
- Pic de consommation résidentielle en soirée



Phase d'autoconsommation possible en surproduction sans système de stockage

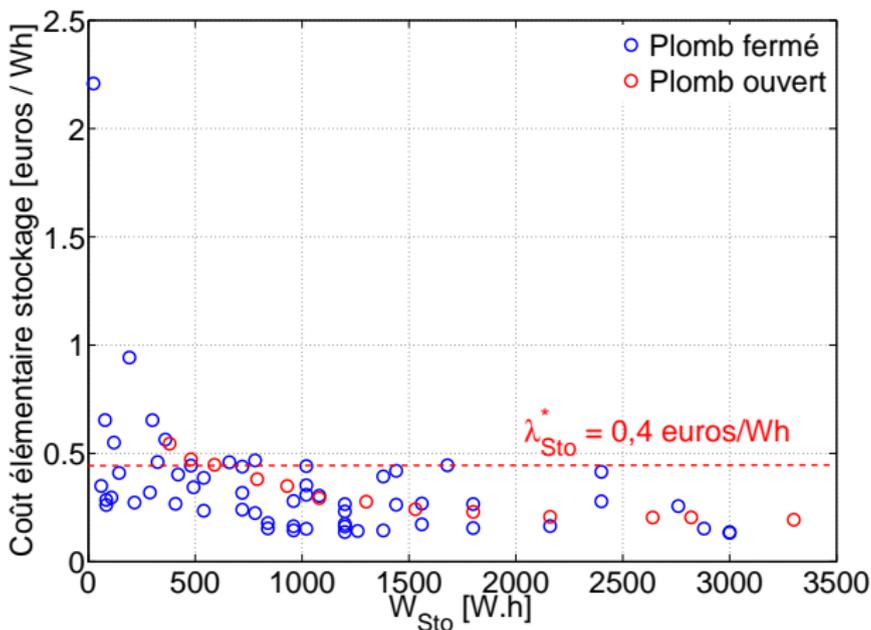
→ Prépondérance des systèmes de **stockage électrochimique** (technologie Plomb Acide et de plus en plus **Lithium Ion**)

Stockage électrochimique

Coût économique

Bien entendu, ces systèmes de stockage ont un coût.

Exemple pour la technologie Plomb-Acide :



→ Un coût de 0,5 €/Wh est une bonne estimation

Comparaison des systèmes de stockage électrochimique Plomb-Acide et Li-ion

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

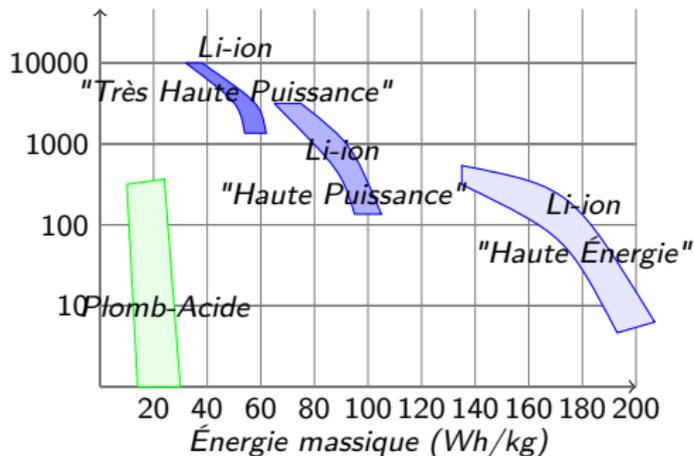
TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST

Caractéristique	Lithium-Ion	Plomb-Acide
Énergie massique (Wh/kg)	125	40
Puissance massique (W/kg)	1000	100
Nombre de cycles	1000	500
Rendement énergétique(%)	90	82
Tension d'élément (V)	4	2,1

Comparaison des technologies Plomb-Acide et Li-ion²⁰

Puissance massique (W/kg)



Accumulateurs Li-Ion

Fonctionnement

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

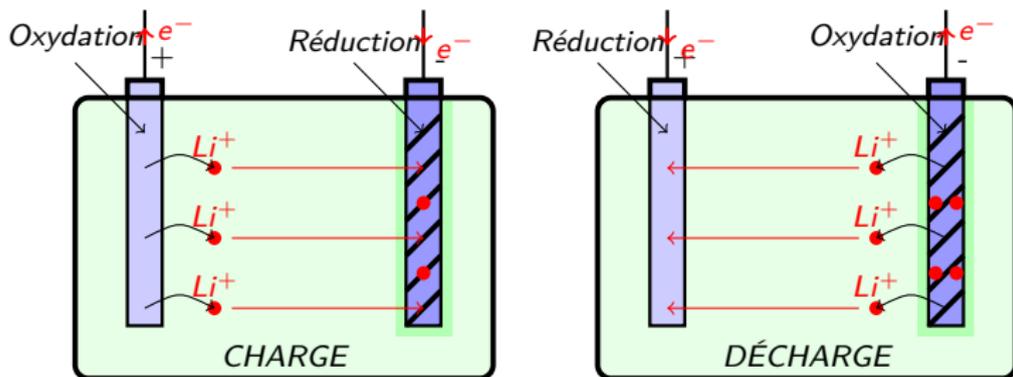
Performances
énergétiques d'un
système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST

Réactions d'oxydo-réduction sur les électrodes :



Structure de l'accumulateur

- Électrode positive : Oxyde métallique (par exemple un oxyde lithié de nickel)
- Électrode négative : Graphite à insertion lithium (LiC_6)
- Électrolyte : Mélange de solvants organiques et de sels de lithium assurant une forte conductivité ionique

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances
énergétiques d'un
système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST

Accumulateurs Intensium3 du fabricant SAFT²¹ :



Caractéristiques

- 14 éléments en série
- Tension d'élément varie entre 2,7 et 4,1 V
- Capacité 45 A.h (~ 2 kWh)
- Régime nominal : Charge/Décharge en 8h

Accumulateurs Li-Ion

Rendement

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances
énergétiques d'un
système PV

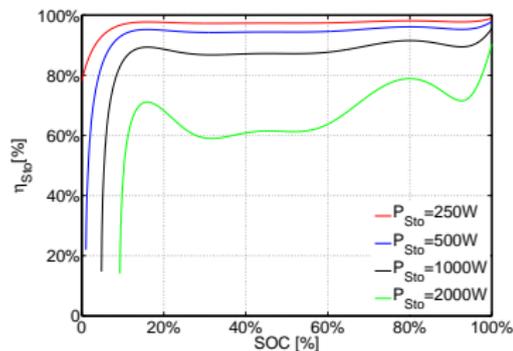
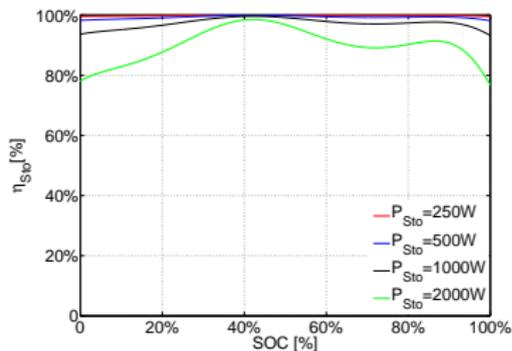
Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST

Le rendement des accumulateurs dépend plusieurs caractéristiques :

- État de charge de celui-ci (**State Of Charge (SOC)**)
- Puissance demandée



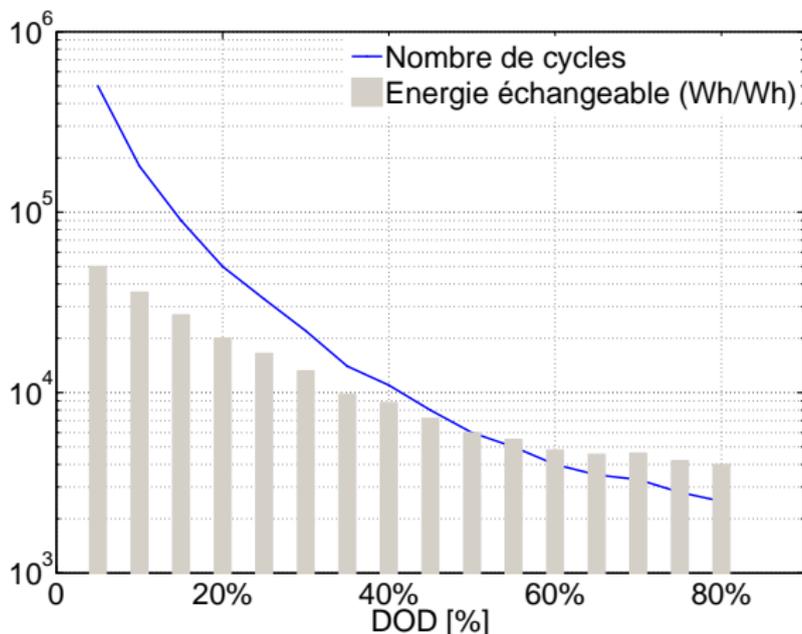
Rendements en charge et en décharge d'une batterie Li-ion Intensium 3 VL45E de SAFT (2 kWh)

- A SOC donné, plus la sollicitation en puissance ↗ ⇒ plus η ↘
- En décharge, plus SOC ↘ ⇒ plus η ↘
- En charge, plus SOC ↗ ⇒ plus η ↗

Accumulateurs Li-Ion

Durée de vie

Le système de stockage est actuellement un coût important des systèmes PV autonomes ($\sim 45\%$), les constructeurs visent aujourd'hui à augmenter leur **durée de vie** :



Nombre de cycles possibles et énergie échangée par un accumulateur Intensium 3 en fonction de la profondeur de décharge des cycles

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

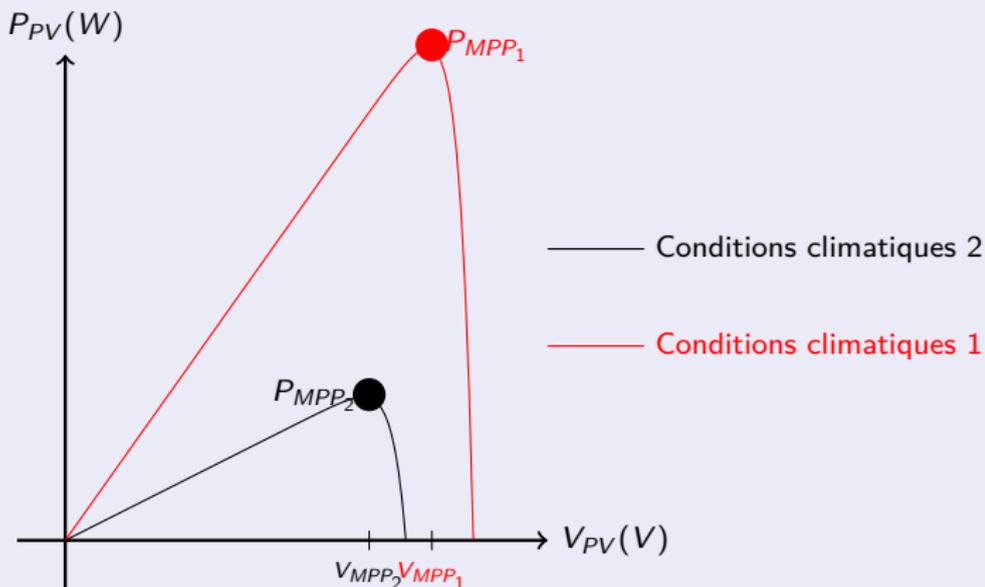
Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST

- 1 Conversion de l'énergie électrique (DC/AC) :
- 2 Recherche du Point de Puissance Maximale (Maximum Power Point Tracking (MPPT))

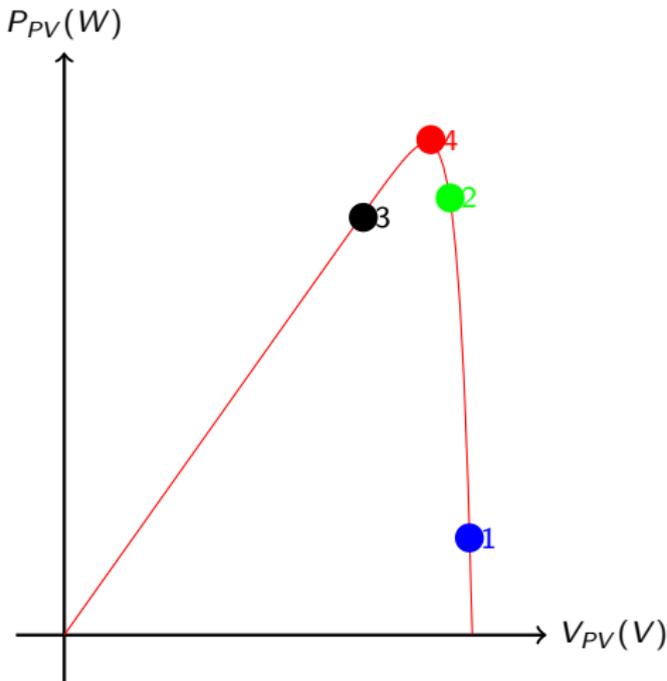


→ Nécessité d'adapter en permanence la tension du panneau PV !

Onduleurs

Recherche du point de puissance maximale (MPPT)

MPPT pour des conditions météo données (**Méthode PO²²**) :



- Conditions initiales : V_{PV_1} , P_{PV_1}
- Perturbation : $V_{PV_2} = V_{PV_1} - \Delta V$
- Observation : $P_{PV_2} > P_{PV_1}$?, oui
- Perturbation : $V_{PV_3} = V_{PV_2} - \Delta V$
- Observation : $P_{PV_3} > P_{PV_2}$?, non
- ...

→ L'onduleur converge alors vers le point de puissance maximal !

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un système PV autonome

Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

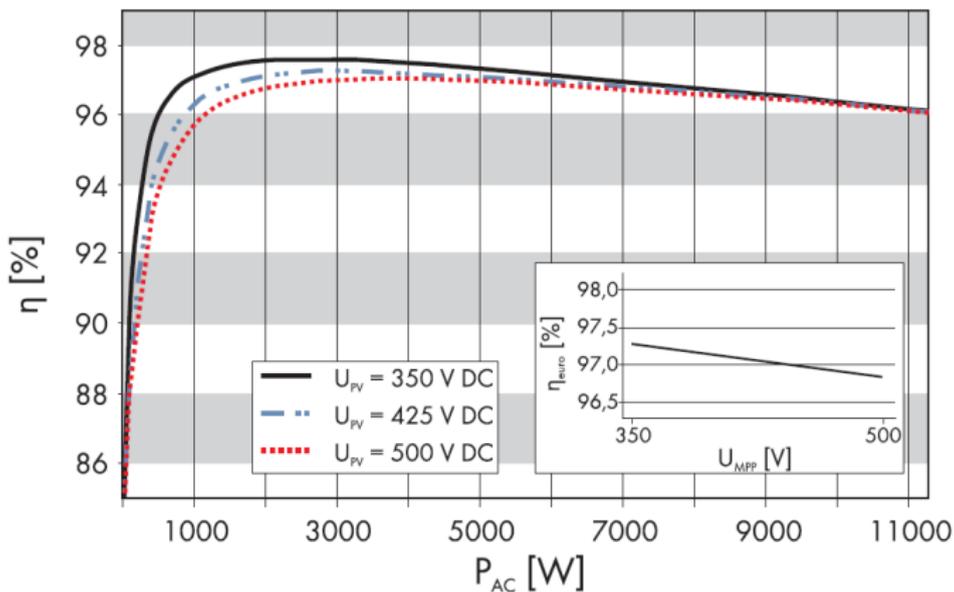
TP1 : Caractérisation de modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de systèmes PV à l'aide du logiciel PVSYST

Onduleurs

Rendement

Exemple de l'onduleur SMC 9000 TRLP :



- Rendement variable en fonction de la puissance injectée du côté AC
- Rendement variable en fonction de la tension du bus DC

→ La notion de η_{Max} n'est pas suffisante pour caractériser un onduleur !

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un système PV autonome

Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de systèmes PV à l'aide du logiciel PVSYST

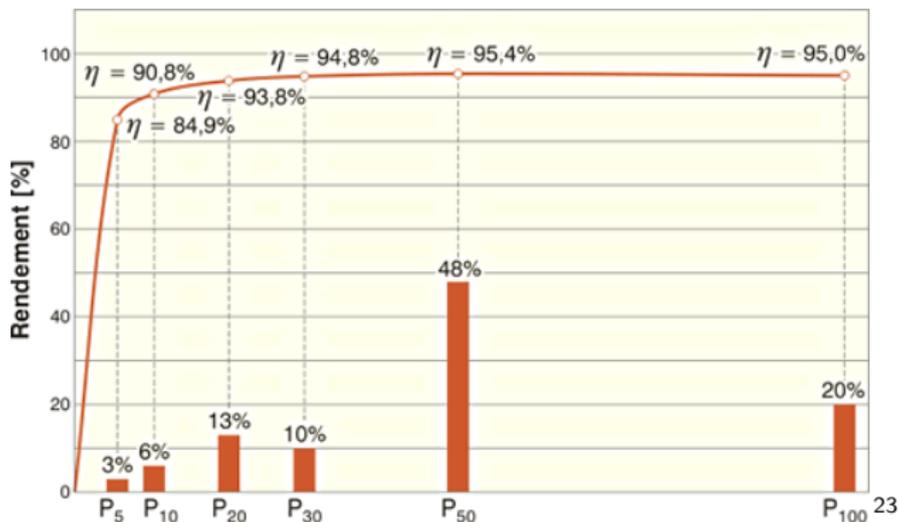
Onduleurs

Rendement

Pour harmoniser les données constructeur, le **Rendement Européen** a été définis. Il s'agit d'une pondération de différents points de rendement de l'onduleur :

$$\eta_{EU} = 0,03 \times \eta_{5\%} + 0,06 \times \eta_{10\%} + 0,13 \times \eta_{20\%} + 0,13 \times \eta_{30\%} + 0,48 \times \eta_{50\%} + 0,2 \times \eta_{100\%}$$

Les coefficients correspondent à temps moyen passé par l'onduleur sur ces points de fonctionnement.



Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un système PV autonome

Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de systèmes PV à l'aide du logiciel PVSYST

Exemple de l'onduleur SMC 9000 TRLP :

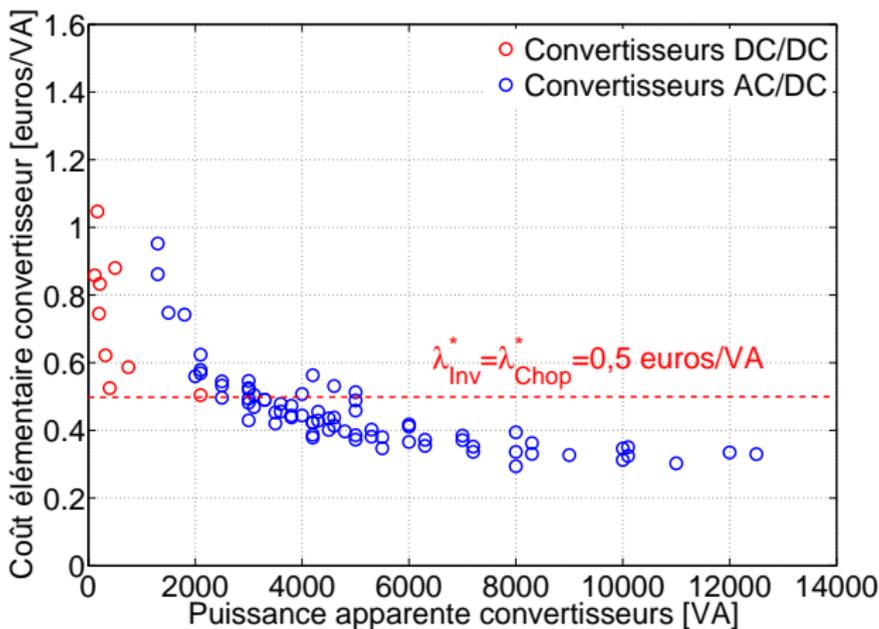
Entrée (DC)	
Puissance DC max. (quand $\cos \phi = 1$)	9300 W
Tension DC max.	700 V
Plage de tension photovoltaïque, MPPT	333 V - 500 V
Courant d'entrée max.	28 A
Nombre de MPP trackers	1
Nombre max. d'entrées (parallèle)	5
Sortie (AC)	
Puissance AC nominale / Puissance AC max.	9000 VA / 9000 VA
Courant de sortie max.	40 A
Tension nominale AC / plage	220V - 240V / 180V - 260V
Fréquence du réseau AC (autoréglable) / plage	50 Hz / 60 Hz / $\pm 4,5$ Hz
Facteur de déphasage réglable ($\cos \phi$)	0,8 inductif ... 0,8 capacitif
Raccordement AC / Power Balancing	monophasé / ●

- Puissance maximale
- Excursion en tension bus DC
- Rendement maximal
- Évolution du rendement
- Monophasé / triphasé
- Courant AC/DC
- Fréquence réseau AC...

Onduleurs

Prix des onduleurs

Prix (unitaires!) des convertisseurs trouvés sur internet (€/VA) :



- Plus le dimensionnement du convertisseur est important, plus le coût unitaire est faible
- Un coût de 0,5 €/ VA est généralement admis

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un système PV autonome

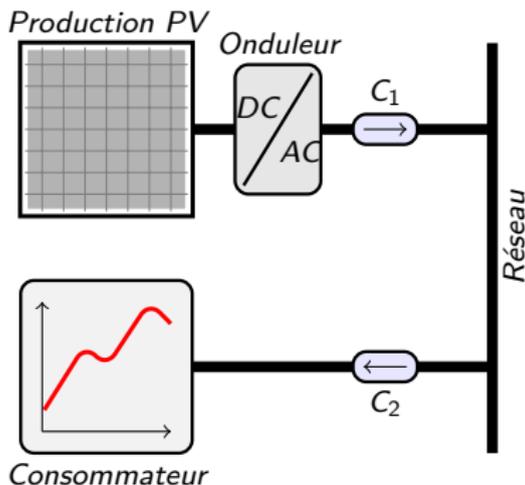
Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de systèmes PV à l'aide du logiciel PVSYST

Système connecté au réseau conventionnel



Architecture électrique d'un système photovoltaïque connecté au réseau de distribution

Ces systèmes sont à l'heure actuelle majoritaires en raison des tarifs de rachat préférentiels mis en place. Exemple de l'Union européenne fin 2011 :

- Non connecté réseau : $167 MW_c$
- Connecté réseau : $51190 MW_c$ (soit 99,6 % du parc installé !)

Système connecté au réseau conventionnel

Tarif de rachat de l'électricité d'origine photovoltaïque en France (depuis Mars 2011)²⁴

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances
énergétiques d'un
système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST

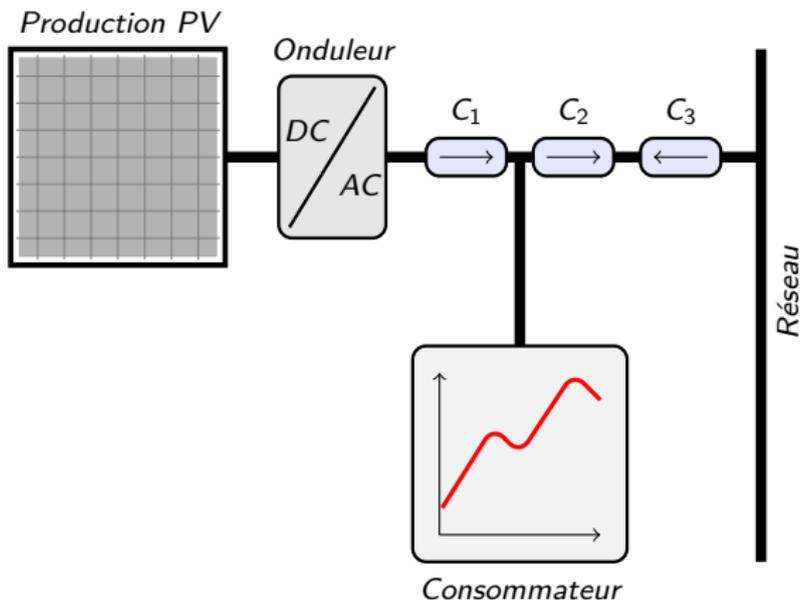
Calcul du tarif de rachat (Système intégré au bâti)

$$T = 46 \times D \times \prod_{i=1}^{N-1} (1 - S_i)$$

- D : Coefficient ($D=1$ si $P_{PV} < 9$ kWc)
- N : Trimestre en cours depuis Mars 2011
- S : Coefficient dépendant de la puissance totale installée dans le trimestre précédent

Date	Tarif (c€/kWh)
Jusqu'au 03/03/2011	58
Du 04/03/2011 au 30/06/2011	46
Du 01/07/2011 au 30/09/2011	42,55
Du 01/10/2011 au 31/12/2011	40,63
Du 01/01/2012 au 31/03/2012	38,80
Du 01/04/2012 au 30/06/2012	37,06
Du 01/07/2012 au 30/09/2012	35,39

Système connecté au réseau - Maximisation de l'autoconsommation



Architecture électrique d'un système photovoltaïque connecté au réseau de distribution permettant de maximiser l'autoconsommation

- C₁ : Énergie produite
- C₂ : Énergie renvoyée au réseau
- C₃ : Énergie soutirée au réseau

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un système PV autonome

Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de systèmes PV à l'aide du logiciel PVSYST

Système connecté au réseau - Maximisation de l'autoconsommation

Incitation tarifaires

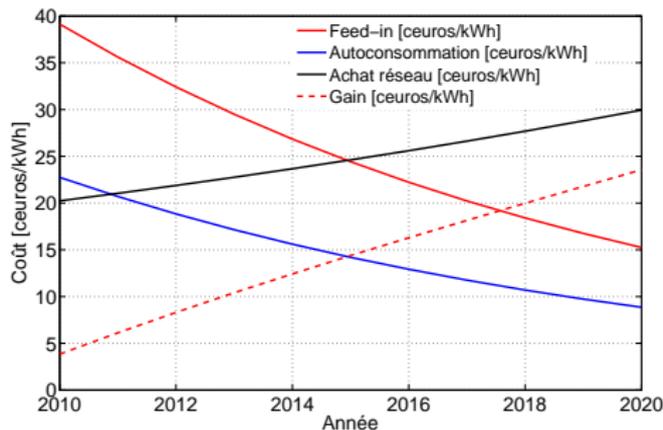
Exemple de l'Allemagne en 2009

Loi allemande sur les énergies renouvelables entrée en vigueur en 2009^a :

- Prix de rachat de l'énergie produite : 43,01 c€/kWh
- Prix de vente de l'énergie achetée au réseau : 19,45 c€/kWh
- Prix de rachat de l'énergie autoconsommée : 25,01 c€/kWh

Gain en 2009 : $25,01 - (43,01 - 19,45) = 1,45$ c€/kWh !

a. Bundestag, Loi portant réforme du droit relatif aux énergies renouvelables dans le domaine de l'électricité et d'amendement des dispositions connexes. Technical report, 2008



Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un système PV autonome

Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de modules Photovoltaïques

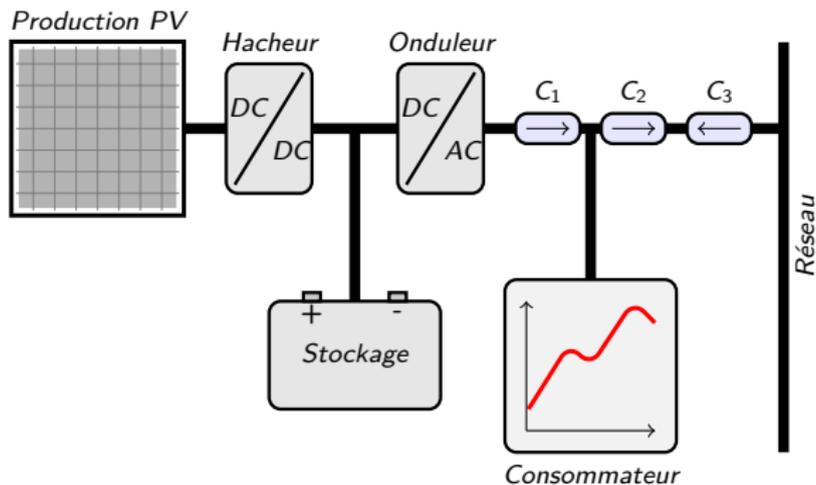
TP2 : Dimensionnement de systèmes PV à l'aide du logiciel PVSYST

Système connecté au réseau - Maximisation de l'autoconsommation

Ajout d'un système de stockage

Intérêt

- **Soulagement du réseau** : l'accumulateur permet de stocker la pointe de puissance photovoltaïque de mi-journée
- **Ilôtage possible** : en cas de défaillance du réseau de distribution, le système permet d'assurer l'approvisionnement (temporaire !) du consommateur



Système connecté au réseau - Maximisation de l'autoconsommation

Intérêt du système de stockage

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

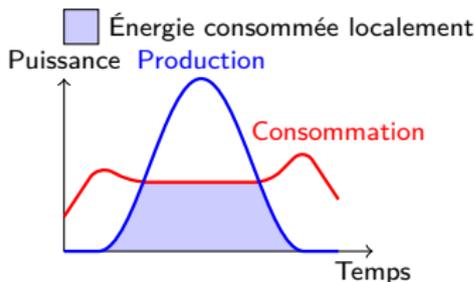
Dimensionnement d'un système PV autonome

Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

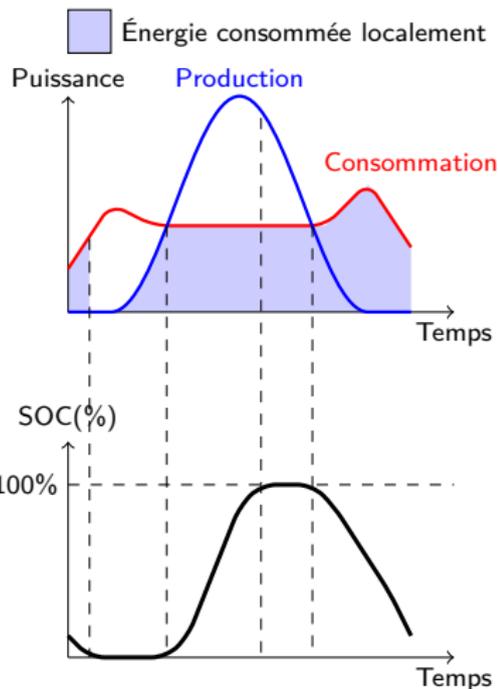
TP1 : Caractérisation de modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de systèmes PV à l'aide du logiciel PVSYST



Phase d'autoconsommation possible en surproduction sans système de stockage

Le système de stockage permet d'augmenter l'énergie consommée localement !



Phases d'autoconsommation possibles lors de l'utilisation d'un système de stockage

Système connecté au réseau - Maximisation de l'autoconsommation

Exemple de simulation

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un système PV autonome

Performances énergétiques d'un système PV

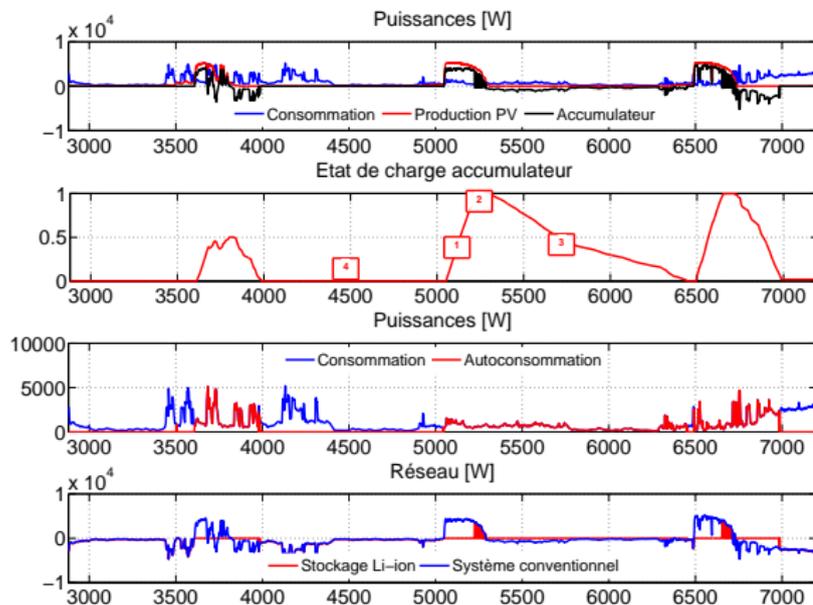
Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de systèmes PV à l'aide du logiciel PVSYST

Dimensionnement de l'installation

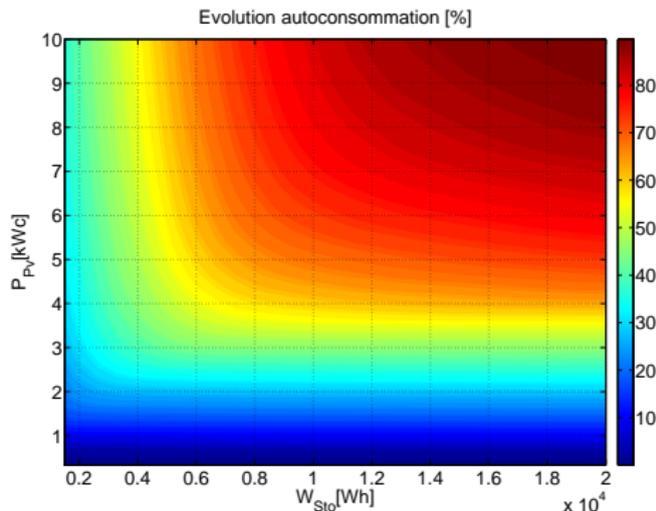
Puissance PV : $10kW_c$, Capacité batterie : $10kWh$, Demande consommateur : $\sim 15 kWh/j$



Système connecté au réseau - Maximisation de l'autoconsommation

Dimensionnement du système

Bien entendu, la quantité d'énergie autoconsommée varie avec le dimensionnement du système :



Évolution de l'autoconsommation en fonction du dimensionnement du système

→ Mais ce dimensionnement a un coût !

Système connecté au réseau - Maximisation de l'autoconsommation

Tarification allemande de 2015 calcul des coûts sur 20 ans

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

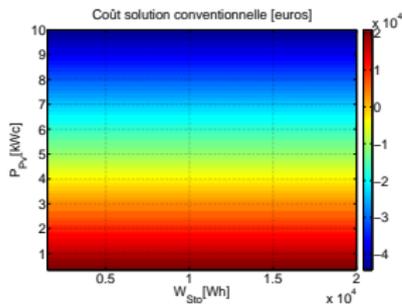
Dimensionnement d'un système PV autonome

Performances énergétiques d'un système PV

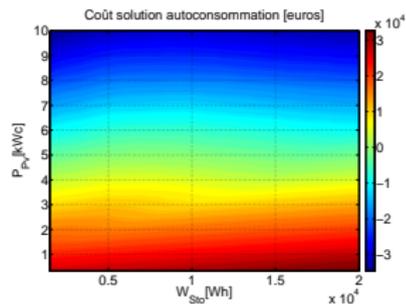
Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de modules Photovoltaïques

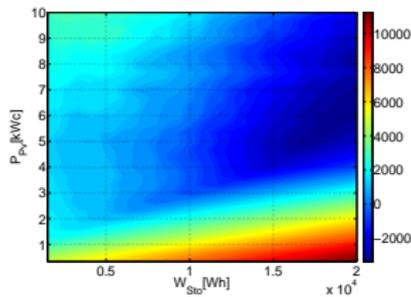
TP2 : Dimensionnement de systèmes PV à l'aide du logiciel PVSYST



Coût système conventionnel



Coût système maximisant l'autoconsommation



Différence de coût

Système photovoltaïque autonome

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

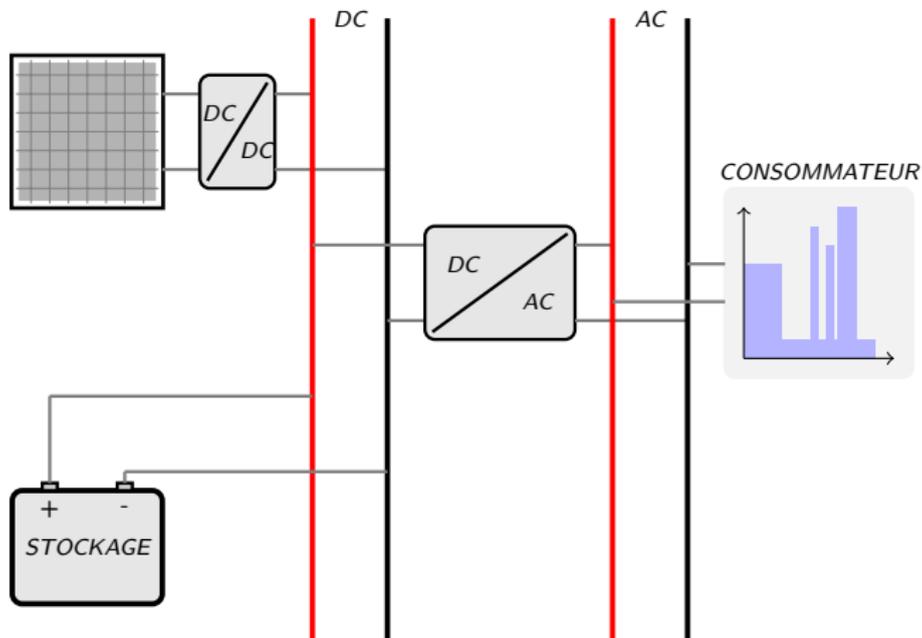
Dimensionnement d'un système PV autonome

Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de systèmes PV à l'aide du logiciel PVSYS



Exemple d'architecture électrique d'un système photovoltaïque autonome

Système photovoltaïque hybride

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

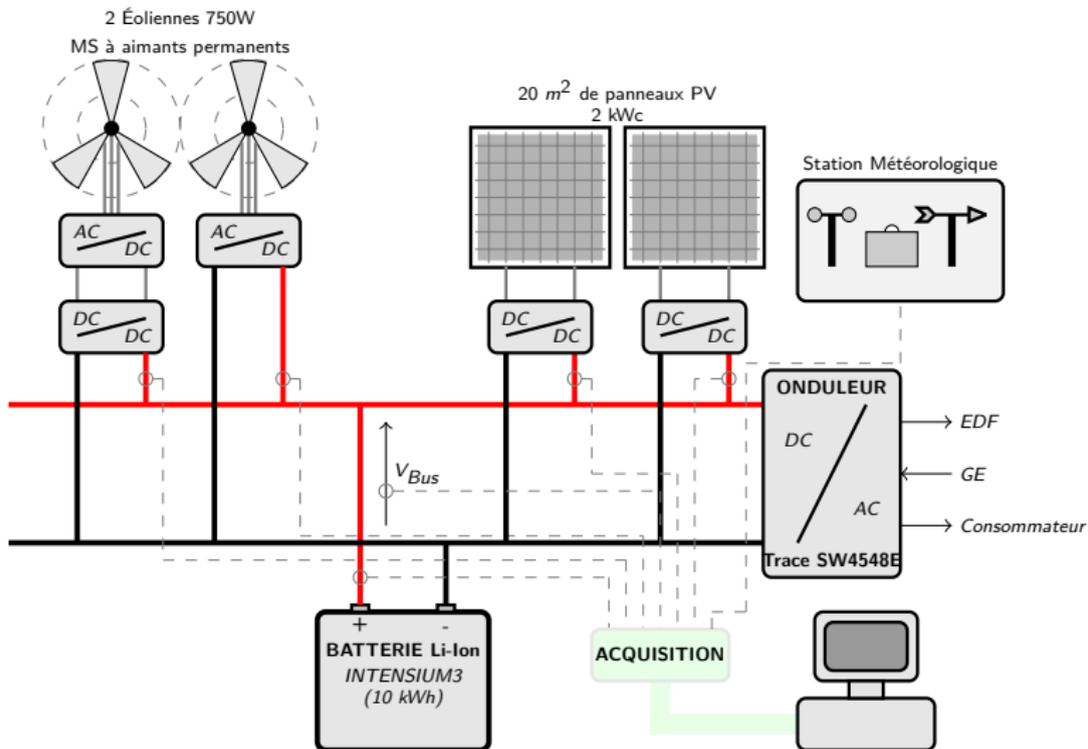
Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST



Système photovoltaïque hybride installé au l'Antenne de Bretagne de l'ENS
Cachan

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

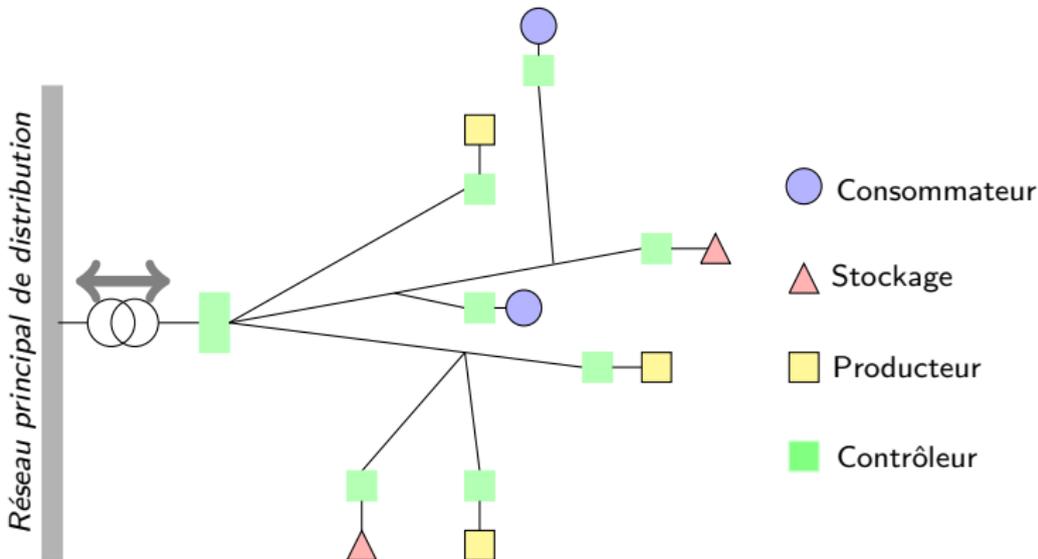
Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST



Exemple de configuration mini réseau

- Diminution de l'impact sur le réseau de distribution
- Augmentation du taux de pénétration
- Ilôtage possible du réseau (notamment en cas de Black-Out)
- Cogénération électricité / chaleur possible (rendue possible par la proximité entre producteurs et consommateurs)
- Possibilité d'un contrôle des charges électriques

Système PV autonome

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un système PV autonome

Performances énergétiques d'un système PV

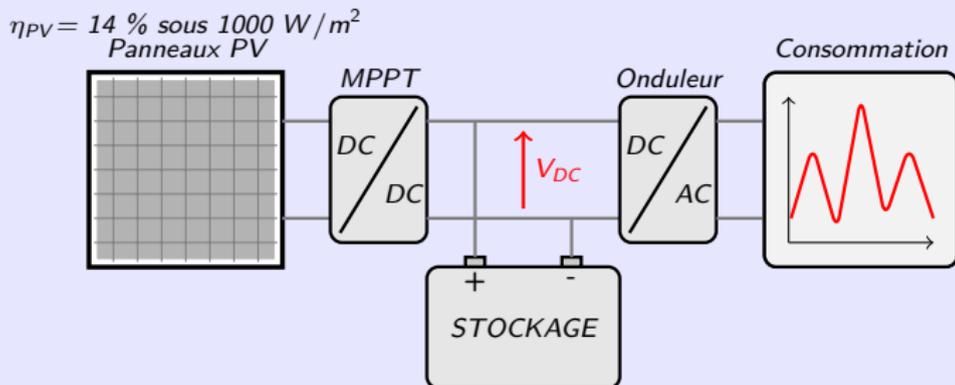
Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de systèmes PV à l'aide du logiciel PVSYS

Exercice :

On cherche à dimensionner (puissance crête PV (P_{PV}) et capacité énergétique des batteries (W_{Sto}) un système photovoltaïque autonome situé dans la périphérie nîmoise destiné à fournir totalement en électricité un foyer de 4 personnes. Le schéma de l'installation est représenté ci-dessous :



La consommation journalière moyenne (NRJ_{jour}) du foyer est de 15 kWh/jour , l'irradiation solaire moyenne (I_{rPV}) est quant à elle de $4,77 \text{ kWh/m}^2/\text{jour}$ dans le plan des panneaux. La puissance des panneaux est annoncée à 150 W/m^2 . Le consommateur souhaite bénéficier d'une autonomie garantie de 5 jours.

Système PV autonome

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances
énergétiques d'un
système PV

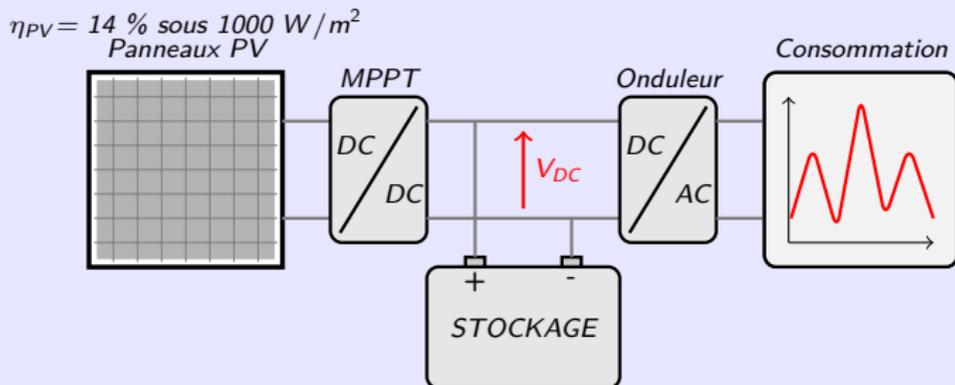
Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST

Exercice :

On cherche à dimensionner (puissance crête PV (P_{PV}) et capacité énergétique des batteries (W_{Sto})) un système photovoltaïque autonome situé dans la périphérie nîmoise destiné à fournir totalement en électricité un foyer de 4 personnes. Le schéma de l'installation est représenté ci-dessous :



La consommation journalière moyenne ($NR_{J_{jour}}$) du foyer est de 15 kWh/jour , l'irradiation solaire moyenne ($I_{r_{PV}}$) est quant à elle de $4,77 \text{ kWh/m}^2/\text{jour}$ dans le plan des panneaux. La puissance des panneaux est annoncée à 150 W/m^2 . Le consommateur souhaite bénéficier d'une autonomie garantie de 5 jours.

- 1 Dimensionner le système (P_{PV} et W_{Sto}) en considérant un rendement de 100% pour les convertisseurs et les batteries.

Système PV autonome

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances
énergétiques d'un
système PV

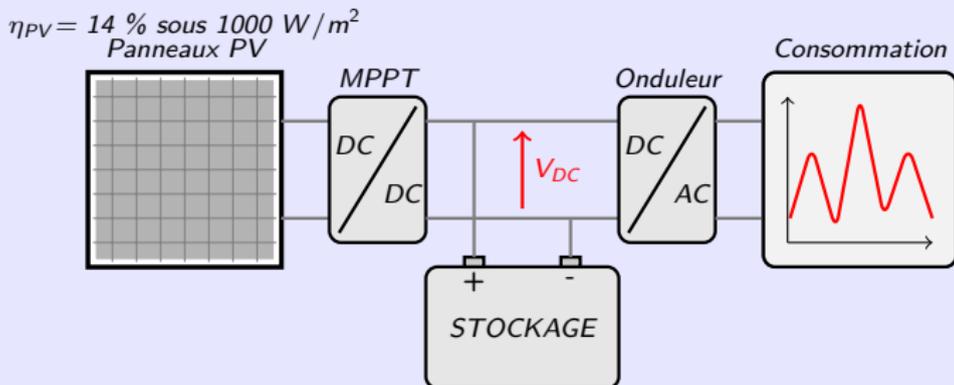
Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST

Exercice :

On cherche à dimensionner (puissance crête PV (P_{PV}) et capacité énergétique des batteries (W_{Sto})) un système photovoltaïque autonome situé dans la périphérie nîmoise destiné à fournir totalement en électricité un foyer de 4 personnes. Le schéma de l'installation est représenté ci-dessous :



La consommation journalière moyenne ($NR_{J_{jour}}$) du foyer est de 15 kWh/jour , l'irradiation solaire moyenne ($I_{r_{PV}}$) est quant à elle de $4,77 \text{ kWh/m}^2/\text{jour}$ dans le plan des panneaux. La puissance des panneaux est annoncée à 150 W/m^2 . Le consommateur souhaite bénéficier d'une autonomie garantie de 5 jours.

- 1 Dimensionner le système (P_{PV} et W_{Sto}) en considérant un rendement de 100% pour les convertisseurs et les batteries.
- 2 Refaire ce dimensionnement en considérant cette fois-ci un rendement global des convertisseurs de 90% et un rendement des batteries de 70%. Pour simplifier les calculs, nous considérerons que la totalité de l'énergie produite passe par les batteries avant d'être consommée.

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

**Dimensionnement d'un
système PV autonome**

Performances
énergétiques d'un
système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonomePerformances
énergétiques d'un
système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules PhotovoltaïquesTP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST**Exercice :**

On cherche toujours à dimensionner un système photovoltaïque autonome situé dans la périphérie nîmoise destiné à fournir totalement en électricité un foyer de 4 personnes. Les valeurs d'irradiation mensuelle^a sur l'année 2011 sur un plan incliné de 30 degrés et orienté plein sud sont rappelées ci-dessous ainsi que les besoins mensuels en électricité du foyer :

Mois	Irradiation [$kWh/m^2/jour$]	Consommation mensuelle [kWh]
Janvier	2,71	650
Février	3,69	540
Mars	4,65	587
Avril	5,62	306
Mai	5,74	460
Juin	6,77	427
Juillet	7,47	263
Aout	6,28	133
Septembre	5,41	447
Octobre	3,81	521
Novembre	2,94	608
Décembre	2,13	505

- 1 Vérifier si le dimensionnement réalisé précédemment permet de fournir en électricité ce foyer chaque mois. Qu'en concluez-vous?
- 2 Réaliser un nouveau dimensionnement en choisissant un mois pertinent.

a. Données issues du logiciel CalSol de l'INES

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

**Dimensionnement d'un
système PV autonome**

Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

**Dimensionnement d'un
système PV autonome**

Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

**Dimensionnement d'un
système PV autonome**

Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un système PV autonome

Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de systèmes PV à l'aide du logiciel PVSYST

Exercice :

On souhaite désormais calculer le prix de ce système, les différents coûts élémentaires^a sont listés dans le tableau ci-dessous :

Élément	Coût élémentaire	Unité
Panneaux PV	4	[€/ W _c]
Batteries	0,4	[€/ W.h]
Convertisseurs	0,5	[€/ V.A]

- Calculer le coût économique du système que vous avez dimensionné (12,9 kWc et 120 kWh).
- Les batteries n'ayant pas une durée de vie illimitée, recalculer le coût économique du système sur une durée de 30 ans. On prendra une durée de vie des batteries de 10 ans. A combien reviendrait la facture d'électricité si le consommateur achetait son électricité auprès d'EDF^b pendant 30 ans ? Conclusion.

-
- Ces coûts sont des moyennes constatées sur Internet
 - Tarif Bleu - Option Base - 9 kVA : 12 c€/kWh + Abonnement= 91,25 €/ an

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

**Dimensionnement d'un
système PV autonome**

Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

**Dimensionnement d'un
système PV autonome**

Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST

- 1 Contexte énergétique
- 2 L'énergie PV
- 3 Marché du PV
- 4 Systèmes PV
- 5 Performances énergétiques d'un système PV**
- 6 Travaux Pratiques

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances
énergétiques d'un
système PV

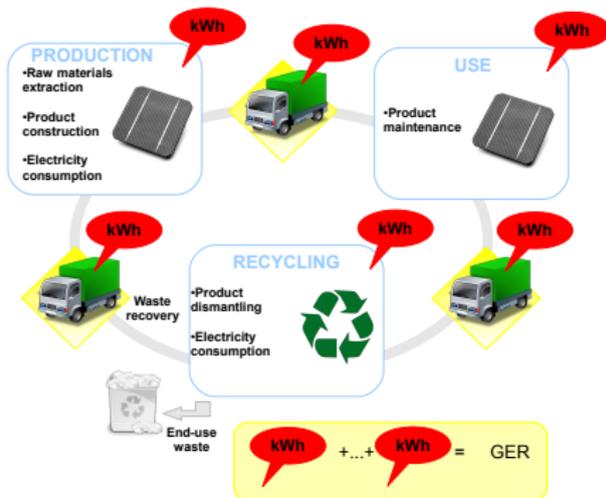
Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST

Notion de coût énergétique primaire

Le coût énergétique d'un système représente la quantité totale d'énergie primaire nécessaire sur son cycle de vie, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à son recyclage.



On parle d'énergie primaire lorsqu'il s'agit d'une énergie issue d'une ressource naturelle ou brute (combustible fossile, matière fissile, rayonnement solaire), et d'énergie finale lorsqu'il s'agit d'une forme commercialisée, par exemple, l'électricité livrée à l'abonné, l'essence à la pompe...^a

a. Techniques de l'Ingénieur, D3900, "Consommation d'énergie, ressources énergétiques et place de l'électricité"

Coût énergétique primaire d'un module PV

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

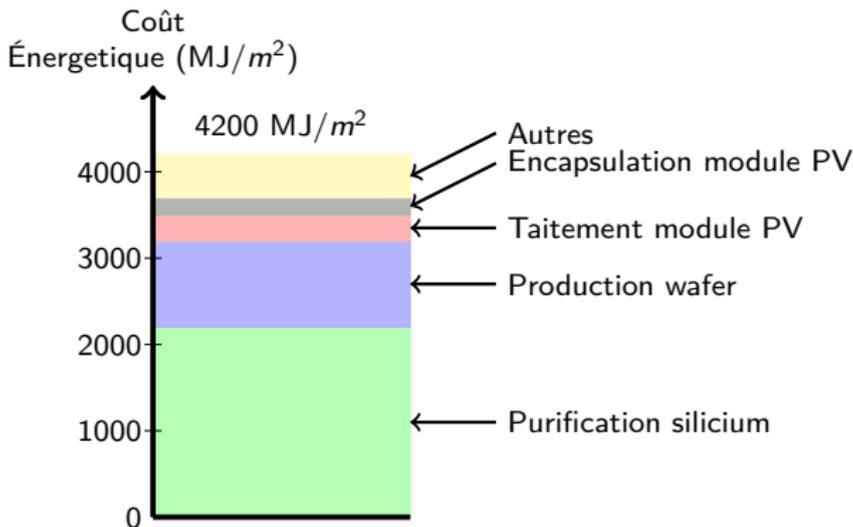
Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST

Le coût énergétique primaire est exprimée Joules, en kWh, en tep...



Contribution au GER global des différentes étapes de fabrication des modules PV polycristallins ²⁵

Bien entendu, à ce coût énergétique lié à la fabrication d'un module PV, il convient de rajouter l'ensemble des coûts énergétique liés au cycle de vie du module (transport, recyclage...)

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un système PV autonome

Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de systèmes PV à l'aide du logiciel PVSYST

Comparaison des technologies principales

Technologie	Valeur	Unité
m-Si	~3800	$[MJ_{prim}/m^2]$
p-Si	~3200	$[MJ_{prim}/m^2]$
a-Si	770-1290	$[MJ_{prim}/m^2]$
CdTe	790-1290	$[MJ_{prim}/m^2]$

Coûts énergétiques primaires sur cycle de vie pour les différentes technologies de modules PV

Exercice :

On cherche à déterminer l'intérêt énergétique d'un module photovoltaïque poly-cristallin. Pour cela, toutes les énergies seront exprimées en litres d'essence. Le pouvoir calorifique d'un litre d'essence est d'environ 35500 kJ.

- 1 D'après le tableau des coûts énergétiques primaires, déterminer le nombre de litres d'essence équivalent au cycle de vie d'1 m^2 de module poly-cristallin.
- 2 On considère que ce module est installé à Nîmes (Ensoleillement annuel : 1550 kWh/ m^2 /an), qu'il a un rendement de 13% et qu'il a une durée de vie garantie par le constructeur de 30 ans :
 - 1 Déterminer l'énergie (exprimée en litres d'essence!) récupérable par ce module sur sa durée de vie.
 - 2 Conclure sur l'intérêt énergétique des modules photovoltaïques.

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST

Temps de retour sur investissement

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYSY

Le **temps de retour sur investissement** est le temps mis par un système pour être amorti (financièrement ou énergétiquement). Autrement dit, c'est l'instant à partir duquel le système devient rentable...

Le **temps de retour sur investissement** (en année !) est généralement calculé sur la base de considérations économiques :

$$\text{Temps de retour sur investissement} = \frac{\text{Coût du système}}{\text{Gains annuels du système}}$$

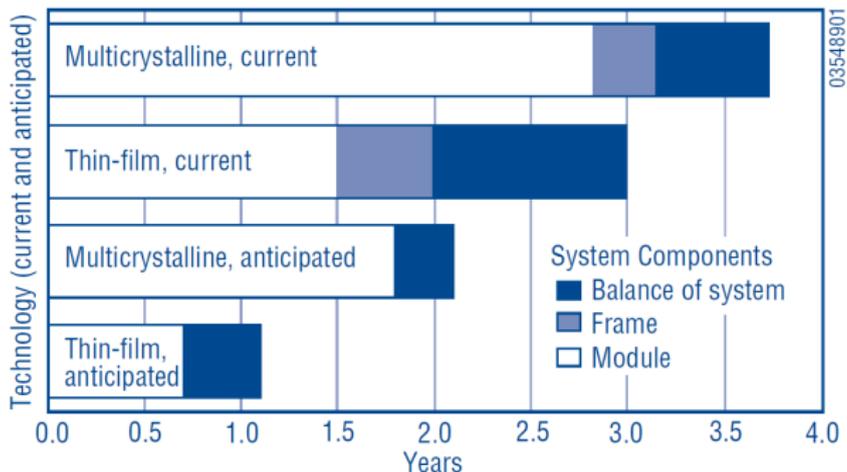
Par exemple, un investissement de 10000 € dans un système rapportant 2000 € par an sera rentable au bout de 5 ans...

Lorsque l'on s'intéresse au temps de retour sur investissement énergétique, on parle de **EPBT** (Energy Pay-Back Time) :

$$\text{EPBT} = \frac{\text{Coût énergétique système}}{\text{Production énergétique annuelle}}$$

Energy Payback Time

$$EPBT = \frac{\text{Coût énergétique système}}{\text{Production énergétique annuelle}}$$



EPBT pour différentes technologies de modules PV²⁶

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un système PV autonome

Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de systèmes PV à l'aide du logiciel PVSYST

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un système PV autonome

Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de systèmes PV à l'aide du logiciel PVSYSY

Exercice :

On cherche à déterminer le temps de retour sur investissement de 2 installations photovoltaïques connectées au réseau français, l'une à Nîmes et l'autre à Lille. Les différentes données du problème sont indiquées ci dessous :

Donnée	Valeur	Unité
Coût TTC de l'installation	5,5	[€/W _c]
Ensoleillement annuel Lille	950	[kWh/m ² /an]
Ensoleillement annuel Nîmes	1550	[kWh/m ² /an]
Puissance crête installée	3000	[W _c]
Rendement des modules	12	[%]
Tarif de rachat	46	[c€/kWh]
Puissance surfacique des modules	120	[W _c /m ²]
Durée de vie des panneaux	25	[an]

- 1 Déterminer la production annuelle d'énergie sur chacun des 2 sites
- 2 En déduire les gains économiques obtenus par la revente d'énergie au réseau
- 3 Déterminer alors le temps de retour sur investissement sur chacun des 2 sites et conclure sur la viabilité économique des 2 systèmes

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYSY

1 Contexte énergétique

2 L'énergie PV

3 Marché du PV

4 Systèmes PV

5 Performances énergétiques d'un système PV

6 Travaux Pratiques

- TP1 : Caractérisation de modules Photovoltaïques
- TP2 : Dimensionnement de systèmes PV à l'aide du logiciel PVSYSY

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances
énergétiques d'un
système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST

Buts du TP :

- Caractérisation électrique de modules photovoltaïques (V_{CO} , I_{CC} , P_{mpp} , η , FF)
- Comparaison de différentes technologies (a-Si : amorphe, m-Si : mono cristallin et p-Si : poly cristallin)
- Effet de l'orientation et de l'inclinaison sur les performances des modules
- Effet de l'ombrage d'une cellule sur les performances des modules
- Compréhension du rôle des diodes By-Pass

Au cours de ce TP, 3 technologies de modules PV seront étudiées :

- Silicium amorphe (a-Si) : Mitsubishi MA-100-T2
- Silicium mono-cristallin (m-Si) : Conergy P-170 M
- Silicium poly-cristallin (p-Si) : BP Solar BP 365

A l'issue de ce TP, les principales différences entre ces 3 technologies doivent être connues.

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances
énergétiques d'un
système PV

Travaux Pratiques

**TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques**

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST

Liste des essais à réaliser :

Essai	Technologie	Orientation	Inclinaison	Ombrage
1	a-Si	SUD	90°	Non
2	m-Si	SUD	90°	Non
3	p-Si	SUD	90°	Non
4	p-Si	SUD	0°	Non
5	p-Si	SUD	45°	Non
6	a-Si	EST	90°	Non
7	a-Si	OUEST	90°	Non
8	p-Si	SUD	90°	Non

TP1 : Caractérisation de modules Photovoltaïques

Travail demandé

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYSY

- 1 Relever les caractéristiques électriques principales des 3 technologies de panneaux
- 2 Déterminer un montage permettant de déterminer la caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$ d'un panneau photovoltaïque. Préciser le choix de tous les appareils.
- 3 Pour chaque essai, **mesurer l'irradiance solaire à l'aide du solarimètre dans le plan du panneau**. Tracer les caractéristiques $I_{pv} = f(V_{pv})$ et $P_{pv} = g(V_{pv})$
- 4 A l'aide des essais **1,2** et **3**, comparer les différentes technologies (Tension de circuit ouvert, courant de court-circuit, puissance crête, rendement). Comparer ces valeurs aux valeurs annoncées sur les documents constructeurs.
- 5 A l'aide des essais **3, 4** et **5**, conclure sur l'effet de l'inclinaison des panneaux.
- 6 A l'aide des essais **1, 6** et **7**, conclure sur l'effet de l'orientation des panneaux.
- 7 A l'aide des essais **3** et **8**, conclure sur l'effet de l'ombrage d'une seule cellule. Expliquer le fonctionnement de la diode By-Pass. Représenter le schéma électrique du panneau p-Si (organisation des n cellules, diode(s) By-Pass)...

TP2 : Dimensionnement de systèmes PV à l'aide du logiciel PVSYST

Présentation

Le but de ce TP est de prendre en main le logiciel PVSYST. L'idée est d'installer un système photovoltaïque connecté au réseau sur un des parking de l'IUT :

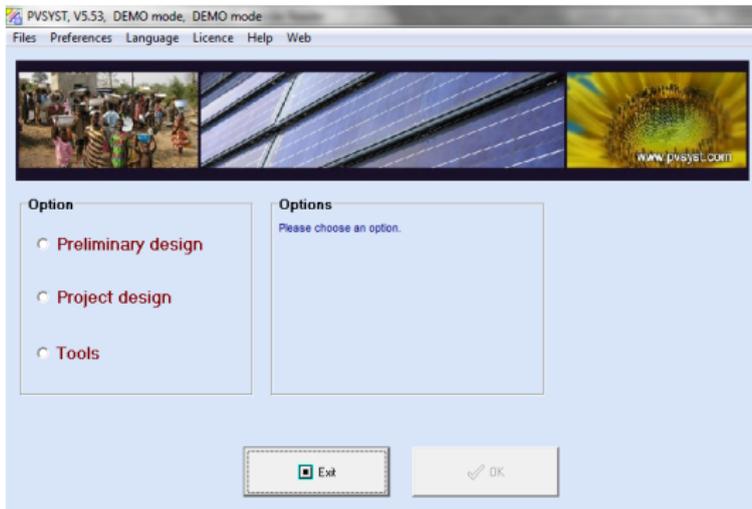


Les dimensions ainsi que l'orientation du parking sont à prendre en compte de façon à optimiser le dimensionnement du système.

TP2 : Dimensionnement de systèmes PV à l'aide du logiciel PVSYST

Présentation

Le logiciel PVSYST va nous permettre de dimensionner le système de façon simple (**Preliminary design**) ou en intégrant plus de paramètres (**Project Design**).



Le TP se déroule en 3 étapes :

- 1 Relevé de masque : relever les ombrages possibles dus à l'environnement proche à l'aide d'une boussole et d'un inclinomètre.
- 2 Étude simplifiée du système sous PVSYST (**Preliminary design**)
- 3 Design plus complet toujours sous PVSyst (**Project design**)

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances
énergétiques d'un
système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST

TP2 : Dimensionnement de systèmes PV à l'aide du logiciel PVSYST

Composants utilisés

Pour ce TP le choix s'est porté sur des modules PV amorphes de la série du fabricant First Solar : les modules FS-270.

NUMÉROS DES MODÈLES ET CARACTÉRISTIQUES NOMINALES À STC **					
Valeurs nominales		FS-270	FS-272	FS-275	FS-277
Puissance nominale (+/-5%)	P_{npp} (W)	70	72,5	75	77,5
Tension à P_{max}	V_{npp} (V)	67,1	67,9	69,4	70,9
Courant à P_{max}	I_{npp} (A)	1,04	1,07	1,08	1,09
Tension à vide	V_{oc} (V)	89	90	92	93
Courant de court-circuit	I_{sc} (A)	1,19	1,19	1,20	1,21
Tension du système maximale	V_{sp} (V)			1000	
Coefficient de température de P_{npp}	$T_k(P_{npp})$			-0,25%/°C	
Coefficient de température de V_{oc}	$T_k(V_{oc})$			-0,25%/°C	
Coefficient de température de I_{sc}	$T_k(I_{sc})$			+0,04%/°C	
Courant inverse maximal ¹	IR (A)			2	

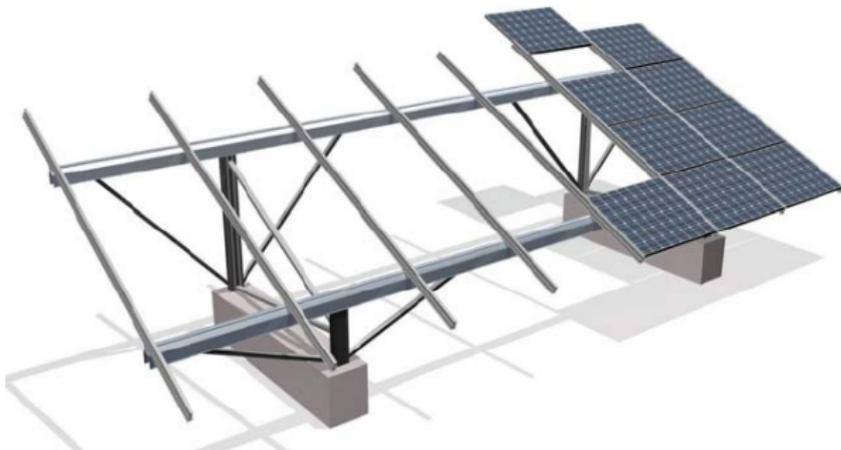
Les dimensions de ce module sont les suivantes :

- Longueur : 1200 mm
- Largeur : 600 mm
- Épaisseur : 6,8 mm

TP2 : Dimensionnement de systèmes PV à l'aide du logiciel PVSYST

Composants utilisés

On utilisera la structure Solar Gigant II pour supporter l'ensemble des panneaux :



Caractéristiques du support :

- Longueur : 10 m
- Hauteur : 5 m
- Inclinaison : 15°- 35°

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances
énergétiques d'un
système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST

TP2 : Dimensionnement de systèmes PV à l'aide du logiciel PVSYST

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances
énergétiques d'un
système PV

Travaux Pratiques

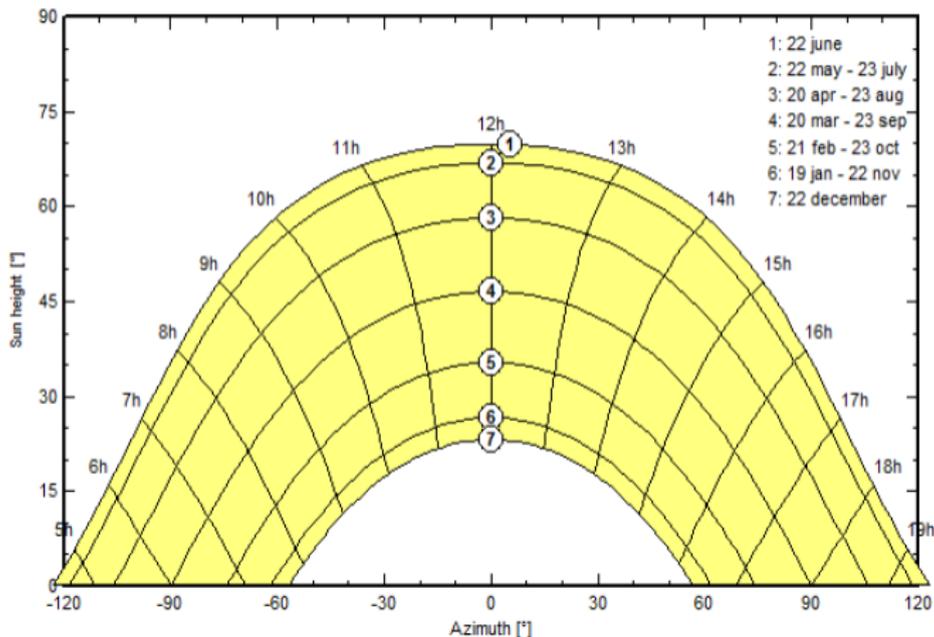
TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST

Relevé de Masque

En vous plaçant au centre du parking, relever à l'aide d'une boussole et d'un inclinomètre le masque de l'environnement proche sur le système PV installé sur le parking.

Solar paths at Montpellier, (Lat. 43.4°N, long. 3.6°E, alt. 3 m)



TP2 : Dimensionnement de systèmes PV à l'aide du logiciel PVSYST

Étude simplifiée

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST

Simuler un système photovoltaïque simple connecté au réseau situé sous nos latitudes (configuration Single Fixed Plane). On imagine que l'on installe un seul système au sol de même surface que le Solar Gigant muni de panneaux couche mince.

- Quelle est l'orientation et l'inclinaison optimale pour un panneau PV ?
- A quoi correspond le facteur FT (Factor Transposition) ? Quel est sa valeur pour la configuration optimale ?
- Quel est le montant maximal d'énergie solaire dans le plan des panneaux pour la configuration optimale ? Précisez la surface active disponible pour un système Solar Gigant et passez à la suite.
- Faire le bilan de l'installation (Puissance crête installée, énergie électrique produite annuellement, coût de l'investissement).

TP2 : Dimensionnement de systèmes PV à l'aide du logiciel PVSYST

Étude simplifiée du système

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un système PV autonome

Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de systèmes PV à l'aide du logiciel PVSYST

- Pour conclure, préciser le temps de retour sur investissement de ce système en connaissant le coût de rachat de l'énergie électrique pour un système PV installé au sol en France. Refaites vos calculs pour ce même système mais intégré au bâti. Conclusion.

Type de système	Prix de rachat de l'électricité	Unité
Au sol	12	[c€/kWh]
Intégré au bâti	46	[c€/kWh]

- Simuler désormais un système composé de plusieurs panneaux PV les uns derrière les autres (configuration Sheds disposition).
- Faites varier les différents paramètres et observer leur influence sur le Facteur de Transposition, ainsi que sur la surface occupée au sol.
- Quel est le paramètre limitant la distance minimale entre 2 rangées de panneaux PV ?

TP2 : Dimensionnement de systèmes PV à l'aide du logiciel PVSYST

Dimensionnement complet

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un système PV autonome

Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de modules Photovoltaïques

TP2 : Dimensionnement de systèmes PV à l'aide du logiciel PVSYST

Reprendre le premier système simulé (un seul système au sol)) mais cette fois en sélectionnant "Project Design ".

- Précisez l'horizon lointain, attention, il ne s'agit pas du relevé de masque !
- De façon à intégrer l'effet d'ombrage de l'environnement proche des panneaux, réalisez la scène 3-D du lieu où sera installé le système (parking de l'IUT), en intégrant notamment les bâtiment GEII et Génie Civil.
- Simuler le parcours du soleil pour différentes journées (jour actuel, solstices, équinoxes). Estimer les pertes de productible dues à l'ombrage pour ces journées. Sauvegarder la scène et poursuivre la simulation.
- Observer alors l'ombrage sur le diagramme du parcours du soleil, comparer avec le relevé de masque effectué.
- Poursuivre la simulation et préciser alors le système que vous souhaitez implanter (surface disponible, type de panneaux, onduleur (selon la puissance crête installée) ?). Représenter le schéma électrique du système (nombre de modules PV, onduleur, réseau ?).

TP2 : Dimensionnement de systèmes PV à l'aide du logiciel PVSYST

Dimensionnement complet

Contexte énergétique

L'énergie PV

Matériaux semi-conducteurs

Caractéristique électrique
d'une cellule PV

De la cellule au module

Potentiel PV

Exercice

Marché du PV

Puissance PV installée

Compétitivité du PV

Production de cellules

Systèmes PV

Composants d'un système
PV

Système de stockage

Convertisseurs

Architectures envisageables

Dimensionnement d'un
système PV autonome

Performances énergétiques d'un système PV

Travaux Pratiques

TP1 : Caractérisation de
modules Photovoltaïques

**TP2 : Dimensionnement de
systèmes PV à l'aide du
logiciel PVSYST**

- Réaliser le calepinage des modules (Modules Layout).
- Lancer la simulation finale (sur un an). Étudier alors les principaux graphiques, notamment celui concernant le Performance Ratio.
- Réaliser le bilan économique du système et conclure sur sa viabilité.

Composant	Prix	Unité
Modules PV	3	[€/W _c]
Onduleur	0,5	[€/W]
Autres	+10 % du coût	