

## CHAPITRE 3 : L'ÉNERGIE DE LA LUMIÈRE

Le rayonnement solaire constitue une source d'énergie renouvelable indispensable au remplacement des énergies fossiles dans le mix électrique mondial. En 2023, les 2 premiers producteurs européens d'électricité d'origine solaire étaient l'Allemagne (55 TW.h) et l'Espagne (40 TW.h) L'Allemagne a fait le choix de construire des **centrales solaires photovoltaïques** alors que l'Espagne a parié sur les **centrales solaires thermiques** à concentration.



Les centrales solaires thermiques espagnoles de Solvina, PS 10 et PS 20 représentent une puissance installée de 180 MW

Comment fonctionnent ces deux types d'installations solaires ?

### 1 Quantification de l'énergie rayonnante

L'**émission** ou l'**absorption** de la lumière par la matière est due à des **transitions électroniques** dans les **atomes**. Lorsqu'un électron « descend » vers un niveau de plus basse énergie, il perd de l'énergie et émet une particule de lumière appelée « photon ». Inversement, pour monter vers un niveau de plus haute énergie, un électron doit absorber un photon.

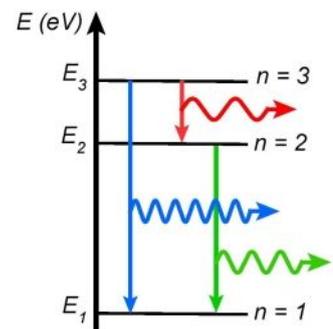


Diagramme de niveaux d'énergie d'un atome isolé

★Vidéo : L'électron dans tous ses états



Ainsi la **lumière** peut être vue comme la propagation d'une **onde électromagnétique** mais aussi comme la propagation de **photon**. On parle de **dualité onde-corpuscule**.

Une onde électromagnétique de fréquence  $f$  peut être associée à des **photons** transportant des « quanta » d'énergie  $E$  proportionnelle à la fréquence  $f$ . On peut écrire :

$$E = h \times f$$

- $f$  est la fréquence de l'onde électromagnétique (en Hz)
- $E$  est l'énergie des photons associés à l'onde (en Joules J)
- $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  J.s est la constante de Planck.
- Les énergies peuvent être exprimées en électronvolt eV :  $1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19}$  J

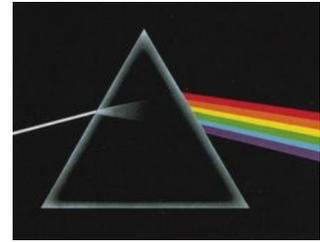
**Rappel :** La fréquence  $f$  (en Hz) d'une onde de célérité  $c$  (en m/s) est liée à sa longueur d'onde (en m)

par la formule :  $c = \lambda \times f$  avec  $f = \frac{1}{T}$

Dans le vide et dans l'air  $c = 3,00 \cdot 10^8$  m/s pour les ondes électromagnétiques.

**Application 1 :** On considère un photon associé à un rayonnement de longueur d'onde  $\lambda = 1\,000$  nm.

1. Ce rayonnement est-il visible ?
2. Calcule l'énergie de ce photon et exprime le résultat en électronvolts.



-----

-----

-----

-----

-----

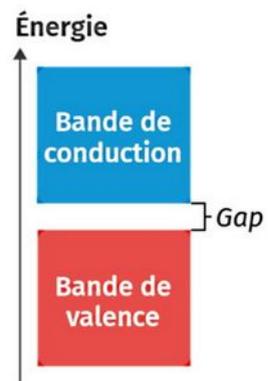
-----

-----

-----

La grande majorité des panneaux photovoltaïques sont constitués d'un semi-conducteur : le silicium. Les cellules des panneaux sont constituées de jonctions P-N. La couche de type P est constituée de silicium dopé avec des impuretés P (positif) l'autre avec des impuretés N (négatif).

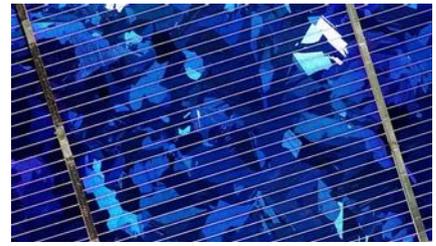
Pour décrire cette jonction il faut faire appel à la théorie des **bandes d'énergies** qui remplacent les niveaux d'énergie. Pour créer un courant électrique au niveau de la jonction, des photons de lumière doivent arracher des électrons de la **bande de valence** pour les faire passer dans une bande de plus haute énergie appelée **bande de conduction**. L'espace entre les deux est appelé « **gap** » ou « bande interdite ».



★ Vidéo : L'électron libre : la théorie des bandes



**Application 2 :** La centrale solaire de Senftenberg/Schipkau, construite en 2011, est la 2<sup>e</sup> plus grande centrale photovoltaïque d'Allemagne. Elle est équipée de panneaux photovoltaïques en silicium polycristallin. L'énergie de gap du silicium est de  $E_g = 1,12 \text{ eV}$ .



1. Des photons identiques à celui de l'application précédente possèdent-ils une énergie suffisante pour créer un courant électrique en sortie des panneaux en silicium ?
2. Les photons associés à la lumière visible ont-ils plus ou moins d'énergie que ceux de l'application 1 ? Peuvent-ils créer un courant électrique en percutant les panneaux ?

-----

-----

-----

-----

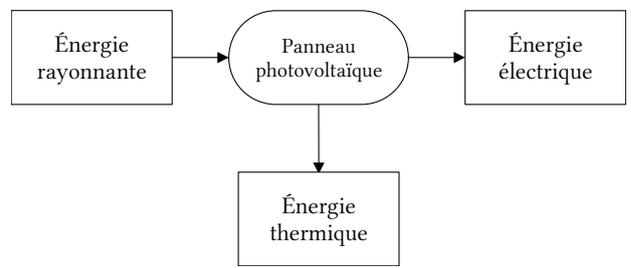
-----

-----

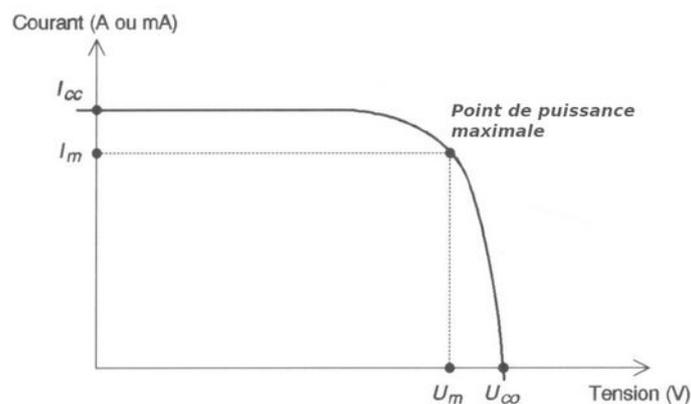
-----

## 2 Les panneaux solaires photovoltaïques.

Les panneaux photovoltaïques réalisent une conversion photoélectrique : ils convertissent l'énergie rayonnante en énergie électrique. On donne leur chaîne de conversion d'énergie ci-contre.



Ils délivrent du courant continu (DC) généralement converti en courant alternatif (AC) grâce à un onduleur situé après les panneaux. La caractéristique électrique intensité-tension des panneaux photovoltaïques a l'allure suivante :



Avec :

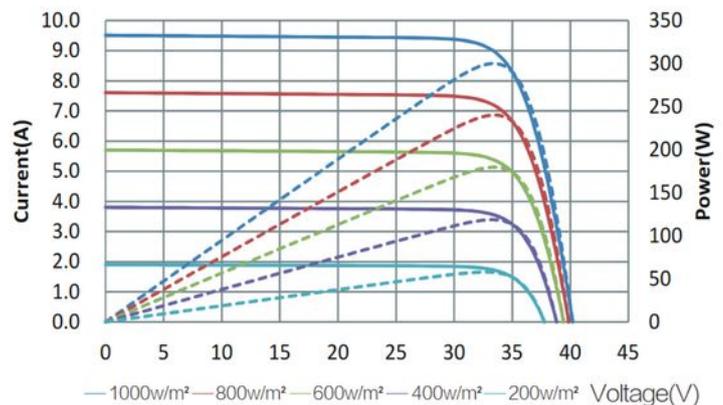
- $I_{cc}$  l'intensité de court circuit
- $I_m$  l'intensité à puissance maximale
- $U_{co}$  la tension en circuit ouvert (ou tension à vide)
- $U_m$  la tension à puissance maximale

La puissance électrique maximale ou puissance crête est donnée par la relation :  $P_{max} = U_m \times I_m$

★Vidéo : Fonctionnement d'un panneau solaire au silicium



**Application 3 :** La centrale photovoltaïque de Neuhardenberg, construite en 2012, est la 3<sup>e</sup> plus grosse centrale solaire d'Allemagne. Elle est équipée de 60 000 panneaux photovoltaïques de type Talesun Pipro TP660P. Leurs caractéristiques intensité-tension (trait plein) et leur courbes de puissance (pointillés) sont données ci-dessous :



Pour le panneau TP660P sous un éclairage de 1 000 W/m<sup>2</sup>, détermine par lecture graphique ou par calcul :

1. l'intensité de court circuit
2. la tension en circuit ouvert
3. l'intensité à puissance maximale
4. la tension à puissance maximale
5. la puissance maximale

-----

-----

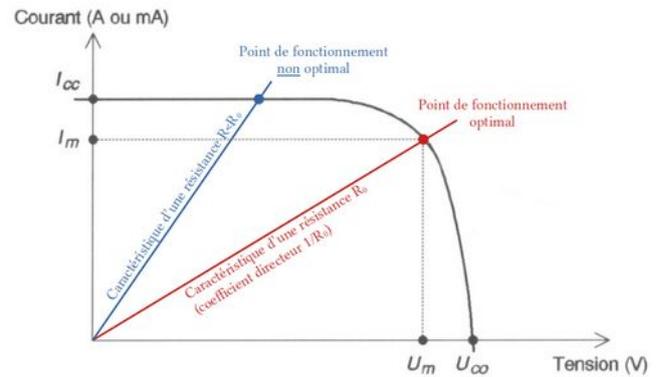
-----

-----

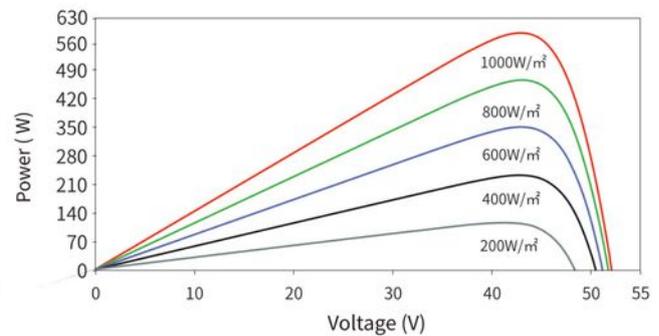
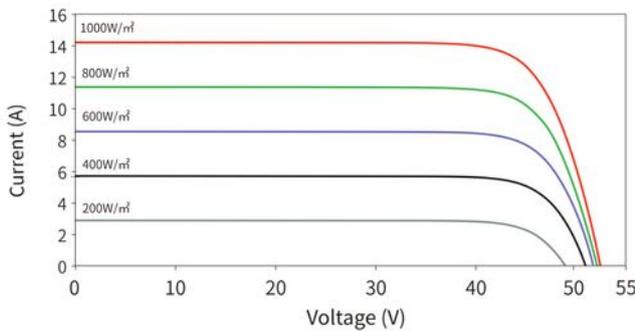
Lorsqu'un récepteur est branché aux bornes d'un panneau, l'**intersection des caractéristiques courant-tension** du récepteur et du panneau donne le **point de fonctionnement** réel du circuit.

En conditions réelles un module électronique branché en sortie du panneau appelé MPPT (Maximum Power Point Tracking)

crée une résistance virtuelle  $R_0$  optimale pour que le panneau délivre sa puissance maximale.



**Application 4 :** La centrale solaire de Witznitz, mise en service en 2024, est la plus grande centrale solaire d'Allemagne et d'Europe. Elle est équipée avec 1,1 millions de panneaux JinkoSolar de type TigerNeo 54HL4R dont on donne les caractéristiques intensité-tension et les courbes de puissance ci-dessous :



1. Calcule la résistance optimale  $R_0$  et la puissance délivrée par un panneau lorsqu'il reçoit un éclairement de  $800 \text{ W/m}^2$ .
2. Le temps devient nuageux et l'éclairement chute à  $400 \text{ W/m}^2$ . Si on garde la même résistance  $R_0$  aux bornes du panneau, quelle puissance délivre-t-il ? Quelle puissance maximale pourrait-il délivrer si on ajustait  $R_0$  ?
3. Dans les conditions standard de test (STC) soit un éclairement de  $1000 \text{ W/m}^2$  évalue la puissance crête installée sur l'ensemble de la centrale solaire de Witznitz. Commente le résultat.

Le **rendement** d'un panneau photovoltaïque est le **rapport de la puissance électrique maximale utile** qu'il produit divisée par la **puissance rayonnante** qu'il absorbe :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{rayonnante}}$$

La puissance rayonnante absorbée par le panneau est proportionnelle à sa surface  $S$  (en  $m^2$ ) et à l'éclairement  $\Phi$  (en  $W/m^2$ ) qu'il reçoit.

$$P_{rayonnante} = \Phi \times S$$

**Application 5 :** La centrale solaire de Templin avec une puissance crête installée de 128 MW est la 4<sup>e</sup> centrale solaire d'Allemagne. Cette centrale compte près de 1,5 millions de panneaux photovoltaïques implantés sur ancienne base aérienne soviétique.

Les promoteurs ont choisi d'équiper la centrale avec des panneaux First Solar FS-385 particulièrement innovants à base de cellules solaires à couche mince au tellurure de cadmium (CdTe). Moins coûteuses, nécessitant moins d'énergie à la fabrication et plus légères, ces cellules offrent néanmoins des rendements plus faibles que celles en silicium.

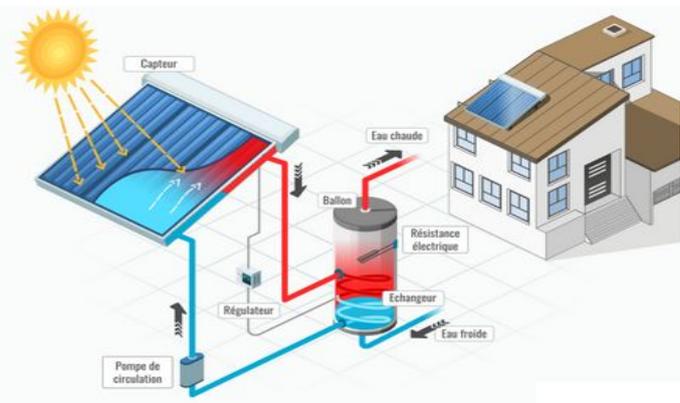
Le fabricant donne les informations ci-contre. Elles ont été obtenues sous un éclairement de 1 000  $W/m^2$ .

1. Évalue le rendement des panneaux FS-385.
2. Les ingénieurs estiment que cette centrale solaire produira une énergie  $E = 120 \text{ GW.h}$  chaque année. Est-ce cohérent avec les données ?

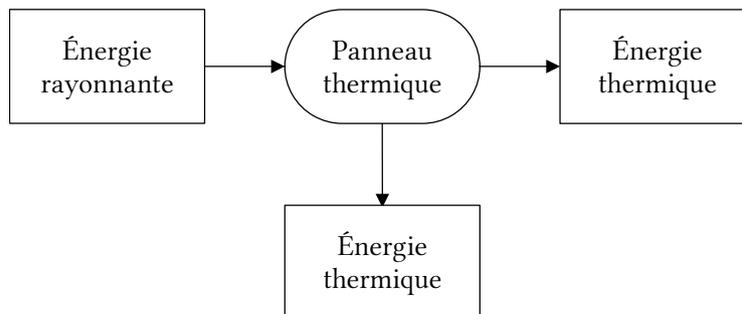
MECHANICAL DESCRIPTION		
Length	1200mm	
Width	600mm	
Cell Type	CdS/CdTe semiconductor, 154 active cells	
Nominal Values		FS-385
Nominal Power(+/-5%)	$P_{MPP}(W)$	85.0
Voltage at $P_{MAX}$	$V_{MPP}(V)$	46.4
Current at $P_{MAX}$	$I_{MPP}(A)$	1.83
Open Circuit Voltage	$V_{OC}(V)$	60.5
Short Circuit Current	$I_{SC}(A)$	1.94

### 3 Les panneaux solaires thermiques

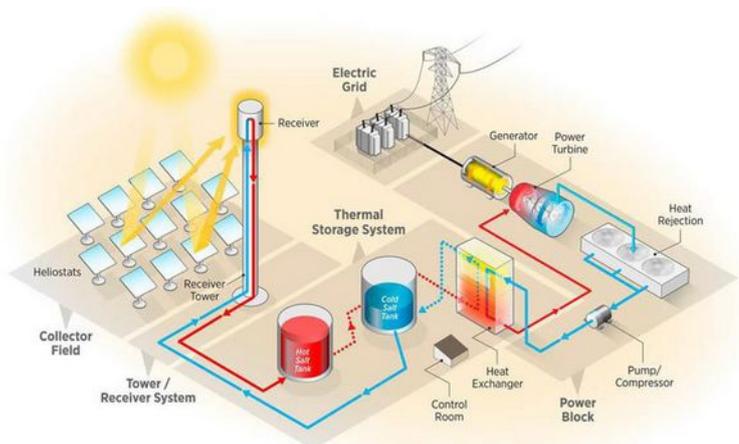
Un **panneau solaire thermique** convertit l'**énergie rayonnante** venant du Soleil en **énergie thermique**. Implanté sur un toit, il est composé d'un **absorbeur** de rayonnement (noir et mat) recouvert d'une vitre sous lequel circule un **fluide caloporteur** (généralement de l'eau glycolé). Un **échangeur thermique** permet de récupérer l'énergie thermique pour produire de l'eau chaude sanitaire.



La chaîne de conversion d'un panneau solaire thermique seul est :



Il existe aussi des **centrales solaires thermiques à concentration** qui récupèrent le rayonnement grâce à des miroirs appelés héliostats. Les rayons réfléchis sont concentrés sur un récepteur (**absorbeur**) dans lequel circule de l'huile synthétique ou des sels fondus (**fluide caloporteur**). Le fluide



caloporteur vient ensuite vaporiser de l'eau à travers un **échangeur**. Cette vapeur met en rotation une turbine à vapeur couplée à un alternateur qui produit de l'électricité.

Comme pour un panneau solaire photovoltaïque, la puissance rayonnante arrivant sur un panneau solaire thermique ou un héliostat se calcule grâce à la formule :

$$P_{\text{rayonnante}} = \Phi_S \times S$$

**Application 6 :** La centrale solaire Andasol est la 3<sup>e</sup> plus grande centrale solaire thermique à concentration d'Espagne et d'Europe. Ses 625 000 héliostats occupent une surface de 510 000 m<sup>2</sup>. Annuellement, elle produit une énergie de 165 GW.h

1. Calcule le rendement énergétique annuel de la centrale d'Andasol.

-----

-----

-----

-----

-----

-----

-----

-----

-----



L'énergie thermique cédée à un fluide caloporteur se calcule grâce à la formule suivante :

$$E_{\text{thermique}} = m \times c_m \times \Delta T$$

Avec :

- $E_{\text{thermique}}$  l'énergie thermique reçue pendant le temps d'étude (en J)
- $m$  la masse de fluide circulant pendant l'étude (en kg).
  - Rappel :  $\underbrace{m}_{\text{kg}} = \underbrace{\rho}_{\text{kg/L}} \times \underbrace{V}_{\text{L}}$
- $c_m$  la capacité thermique massique du fluide caloporteur (en J.kg<sup>-1</sup>.°C<sup>-1</sup> équivalent à J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>)
  - Remarque : une variation de 1 °C correspond à une variation de 1 Kelvin
- $\Delta T$  l'élévation de température du fluide en (en °C ou K)

**Application 7 :** La centrale Andasol dispose de 6 cuves de stockages de sels fondus (3 remplies de sels chauds + 3 pour récupérer les sels « froids »). Les cuves sont des cylindres de 14 mètres de haut et 36 mètres de diamètre. Pendant la nuit l'énergie thermique des sels chauds permet d'assurer la continuité de la production de vapeur pour maintenir la production électrique.



On donne les caractéristiques des sels fondus :

- composition : 50 %  $KNO_3$  + 50 %  $NaNO_3$
- masse volumique :  $\rho = 1\,900\text{ kg/m}^3$
- capacité thermique massique :  $c_m = 1\,500\text{ J.kg}^{-1}.K^{-1}$
- température dans la cuve froide :  $T_F = 290\text{ }^\circ\text{C}$
- température dans la cuve chaude :  $T_C = 385\text{ }^\circ\text{C}$

1. Calcule l'énergie thermique récupérée lors du refroidissement du sel fondu de  $T_C$  à  $T_F$ .  
Exprime le résultat en MW.h.
2. Sachant qu'à pleine puissance les turboalternateurs de la centrale produisent une puissance totale de 150 MW électriques avec un rendement de 37 %, calcule l'autonomie de la centrale à pleine puissance sans Soleil.

-----

-----

-----

-----

-----

-----

-----

-----

-----

-----

-----

-----

-----

-----

-----

-----

-----

-----

-----

-----

-----

-----

-----

★ Complément vidéo : Du solaire au pays de l'or noir



Notes de cours et exercices

A series of horizontal dashed lines for writing notes and exercises.

