

# Spé n° 29

## Les cellules photovoltaïques

*Mots-clefs « photovoltaïque ».*

# 1 Les cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques convertissent l'énergie lumineuse du Soleil en énergie électrique. Comment fonctionnent-elles ?

## La cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique d'épaisseur comprise entre 0,2 et 0,3 mm, et de 10 cm de côté environ. Elle est composée de cinq couches différentes : une couche antireflet, deux couches conductrices (cathode en forme de grille et anode compacte) et deux couches de silicium dopé.

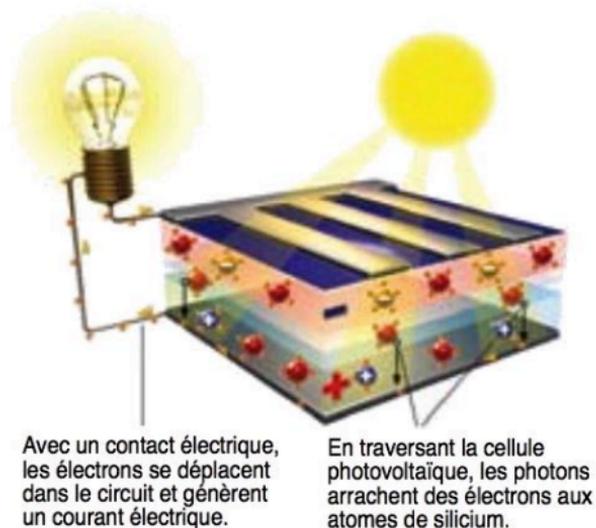
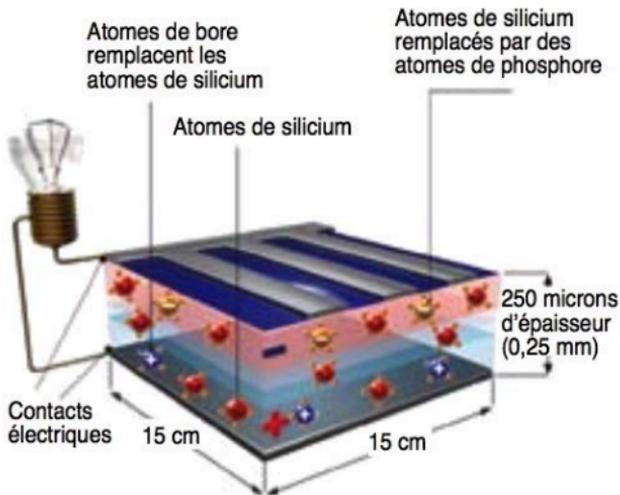


FIG. 1 – Vue en perspective.

Un atome de silicium compte 4 électrons périphériques.  
La couche de silicium supérieure, dite couche n, expo-

sée au Soleil, est dopée avec des atomes de phosphore possédant 5 électrons périphériques, soit un de plus que les atomes de silicium.

La couche de silicium inférieure, dite couche p, est dopée avec des atomes de bore ayant 3 électrons périphériques, soit un de moins que les atomes de silicium (présence d'un trou). La couche n est donc excédentaire en électrons et la couche p est déficitaire.

Lorsque les deux couches sont mises en contact, les électrons en excès de la couche n diffusent dans la couche p. Ainsi, la couche n se charge positivement, tandis que la couche p se charge négativement. Un équilibre se crée et un **champ électrique interne** apparaît. En revanche, une telle jonction pn ne permet pas d'obtenir du courant : lampe éteinte.

## Le rôle du Soleil

Les **photons** du Soleil qui pénètrent dans la cellule photovoltaïque peuvent **arracher des électrons** aux atomes de silicium présents dans les couches n et p.

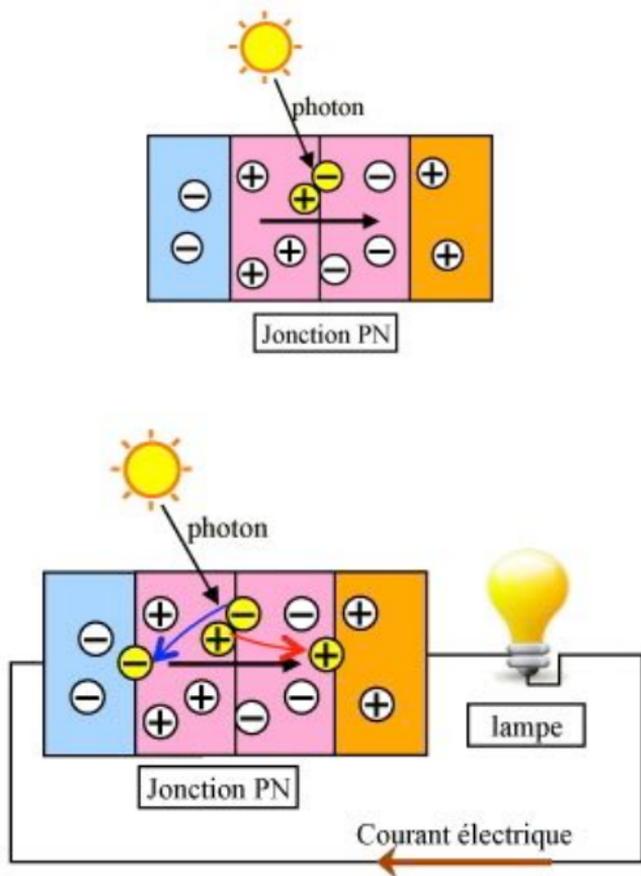


FIG. 2 – Vue en coupe.

Le champ électrique interne à la cellule entraîne les électrons libérés vers la cathode  $\ominus$ , où ils empruntent un circuit extérieur, générant ainsi un courant électrique qui alimente, par exemple, une ampoule électrique. Les électrons rejoignent ensuite l'anode  $\oplus$ , où ils se recombinent

avec des trous.

Plus le nombre de photons absorbés est important, plus le nombre d'électrons libérés, et donc le courant généré, est important. Les cellules sont regroupées en modules formant des panneaux solaires. Aujourd'hui, les rendements énergétiques moyens des panneaux solaires sont de l'ordre de 15 %.

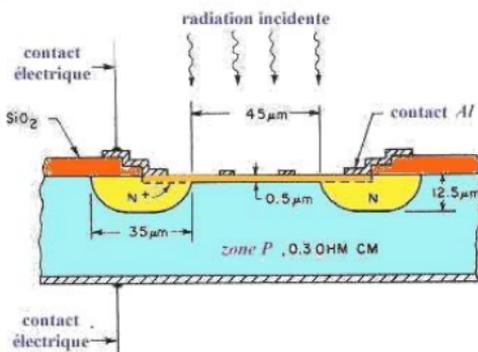


FIG. 3 – Schéma à l'échelle d'une cellule photovoltaïque. Désolé pour les schémas super pourris !

### Question 1

Pourquoi la cathode est-elle une grille et non une plaque comme l'anode ?

La grille est (partiellement) transparente, et donc laisse

passer la lumière du soleil.

### Question 2

Soit  $h \cdot \nu$  l'énergie transportée par un photon et  $\mathcal{E}_g$  le *gap* de la bande interdite du silicium. Quelle inégalité doit exister entre  $\mathcal{E}_g$  et  $h \cdot \nu$  pour qu'un photon arrache un électron à un atome de silicium ?

L'énergie du photon doit être supérieure à celle du *gap*, pour que l'électron gagnant cette énergie puisse franchir la bande interdite :  $h\nu > \mathcal{E}_{\text{gap}}$ .

### Question 3

Quel est le rôle du champ électrique interne dans la cellule photovoltaïque ?

Il entraîne les électrons vers la cathode  $\ominus$ .

### Question 4

De quel(s) paramètre(s) peut dépendre l'intensité du courant électrique débité par la cellule photovoltaïque ?

La luminosité ; la longueur d'onde de la lumière ; la surface de la cellule photovoltaïque ; la transparence de la grille utilisée...

### Question 5

La tension aux bornes d'une cellule photovoltaïque dépend peu de l'éclairement : elle vaut 0,56 V. L'intensité du courant débité, pour une surface exposée perpendiculairement à la direction de lumière solaire, vaut environ  $200 \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$ .

Calculer la puissance électrique,  $\mathcal{P}_E$ , fournie par la cellule photovoltaïque, en  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ .

Par définition, la puissance électrique est égale à la tension multipliée par l'intensité :  $\mathcal{P}_E = UI$ . On nous donne l'intensité par unité de surface de cellule photovoltaïque, donc on va obtenir une puissance en watt (W) par unité de surface (par  $\text{m}^2$ ) :  $\mathcal{P}_E = 0,56 \times 200 = 1,1 \times 10^2 \text{ W/m}^2$ .

### Question 6

La puissance maximale du rayonnement solaire vaut  $\mathcal{P}_S = 1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ . Calculer le rendement de la cellule et l'exprimer en pourcentage. Comparer la valeur trouvée à celle donnée dans le texte.

Par définition, un rendement s'exprime toujours par le rapport de ce que l'on récupère (ici, le courant électrique, de puissance  $\mathcal{P}_E$  précédemment calculée) sur ce que l'on apporte (ici, la rayonnement solaire, de puissance  $\mathcal{P}_S$ ) ;

noté  $\eta$ , c'est un nombre entre 0 et 1 :

$$\eta = \frac{\mathcal{P}_E}{\mathcal{P}_S} = \frac{1,1 \times 10^2}{1000} = 0,11 = 11 \%$$

### Question 7

Commenter la valeur du rendement énergétique moyen des panneaux solaires.

Le rendement est faible... mais c'est de l'énergie « gratuite » ! L'éclairement reçu au niveau du sol en deux heures est suffisant pour couvrir tous les besoins énergétiques de l'humanité pendant un an. En revanche, il faut bien avoir conscience que la fabrication des panneaux solaires est très polluante.

Et au fait, j'espère que vous aimez ma nouvelle présentation des questions (vous ne m'en avez pipé mot). J'ai gardé le fond grisé, mais j'ai changé la numérotation, ce ne sont plus des lettres, mais des numéros.

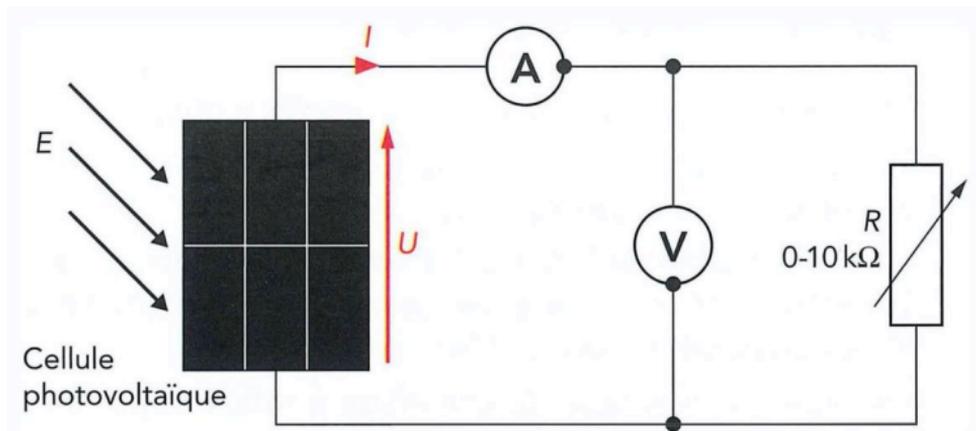
## 2 Caractéristique et rendement d'une cellule photovoltaïque

Lorsqu'elle est éclairée par de la lumière, une cellule photovoltaïque **génère un courant électrique** et **une tension électrique** apparaît entre ses bornes.

Quelle est la caractéristique d'une cellule photovoltaïque ?  
Comment fonctionne-t-elle ?

### 2.1 Caractéristique

- Réaliser le montage ci-contre. La résistance variable est constituée de trois boîtes à décade  $\times 10 \Omega$ ,  $\times 100 \Omega$  et  $\times 1000 \Omega$  en série.



- On note  $E$  l'éclairement de la lampe, mesuré en lux par un luxmètre, ou en watt par mètre carré ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) au pyranomètre. Orienter la lampe pour que l'éclairement soit maximal sans brûler la cellule ! Relever la valeur de  $E$  de l'éclairement au luxmètre et ne plus déplacer ni la lampe ni la cellule.

### Question 8

Sur votre compte-rendu : valeur de l'éclairement  $E$ , en  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ .

- Mesurer la taille de la cellule photovoltaïque et en déduire sa surface  $S$  (attention, bien mesurer la taille de la surface *réellement active* de la cellule!).

### Question 9

Sur votre compte-rendu : surface  $S$  calculée, convertie en  $\text{m}^2$ .

- Compléter le tableau de mesures proposé, en faisant varier la résistance  $R$  des boîtes à décade.

Notez bien que :

— La valeur maximale  $I_{cc}$  est obtenue pour le court-

circuit, c'est-à-dire  $R = 0 \Omega$ .

Le courant maximal peut atteindre 300 mA pour certaines cellules, il faut adapter le calibre de l'ampèremètre en conséquence avant toute mesure, sous peine de « griller » le fusible de l'ampèremètre !

- La valeur nulle  $I = 0$  mA est obtenue en retirant la résistance  $R$ , la tension  $U_{co}$  de la cellule étant alors maximale.

La tension maximale peut atteindre 2 V pour certaines cellules, il faut adapter le calibre de l'ampèremètre en conséquence.

Conseil : procédez par valeur d'intensité décroissante, en augmentant progressivement la valeur de la résistance  $R$  de zéro jusqu'à 11 k $\Omega$ . À aucun moment, l'intensité dans la boîte à décade  $\times 1000 \Omega$  ne doit dépasser son intensité maximale admissible de 25 mA (j'ai vérifié toutes les cellules, aucune ne « monte » aussi haut normalement !).

- Une fois le tableau complété, recopier sur votre compte-rendu les valeurs de l'intensité en court-circuit  $I_{cc}$  et de la tension à vide  $U_{co}$ .

#### Question 10

Sur votre compte-rendu : valeurs de  $I_{cc}$  en mA et de  $U_{co}$  en V.

- Changer alors l'éclairement et relever une nouvelle triplette de valeurs.

#### Question 11

Sur votre compte-rendu : nouvelles valeurs de  $E$ ,  $I_{cc}$  et  $U_{co}$ .

#### Question 12

Sur papier millimétré, tracer la caractéristique courant-tension  $I = f(U)$ . Commenter.

R ( $\Omega$ )				
I (mA)				
U (V)	0,0			
$\mathcal{P}$ (mW)	0,0			

R (k $\Omega$ )				
I (mA)				
U (V)				
$\mathcal{P}$ (mW)				

R (k $\Omega$ )				$\infty$
I (mA)				0,0
U (V)				
$\mathcal{P}$ (mW)				0,0

### Question 13

Une cellule photoélectrique est-elle un récepteur ou un générateur ? Justifier avec la caractéristique précédente.

Il s'agit d'un générateur. La caractéristique  $U = f(I)$  ne passe d'ailleurs pas par l'origine (un composant passif a toujours une caractéristique telle que, si le courant est nul, la tension est aussi nulle). D'ailleurs, la cellule photoélectrique présente une tension à ses bornes, même en l'absence de tout fil de connexion (circuit ouvert).

### Question 14

Que constate-t-on quand on modifie l'éclairement ?

L'intensité ou la tension délivrée augmentent.

## 2.2 Rendement

### Question 15

Pour chaque couple de valeur, calculer la puissance électrique fournie par la cellule, en watt (W) :

$$\mathcal{P} = U \cdot I$$

Compléter ainsi la troisième ligne du tableau.

Il peut être intéressant de chercher à faire le maximum de mesures dans le « coude » du graphique  $\mathcal{P} = f(U)$  (voir ci-dessous). Pour cela, il est plus facile de remplir au fur et à mesure un tableau à l'ordinateur, préalablement préparé avec la formule  $\mathcal{P} = U \times I$  :

	R	U	I	P	
	$\Omega$	V	A	W	
1				=U*I	
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					

FIG. 4 – Préparation d'un tableau de valeurs, avec la formule  $\mathcal{P} = U \cdot I$  pour la puissance.

On aura « recopié vers le bas » la formule donnant la puissance électrique  $\mathcal{P}$ , avant même d'entrer les valeurs. On peut alors facilement ajouter des lignes à ce tableau, afin d'approcher la zone de puissance maximale.

### Question 16

Tracer la caractéristique puissance-tension  $\mathcal{P} = g(U)$ .

Voici quelques valeurs typiques pour un éclairage donné :

R	U	I	P
$\Omega$	V	A	W
0 $\Omega$	7,5 mV	28 mA	210 $\mu$ W
10 $\Omega$	0,346 V	27,3 mA	9,446 mW
20 $\Omega$	0,581 V	25,8 mA	14,99 mW
26 $\Omega$	0,688 V	24,1 mA	16,581 mW
27 $\Omega$	0,703 V	23,8 mA	16,731 mW
28 $\Omega$	0,716 V	23,4 mA	16,754 mW
29 $\Omega$	0,729 V	23,1 mA	16,84 mW
30 $\Omega$	0,74 V	22,8 mA	16,872 mW
31 $\Omega$	0,751 V	22,4 mA	16,822 mW
32 $\Omega$	0,761 V	22,1 mA	16,818 mW
33 $\Omega$	0,771 V	21,8 mA	16,808 mW
34 $\Omega$	0,782 V	21,4 mA	16,735 mW
36 $\Omega$	0,798 V	20,7 mA	16,519 mW
40 $\Omega$	0,826 V	19,5 mA	16,107 mW
50 $\Omega$	0,882 V	16,7 mA	14,729 mW
60 $\Omega$	0,871 V	16,6 mA	14,459 mW
70 $\Omega$	0,896 V	14,4 mA	12,902 mW
80 $\Omega$	0,914 V	12,6 mA	11,516 mW
90 $\Omega$	0,925 V	11,2 mA	10,36 mW
100 $\Omega$	0,934 V	10,1 mA	9,433 mW

FIG. 5 – Valeurs de mesures typiques.

### Question 17

Sur la courbe précédente, déterminer graphiquement la puissance maximale délivrée par la cellule, notée  $\mathcal{P}_m$ , en watt (W).

Une fois le graphique  $\mathcal{P} = f(U)$  tracé, l'usage du réticule permet de trouver la puissance maximale  $\mathcal{P}_m$ , ici :

$$\mathcal{P}_m = 16,856 \text{ mW} \quad (\text{pour } R = 32 \Omega)$$

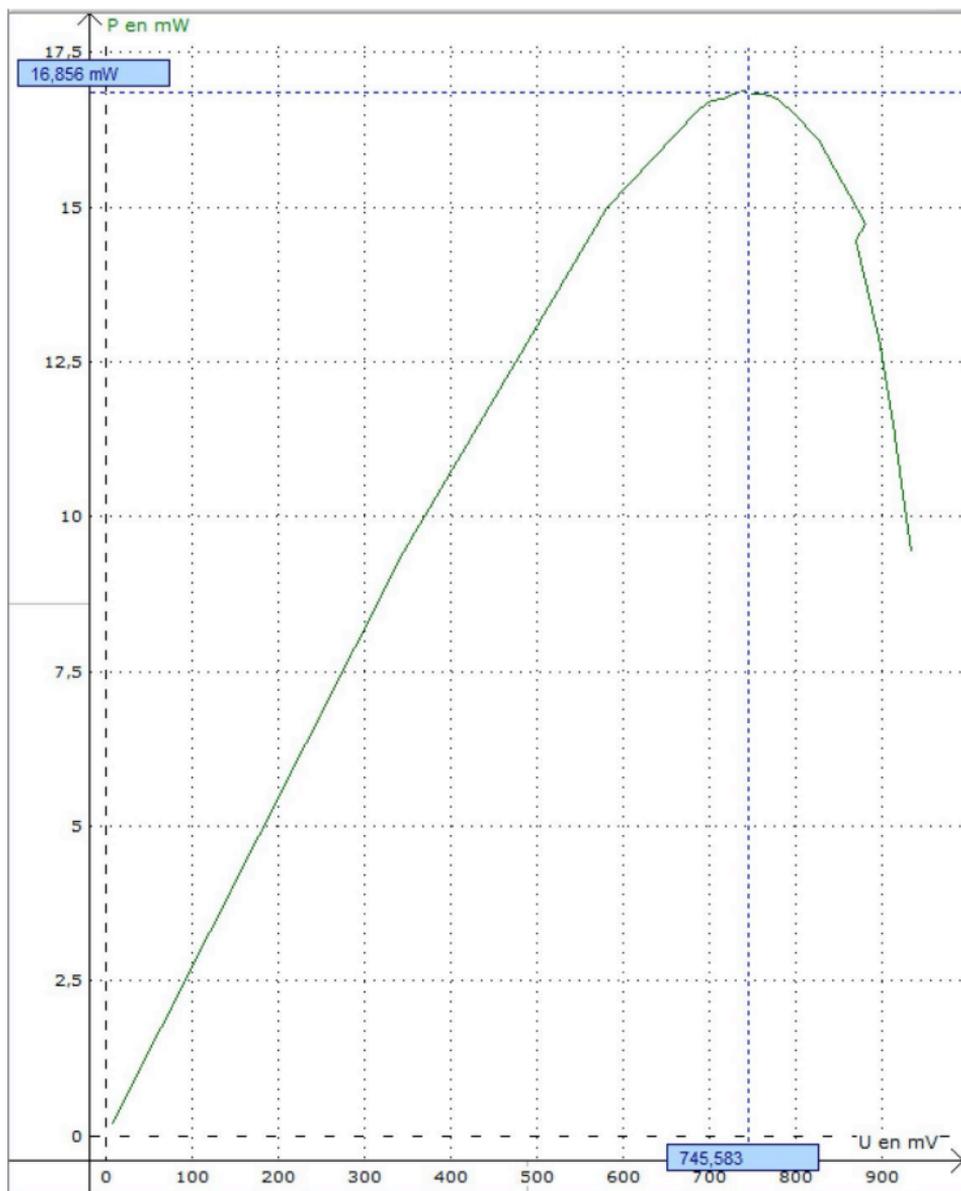


FIG. 6 – Courbe  $\mathcal{P} = f(U)$  et mesure de la puissance maximale, extremum de cette courbe.

Le rendement  $\eta$  (lettre grecque « êta ») d'une cellule photovoltaïque est le quotient de la puissance électrique maximale  $\mathcal{P}_m$  générée par la cellule par la puissance lumineuse  $\mathcal{P}_{\text{lum}}$  reçue :

$$\eta = \frac{\mathcal{P}_m}{\mathcal{P}_{\text{lum}}}$$

La puissance lumineuse reçue s'exprime par  $\mathcal{P}_{\text{lum}} = E \cdot S$  où  $E$  est l'éclairement, exprimé en  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ , et  $S$  la surface de la cellule, exprimée en  $\text{m}^2$ .

On admet que, pour la lumière émise par la lampe, 100 lx correspond à  $1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ .

### Question 18

Exprimer le rendement  $\eta$  en fonction des données  $\mathcal{P}_m$ ,  $E$  et  $S$ . Application numérique. Commenter.

L'énergie lumineuse reçue est donnée par  $\mathcal{P}_{\text{lum}} = E \cdot S$ , avec  $E$  l'éclairement mesuré au pyranomètre et  $S$  la surface du capteur photovoltaïque. À 15 cm de la lampe, un éclairement  $E = 65 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , et la surface du capteur des cellules photovoltaïques est :

$$S = 6,0 \times 3,2 = 19 \text{ cm}^2 = 1,9 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\Rightarrow \mathcal{P}_{\text{lum}} = E \cdot S = 65 \times 1,9 \times 10^{-3} = 0,12 \text{ W}$$

Le rendement s'en déduit :

$$\eta = \frac{\mathcal{P}_m}{\mathcal{P}_{\text{lum}}} = \frac{16,856 \times 10^{-3}}{0,12} = 0,14 = 14 \%$$

