

Mesure du rendement d'une cellule photovoltaïque

Objectifs

- Expliquer qualitativement le fonctionnement d'une cellule photoélectrique.
- s Enjeux énergétiques : rendement d'une cellule photovoltaïque.
- Citer quelques applications actuelles mettant en jeu l'interaction photon-matière (capteurs de lumière, cellules photovoltaïques, diodes électroluminescentes, spectroscopies UV-visible et IR, etc.).
- Déterminer le rendement d'une cellule photovoltaïque.

Classe

Terminale Spé

Durée

2 h

Sur la paillasse

- 1 luxmètre,
- 1 lampe de bureau,
- 2 multimètres,
- une cellule photovoltaïque,
- une résistance variable,
- 3 fils rouges, 3 fils noirs.

Document 1: La cellule photovoltaïque

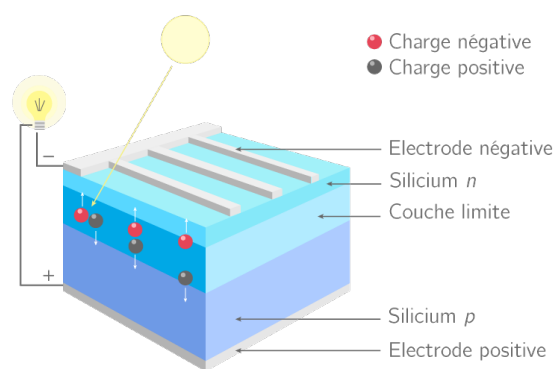


FIGURE 1 – Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

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.

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**. Un atome de silicium compte 4 électrons périphériques. La couche de silicium supérieure, dite couche n, exposée 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.

Document 2: 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.

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 %.

Document 3: Diagramme de niveaux d'énergie dans un semi-conducteur

Dans un solide, l'énergie d'un électron ne peut appartenir qu'à certains intervalles, appelés « bandes » ou « paquets ». Ces bandes d'énergie sont séparées par des « bandes interdites » : l'énergie de l'électron ne peut pas appartenir à ces intervalles.

- La bande de valence (notée BV) regroupe toutes les valeurs d'énergie possibles pour les électrons d'un solide à très basse température, à son état minimal d'énergie.
- La bande de conduction (notée BC) regroupe les valeurs d'énergie possibles supplémentaires lorsque le solide est à un état quelconque d'énergie. La présence d'électrons dans cette bande permet le passage du courant dans le solide.
- Les semi-conducteurs sont une famille particulière de matériaux dont la hauteur énergétique de la bande interdite, le gap, est de l'ordre de grandeur de 1 électronvolt.

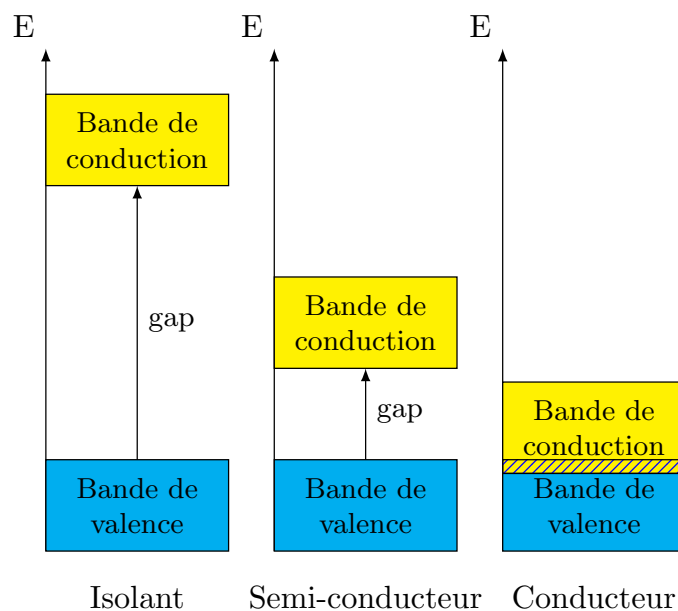


FIGURE 2 – Diagramme d'énergie en fonction du matériau

1 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Question 1: Cathode

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

Solution: La grille est (partiellement) transparente, et donc laisse passer la lumière du soleil.

Question 2: Énergie des photons

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 ?

Solution: 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: Rôle du champ électrique

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

Solution: Il entraîne les électrons vers la cathode \ominus .

Question 4: Intensité générée par la cellule

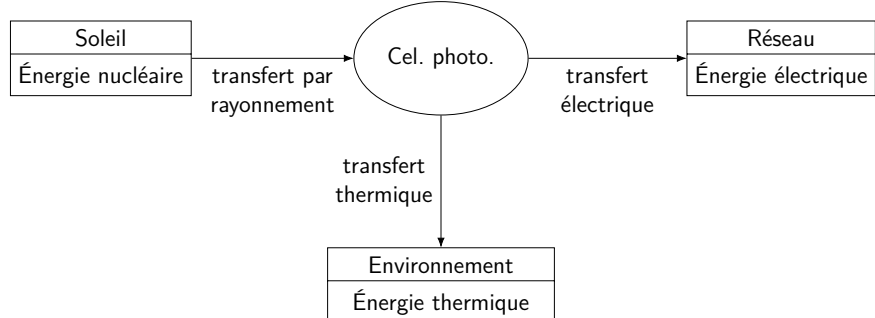
De quel(s) paramètre(s) peut dépendre l'intensité du courant électrique débité par la cellule photovoltaïque ?

Solution: Les paramètres peuvent être : la luminosité ; la longueur d'onde de la lumière ; la surface de la cellule photovoltaïque ; la transparence de la grille utilisée...

Question 5: Chaîne de conversion énergétique

Effectuer la chaîne de conversion énergétique du système "cellule photovoltaïque".

Solution:



Question 6: Puissance électrique

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 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$.

Solution: Par définition, la puissance électrique est égale à la tension multipliée par l'intensité : $\mathcal{P}_E = U \times I$. 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 m^2) : $\mathcal{P}_E = 0,56 \times 200 = 1,1 \times 10^2 \text{ W/m}^2$.

Question 7: Rendement d'une cellule

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.

Solution: 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 η , 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 8: Conclusion

Commenter la valeur du rendement énergétique moyen des panneaux solaires.

Solution: 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.

2 Mesure du rendement de la cellule photovoltaïque

Contexte

Les panneaux solaires constituent un élément clé pour répondre au défi énergétique. Ils sont composés de cellules photovoltaïques dont l'étude permet l'optimisation de l'utilisation des panneaux solaires. Dans ce sujet, on cherche à déterminer la caractéristique d'une cellule photovoltaïque ainsi que son rendement en fonction des conditions d'utilisation.

Document 4: Cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque fournit une tension lorsqu'elle est éclairée, elle se comporte alors comme un générateur. La caractéristique d'une cellule photovoltaïque varie en fonction de l'éclairement reçu.

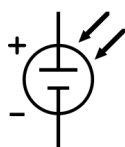


FIGURE 3 – Symbole de la cellule photovoltaïque.

Document 5: Caractéristique d'une cellule photovoltaïque

La caractéristique d'un dipôle correspond au graphique $U = f(I)$. Pour obtenir la caractéristique d'une cellule photovoltaïque, on peut réaliser le montage schématisé ci-contre. Le rhéostat permet de faire varier la résistance du circuit et obtenir ainsi plusieurs couples de valeurs $(U; I)$. La cellule photovoltaïque doit être éclairée de la même manière durant toute l'expérience. Pour cela on placera une lampe de bureau de façon à maximiser l'éclairement reçu par la cellule. On prendra soin de mesurer l'éclairement E avec un luxmètre.

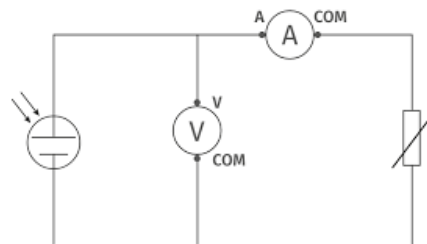


FIGURE 4 – Circuit pour l'étude de la caractéristique de la cellule photovoltaïque.

Expérience réalisée :

On réalise le montage schématisé dans le document 2, permettant de tracer la caractéristique d'une cellule photovoltaïque. La cellule photovoltaïque est éclairée grâce à la lampe de bureau, dont on pourra mesurer l'éclairement à l'aide du luxmètre du laboratoire. L'éclairement s'exprime en lux, de symbole lx et on admettra que 100 lx correspondent à $1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Attention, il ne faut pas coller la lampe à la cellule mais la placer à une quinzaine de centimètres au dessus. Les valeurs de l'intensité du courant fournie par la cellule photovoltaïque, et de la tension à ses bornes, obtenues en faisant varier la résistance du rhéostat, seront rassemblées dans le tableau ci-dessous.

Manipulations

Question 9: Montage du circuit

Monter le circuit du document 2, **sans brancher la cellule photovoltaïque**. Faire attention au calibre des multimètres.

👤 Appel 1

Appeler le professeur pour lui faire vérifier votre montage électrique.

Question 10: Mesure de l'éclairement

Mesurer l'éclairement E à l'endroit où se situe la cellule, sous la lampe. ⚠ On ne fera plus varier la distance entre la lampe et la paillasse.

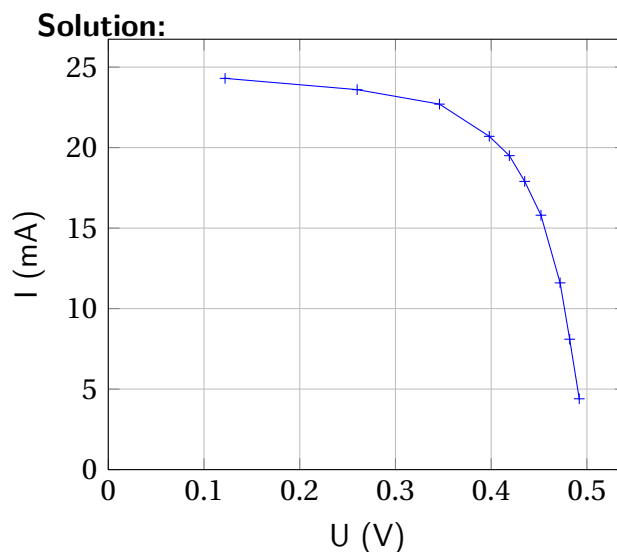
Solution: On mesure $E = 19230 \text{ lx}$.

Question 11: Tracé de la caractéristique.

Compléter la table 1 en faisant varier la valeur de la résistance (on veillera à avoir plus de points où les variations d'intensités sont les plus importantes) et tracer la caractéristique $I = f(U)$ de la cellule photovoltaïque à l'aide d'un tableur.

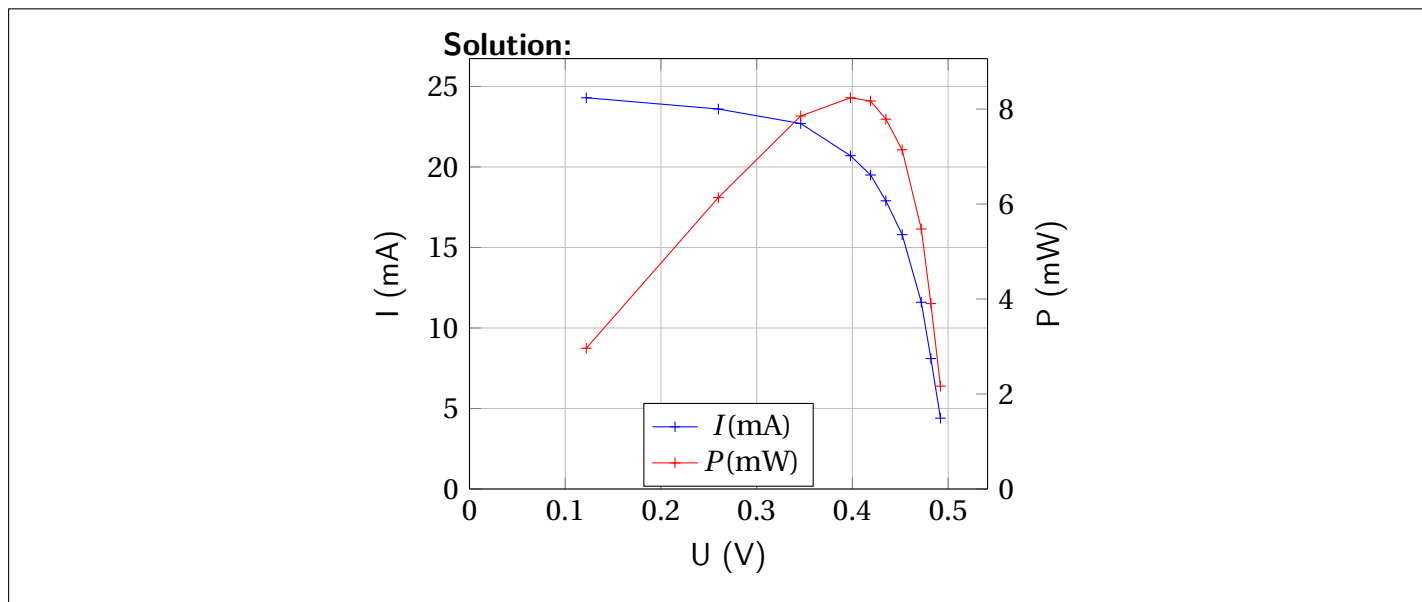
U (V)	0,122	0,260	0,346	0,398	0,419	0,435	0,452	0,472	0,482	0,492
I (mA)	24,3	23,6	22,7	20,7	19,5	17,9	15,8	11,6	8,1	4,4

TABLE 1 – Résultats des mesures.



Question 12: Puissance en fonction de la tension.

Calculer la puissance électrique de manière à pouvoir tracer le graphique $P = f(U)$. Tracer le graphique $P = f(U)$ sur le même graphique que le précédent.



Question 13: **Puissance maximale.**

Déterminer la valeur de la puissance maximum P_{max} par lecture graphique. Cela correspond aux conditions d'optimisation de l'utilisation de la cellule photovoltaïque. Donner les valeurs U et I correspondant aux conditions d'optimisation de la cellule photovoltaïque.

Solution: On lit graphiquement $P_{max} = 8,218 \text{ mW}$, qui correspond à $I_{P,max} = 20,7 \text{ mA}$ et $U_{P,max} = 398,5 \text{ mV}$.

Question 14: **Surface de la cellule photovoltaïque**

Déterminer la surface S de la cellule photovoltaïque.

Solution: On mesure la longueur et la largeur de la cellule photovoltaïque : $S = \ell \times L = 3,5 \text{ cm} \times 4,2 \text{ cm} = 3,5 \times 10^{-2} \text{ m} \times 4,2 \times 10^{-2} \text{ m} = 1,5 \times 10^{-3} \text{ m}^2$

Question 15: **Puissance lumineuse.**

Calculer la puissance lumineuse P_{lum} reçue par la cellule photovoltaïque.

Solution: On a mesuré $E = 19230 \text{ lx}$ ($\triangleleft \times 10$ sur certain luxmètre). Or, $P_{lum} = E \times S = 19230 \text{ lx} \times 1,5 \times 10^{-3} \text{ m}^2 = 192,3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \times 1,5 \times 10^{-3} \text{ m}^2 = 2,9 \times 10^{-1} \text{ W}$.

Question 16: **Rendement de la cellule.**

Déterminer le rendement de la cellule photovoltaïque. Exprimer le rendement en pourcentage. Commenter la valeur obtenue.

Solution:
$$\eta = \frac{P_{elec}}{P_{lum}} = \frac{P_{max}}{P_{lum}} = \frac{8,218 \times 10^{-3} \text{ W}}{2,9 \times 10^{-1} \text{ W}} = 0,028 = 2,8\%$$

Ce rendement est très inférieur aux rendements des cellules photovoltaïques actuelles : les conditions de l'expérience (mesure ponctuelle de l'éclairement, distance entre le capteur et la source de lumière, estimation de la surface,...) et la qualité de la cellule photovoltaïque peuvent expliquer cet écart.