

Thème 02 - Le futur des énergies

Chapitre 01 - Deux siècles d'énergie électrique

Les alternateurs, fournisseurs d'électricité

Un alternateur, comme celui fixé aux roues de certains vélos, produit de l'électricité en faisant tourner un aimant dans une bobine de cuivre : la variation du champ magnétique de l'aimant génère du courant.

I Sur le chemin de l'induction électromagnétique

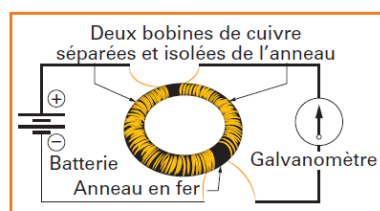
1 Du courant au champ magnétique

- Le magnétisme et l'électricité sont des phénomènes connus depuis l'Antiquité, mais ne sont étudiés et compris qu'au XVII^e siècle.
- Le 21 juillet 1820, le physicien danois Hans Christian Ørsted publie un traité qui relate un phénomène étonnant : une **aiguille aimantée** est **déviée** lorsqu'elle se trouve à proximité d'un fil parcouru par un **courant**. Le passage du courant électrique produit un champ magnétique autour du fil.
- En 1831, le chimiste et physicien anglais **Michael Faraday** tente alors de préciser, expérimentalement, le lien entre magnétisme et électricité.

2 Les expériences électromagnétiques de Faraday

- Faraday pense que le passage du courant dans la bobine de gauche va générer un champ magnétique et que ce dernier, canalisé dans l'anneau de fer, va créer un **courant induit** dans la bobine de droite. Mais, lorsque l'interrupteur est fermé, aucun courant ne circule dans la bobine de droite. L'aiguille du galvanomètre n'indique le passage d'un courant qu'au moment même où l'on ouvre ou ferme l'interrupteur. Ce n'est donc pas le champ magnétique mais sa variation qui crée du courant.
- Faraday réalise alors une autre expérience, avec un aimant qu'il approche et éloigne de la bobine. Le **mouvement de l'aimant**, et plus exactement de son champ magnétique, fait naître un **courant alternatif** induit dans la bobine. Faraday découvre ici le phénomène d'**induction électromagnétique**.

DOC. 1. Le montage expérimental

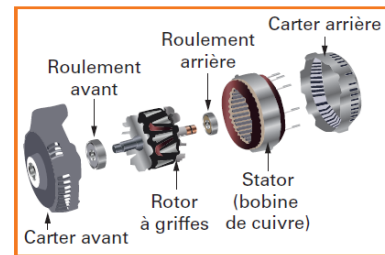


II L'induction exploitée par l'alternateur

1 Le stator et le rotor : deux pièces maîtresses

- Les alternateurs électriques exploitent le phénomène d'**induction électromagnétique**.
- Un alternateur est constitué de deux parties :
 - le stator est la **partie fixe** formée par une ou plusieurs **bobines en cuivre** ;
 - le rotor est la **partie qui tourne** et sur laquelle est fixé l'**aimant**. Plus le rotor tourne vite, plus l'intensité du courant est grande.

DOC. 2. Éclaté de l'alternateur d'une voiture



2 Un rendement efficace

- L'alternateur a pour rôle de **convertir** de l'**énergie mécanique** en **énergie électrique**.
- On trouve des alternateurs dans les éoliennes, les centrales hydrauliques, les usines marémotrices, les automobiles ou les éclairages de vélo (**dynamo**).
- Le rendement d'un alternateur est en général très bon. Les **pertes** sont principalement dues aux **frottements**, qui peuvent survenir au niveau du rotor, et à l'**échauffement du fil de cuivre** de la bobine (effet Joule).

Le rendement se calcule grâce à la formule :

$$\eta = \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie reçue}} = \frac{\text{énergie électrique}}{\text{énergie mécanique}}$$

Le rendement est sans unité et les énergies s'expriment en **joule (J)**.

Les semi-conducteurs et le silicium

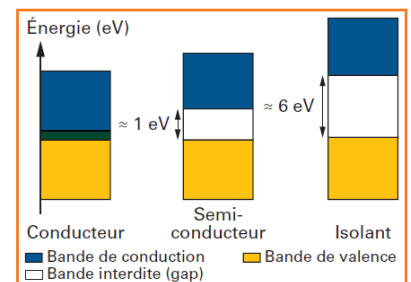
Les **avancées théoriques, en physique, ont permis de montrer pourquoi certains matériaux laissent passer le courant, d'autres lui font barrière, et d'autres encore étaient semi-conducteurs.**

I Les conducteurs, isolants et semi-conducteurs

1 La théorie des bandes et la conductivité

- Le caractère conducteur ou isolant des matériaux prend sa source dans la structure même des atomes et la configuration de leurs électrons.
- On peut schématiser l'énergie des électrons sous la forme de bandes d'énergie. La dernière bande d'énergie, complètement remplie d'électrons, est appelée **bande de valence**, et la suivante, qui n'est pas remplie, est appelée **bande de conduction**. Entre les deux se trouve une zone appelée **bande interdite** ou « gap ».

DOC. 1. Diagrammes énergétiques de trois types de matériaux



2 Le passage d'une bande d'énergie à l'autre

● Pour un **conducteur**, les bandes de valence et de conduction se chevauchent. Les électrons peuvent donc passer d'une bande à l'autre librement. Le courant peut circuler. C'est le cas par exemple du cuivre, de l'argent ou de l'or.

● Pour un **isolant**, les bandes sont très éloignées l'une de l'autre, d'environ 6 eV (électron-volt). Les électrons ne peuvent pas circuler d'une bande à l'autre.

● Pour un **semi-conducteur**, le gap est plus petit que pour un isolant. Il est par exemple de 1,12 eV pour le silicium (Si) et 0,66 eV pour le germanium (Ge). Il peut donc devenir conducteur, si on l'éclaire par exemple, ce qui excite les électrons de valence.

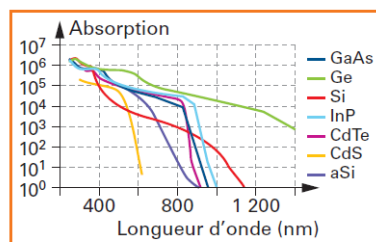
II Les spectres des semi-conducteurs

1 Le spectre d'absorption des semi-conducteurs

● L'écart entre la bande de valence et la bande de conduction d'un semi-conducteur vaut environ 1 eV. Or 1 eV correspond à l'énergie d'une radiation de longueur d'onde d'environ 1 200 nm.

● Les spectres d'absorption du document 2, montrent que la plupart des semi-conducteurs absorbent des longueurs d'ondes inférieures à 1 200 nm, donc suffisantes pour passer le gap et permettre la circulation des électrons.

DOC. 2. Absorption des semi-conducteurs en fonction de la longueur d'onde



2 Pourquoi fabriquer des panneaux solaires avec du silicium ?

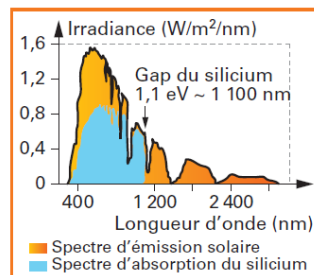
Le **spectre d'émission du Soleil** correspond aux longueurs d'ondes absorbées par le silicium. Toutes les **longueurs d'ondes inférieures à 1 100 nm** peuvent être **absorbées par le silicium** et permettre aux électrons de la bande de valence de passer dans la bande de conduction.



Le silicium en lingots



DOC. 3. Spectre d'émission du Soleil et spectre d'absorption du silicium



À noter

Le germanium (Ge) absorbe également les longueurs d'onde inférieures à 1 100 nm, mais il est plus sensible aux hautes températures, plus cher et moins abondant que le silicium.

Le photovoltaïque pour capter l'énergie solaire

Les cellules photovoltaïques des panneaux solaires ont la capacité de transformer l'énergie solaire en énergie électrique.

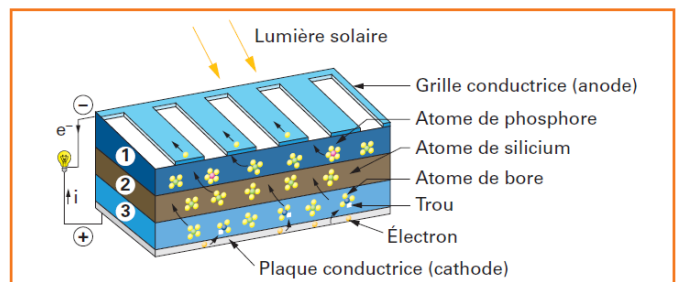
I Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

● La cellule photovoltaïque est souvent composée de silicium, un matériau semi-conducteur qui devient conducteur quand on l'éclaire.

● Afin de favoriser la **circulation des électrons** et le **passage du gap**, on introduit dans le silicium des impuretés comme le bore et le phosphore.

Le **bore** a un électron de moins que le silicium, ce qui crée un « trou », équivalant à une charge positive. On parle de **dopage de type P**, comme « positif ». Le **phosphore** a un électron de plus que le silicium. On parle de **dopage de type N**, comme « négatif ».

DOC. 1. Structure et fonctionnement d'une cellule photovoltaïque



● Spontanément, les électrons en excès de la couche de silicium dopé N (phosphore) ① diffusent dans la couche de silicium dopé P (bore) ③, déficiente en électrons. Une jonction en silicium ② se forme alors et un équilibre interne se met en place.

● Les **photons du Soleil** reçus par la grille conductrice arrachent des électrons aux atomes de silicium de la couche ①, ce qui crée un **déséquilibre interne**. Les électrons de la cathode migrent alors vers la couche ③, tandis que ceux des couches ①, ② et ③ rejoignent l'anode conductrice. Cette circulation d'électrons génère un **courant électrique**.

● Plus le nombre de photons est important, plus l'intensité du courant est grande.

II Optimiser la puissance des cellules photovoltaïques

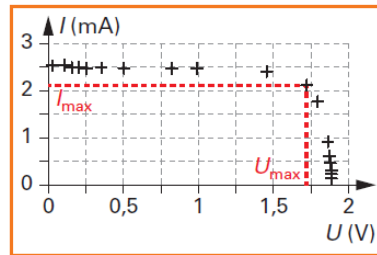
Pour connaître la puissance électrique maximale d'une cellule photovoltaïque, il faut tracer la caractéristique intensité-tension (doc. 2) à l'aide d'un rhéostat.

Cette courbe représente l'évolution de la tension aux bornes de la cellule en fonction de l'intensité du courant qui la traverse.

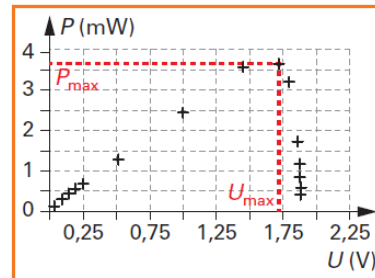
Mot clé

Un rhéostat est une résistance qui permet de faire varier l'intensité dans un circuit électrique.

DOC. 2. Caractéristique intensité-tension, Courbe $I = f(U)$



DOC. 3. Puissance électrique d'une cellule, Courbe $P = f(U)$



Pour obtenir la courbe du doc. 3, on utilise la caractéristique intensité-tension et on met en ordonnée la puissance, calculée en appliquant la relation $P = U \times I$. Cette courbe fait apparaître une puissance électrique maximale P_{\max} délivrée par la cellule pour une valeur de tension U_{\max} . Grâce à la courbe du doc. 2, on en déduit la valeur I_{\max} du courant. Puis, on applique la loi d'Ohm $U = R \times I$, pour en déduire la valeur de la résistance qui maximise la puissance.



Des centrales solaires flottantes

Sur l'eau, le taux d'ensoleillement est maximal. En Chine, plus de 120 000 panneaux photovoltaïques ont été installés à Huainan sur un lac artificiel (anciennement une mine de charbon) et alimentent annuellement 15 000 foyers.



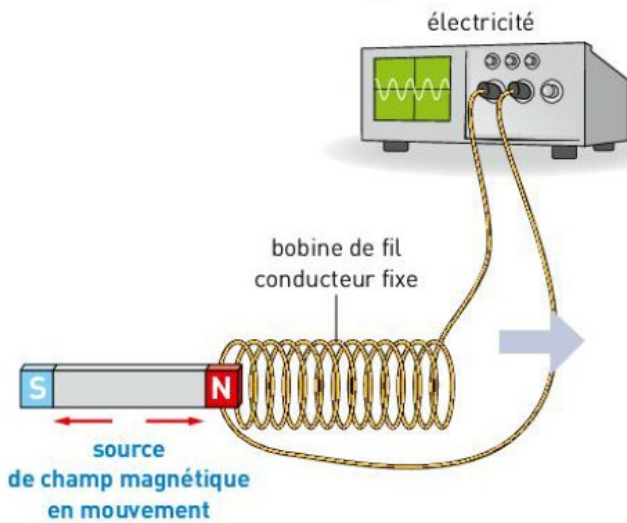
Le vocabulaire à retenir

- **Alternateur** : dispositif qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.
- **Capteur photovoltaïque** : dispositif qui convertit la lumière en électricité.
- **Champ magnétique** : cartographie du magnétisme dans l'espace engendré par une source magnétique comme un aimant.
- **Énergie quantifiée** : énergie qui ne peut prendre que certaines valeurs.
- **Énergie radiative** : forme d'énergie qui se manifeste par un rayonnement.
- **Induction électromagnétique** : création d'un courant électrique dans un conducteur soumis à un champ magnétique variable.
- **Photon** : particule de lumière.
- **Rendement** : grandeur qui évalue l'efficacité d'une conversion d'énergie.
- **Semi-conducteur** : isolant électrique qui peut devenir facilement conducteur par apport d'énergie.
- **Spectre d'émission** : figure obtenue par décomposition de la lumière.

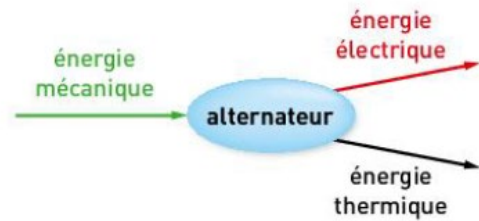
Résumé

1 L'alternateur et la production d'électricité

Lien entre électricité et magnétisme



Conversion d'énergie et rendement



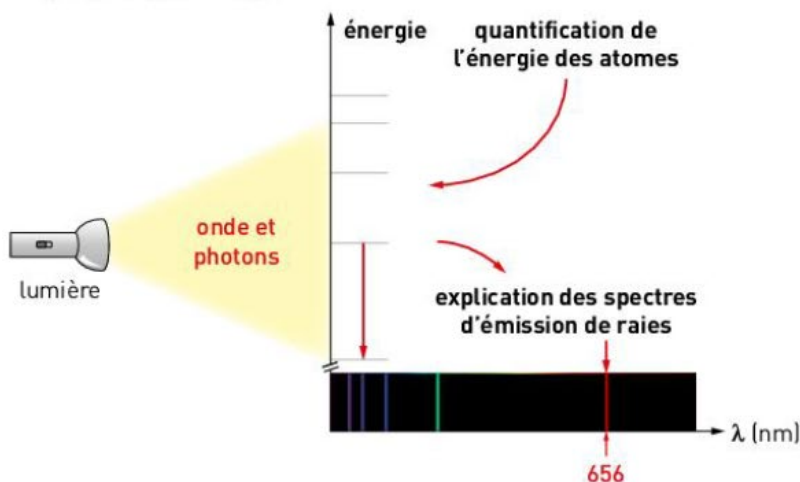
$$\eta = \frac{E_{\text{utile}}}{E_{\text{fournie}}} = \frac{E_{\text{électrique}}}{E_{\text{mécanique}}} \quad \text{ou} \quad \eta = \frac{P_{\text{électrique}}}{P_{\text{mécanique}}}$$

η sans unité ; E en J ; P en W

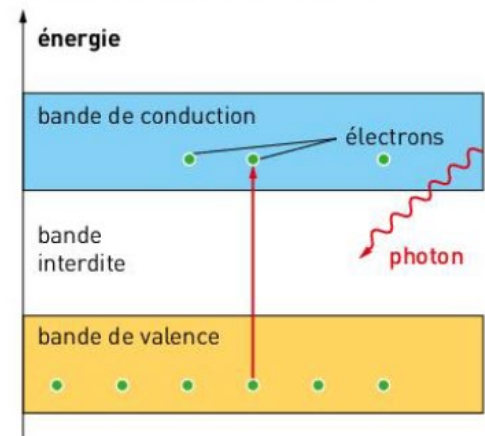
$\eta \leq 1$, dans les centrales : $\eta_{\text{alternateur}} \approx 0,95$

2 De la physique quantique aux cellules photovoltaïques

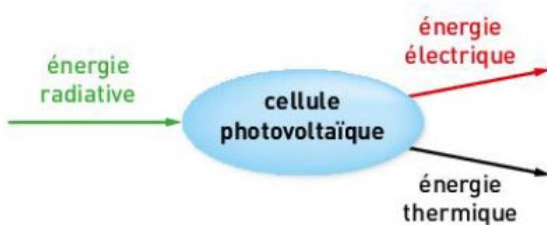
Physique quantique



Effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs

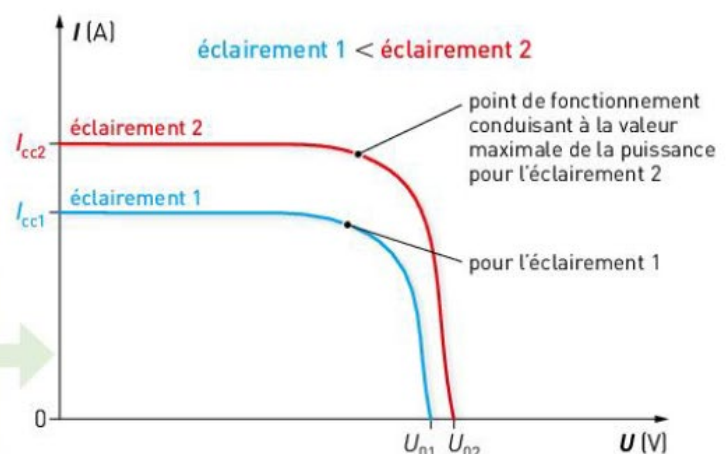


Conversion d'énergie et caractéristique des cellules photovoltaïques



- I_{cc} : intensité de court-circuit (en A) pour $U = 0$ V
- U_0 : tension à vide (en V) pour $I = 0$ A
- Puissance : $P = U \cdot I$
- Résistance qui permet de maximiser la puissance (en Ω) :

$$R_m = \frac{U_m}{I_m} \quad \begin{matrix} \leftarrow \text{en V} \\ \leftarrow \text{en A} \end{matrix}$$

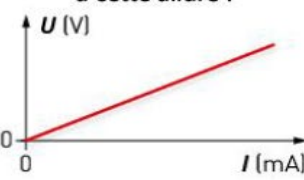
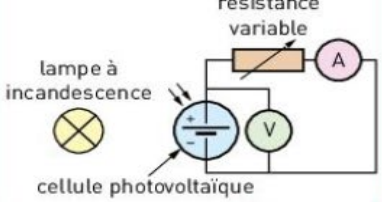


Exercices**0/Répondre aux questions suivantes :**

___ 1 ___ Comment génère-t-on un courant induit alternatif dans une bobine ?	___ 2 ___ Quel est le type de conversion d'énergie qui s'effectue au sein d'un alternateur ?	___ 3 ___ Quelles sont les deux parties principales d'un alternateur ?	___ 4 ___ Quel phénomène principal peut limiter le rendement d'un alternateur ?
___ 5 ___ Qu'est-ce qu'un semi-conducteur ?	___ 6 ___ Un semi-conducteur peut-il être utilisé dans une cellule photovoltaïque ?	___ 7 ___ Quels types de radiations solaires sont principalement absorbés par les semi-conducteurs ?	___ 8 ___ Quelle type de conversion effectue un panneau photovoltaïque ?

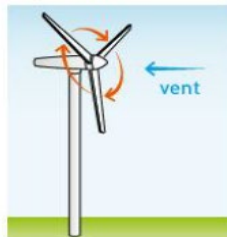
1 Question à choix multiples

Choisir la ou les bonne(s) réponse(s).

	1	2	3
A - L'alternateur :	convertit l'énergie électrique en énergie mécanique.	convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.	exploite le lien entre électricité et magnétisme.
B - Le rendement d'un alternateur se calcule :	$\eta = \frac{E_{\text{électrique}}}{E_{\text{mécanique}}}$	$\eta = \frac{P_{\text{électrique}}}{P_{\text{mécanique}}}$	$\eta = \frac{E_{\text{mécanique}}}{E_{\text{électrique}}}$
C - Une cellule photovoltaïque :	convertit l'énergie radiative en énergie électrique.	convertit l'énergie thermique en énergie électrique.	exploite les principes de la physique quantique.
D - La caractéristique d'une cellule photovoltaïque :	a cette allure : 	dépend de l'éclairement.	se trace avec le montage suivant : 

2 Appliquer le cours

Voici ci-contre un dispositif permettant d'obtenir de l'électricité :

Parmi les affirmations suivantes, dire en justifiant lesquelles concernent ce dispositif.

- Il possède un alternateur.
- Il convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.
- Il convertit l'énergie radiative en énergie électrique.
- Il exploite les lois de l'électromagnétisme.
- Il exploite les principes de la physique quantique.

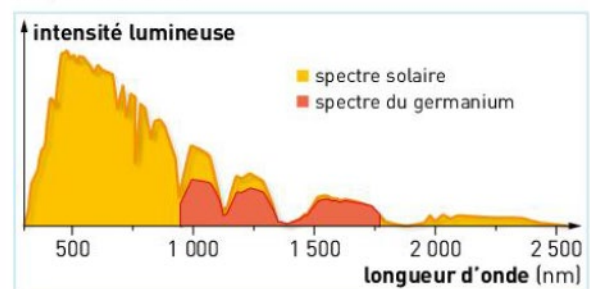
3 Comprendre le cours

L'usine marémotrice de la Rance convertit l'énergie mécanique des marées en énergie électrique. Elle produit en moyenne une énergie journalière de 1,3 GWh.

- Quel est le nom du dispositif qui permet cette conversion d'énergie ?
 - Représenter cette conversion d'énergie.
- On estime que ce dispositif reçoit 1,4 GWh d'énergie mécanique. Calculer le rendement correspondant.

5 Exploiter un graphe

Le germanium est un semi-conducteur. La figure ci-dessous indique son spectre d'absorption ainsi que le spectre solaire.



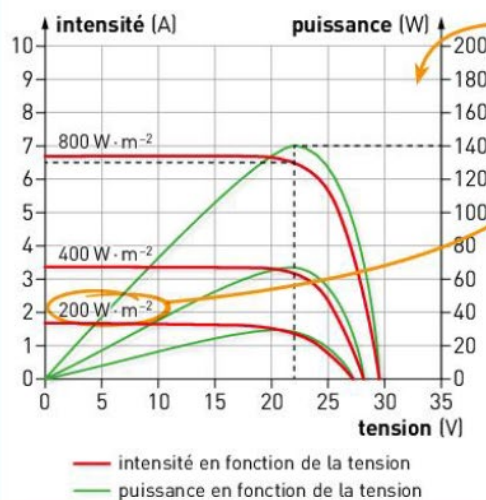
- Justifier l'utilisation du germanium dans les semi-conducteurs.
- Citer un domaine dans lequel on utilise les semi-conducteurs et un exemple d'utilisation.

6 Étude d'un panneau photovoltaïque

On considère un panneau photovoltaïque auquel est associé le document ci-contre. Ce panneau reçoit un éclairement de $800 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

1. a. Relever la valeur de la puissance électrique maximale P_m .
 - b. Relever le couple (I_m, U_m) correspondant à la puissance maximale.
 - c. Calculer la résistance R_m de fonctionnement maximisant la puissance.
2. Décrire l'évolution de l'intensité de court-circuit et la puissance électrique maximale quand l'éclairement augmente.

Intensité et puissance en fonction de la tension



Les clés de l'énoncé

- Il y a la **superposition** des courbes $I = g(U)$ et $P = f(U)$ pour différentes valeurs de l'éclairement.
- L'éclairement est exprimé en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$.

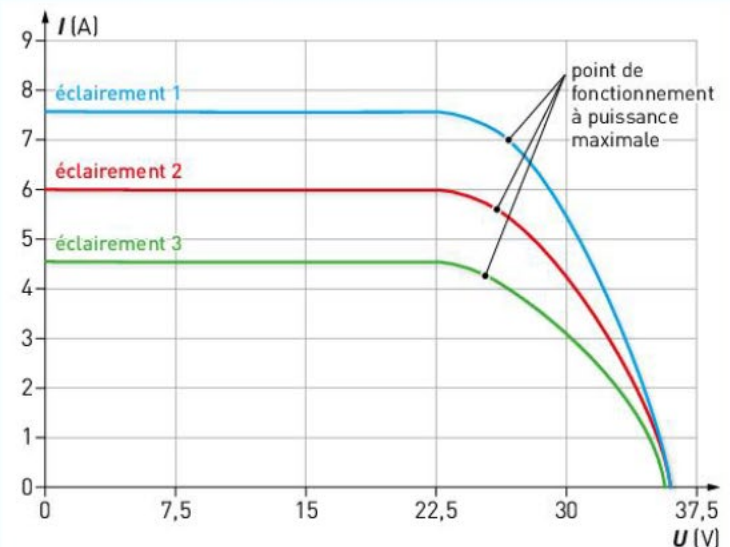
Les questions à la loupe

- **Relever** : lire sur un document fourni.
- **Calculer** : appliquer une formule mathématique pour trouver la valeur d'une grandeur physique.
- **Décrire l'évolution** : indiquer si la grandeur augmente, diminue ou reste identique.

7 Un panneau solaire

On obtient la courbe ci-contre pour un panneau photovoltaïque.

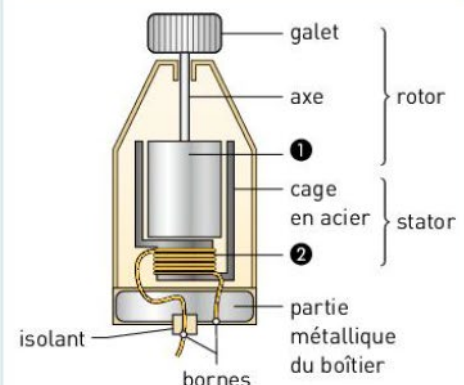
1. Nommer ce type de courbe.
2. Classer les éclairements du plus faible au plus fort.
3. Pour l'éclairement 2, déterminer :
 - a. l'intensité de court-circuit ;
 - b. la tension à vide ;
 - c. le couple (I_m, U_m) de puissance maximale ;
 - d. la résistance maximisant la puissance.



8 À bicyclette

Sur certaines bicyclettes, ce que l'on appelle couramment « dynamo » est en réalité un alternateur. Le galet est entraîné par la roue. Le rendement de ce dispositif est de 0,4.

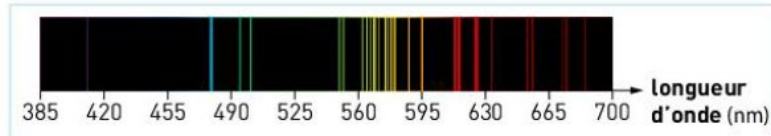
1. a. Nommer les éléments numérotés ① et ② sur le schéma.
 - b. Expliquer le rôle de chacun.
 - c. Justifier les appellations « rotor » et « stator ».
2. a. Représenter la conversion d'énergie qui a lieu dans l'alternateur.
- b. Interpréter alors la phrase en italique.
 - c. Proposer une expérience pour vérifier que la rotation du rotor autour du stator produit bien de l'électricité.



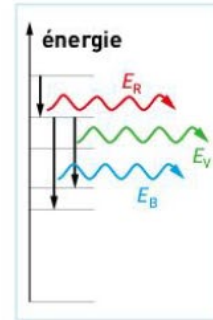
10 Le silicium

Le silicium est l'élément le plus utilisé dans les cellules photovoltaïques. Le diagramme d'énergie de l'atome de silicium (a) et celui d'un cristal de silicium (b) sont représentés ci-contre. Pour le cristal de silicium, du fait du très grand nombre d'atomes, les niveaux d'énergie sont regroupés en bandes. Parmi ces bandes, on distingue la bande de valence et la bande de conduction. Le passage des électrons de la bande de valence à la bande de conduction engendre un courant électrique.

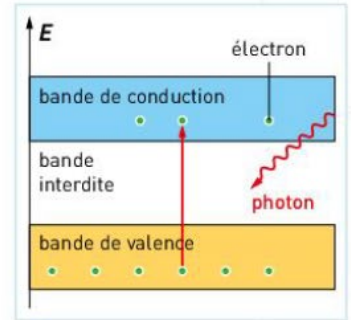
- Pourquoi peut-on dire que ces diagrammes illustrent la quantification de l'énergie à l'échelle de l'infiniment petit ?
- a. Quel diagramme permet d'expliquer la figure ci-dessous ? Expliquer.



- Quel diagramme illustre l'effet photovoltaïque ? Justifier.



a Diagramme d'énergie de l'atome de silicium.



b Diagramme d'énergie du cristal de silicium.

c Spectre d'émission du silicium.

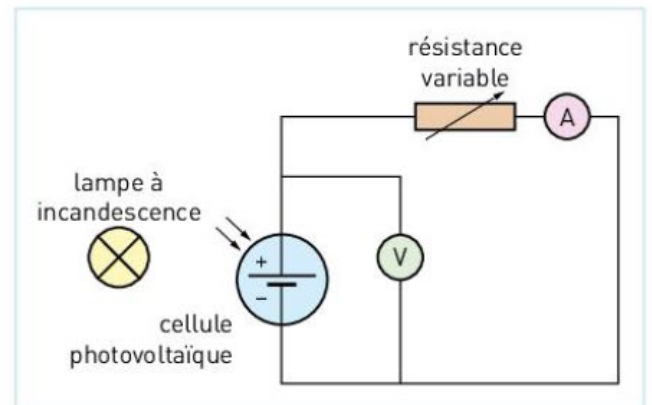
Coup de pouce
Sur les diagrammes a et b, les flèches vers le bas sont en lien avec l'émission de lumière, celles vers le haut avec l'absorption de lumière.

11 Étude expérimentale d'une cellule photovoltaïque

Un fabricant fournit les données suivantes pour une cellule photovoltaïque en silicium monocristallin utilisée pour l'habitat :

Pour un éclairement standard de $1\,000\text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$:
 Puissance maximale (P_m) = 5 W ;
 Tension à vide (pour $I = 0\text{ A}$) $U_0 = 21\text{ V}$;
 Intensité de court-circuit (pour $U = 0\text{ V}$) $I_{cc} = 410\text{ mA}$.

Pour vérifier les informations indiquées, on réalise le montage expérimental dont le schéma est représenté ci-contre. On obtient les mesures suivantes :

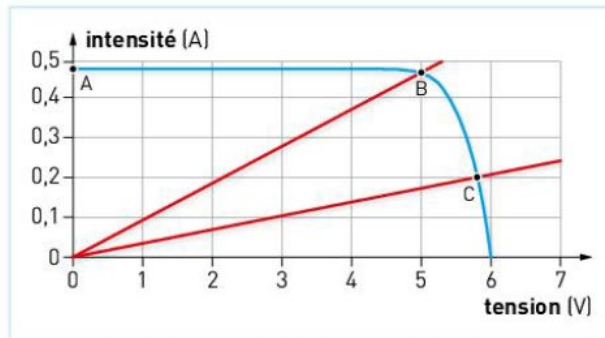


$U\text{ (V)}$	20,8	19,9	18,8	17,5	15,8	13,5	7,5	4,4	0,061
$I\text{ (mA)}$	0,0	45,5	84,1	116	150	173	200	210	224

- a. Dans cette expérience, quel appareil permet de mesurer l'intensité du courant électrique ?
- b. Dans cette expérience, quel appareil permet de mesurer la tension aux bornes de la cellule ?
2. Sur une feuille de papier millimétré ou à l'aide d'un logiciel tableur-grapheur, tracer la caractéristique $I = f(U)$.
3. Pour chaque mesure, calculer la puissance $P = U \cdot I$.
4. a. Comparer les données du fabricant et celles obtenues lors de l'expérience.
- b. Proposer une explication à ces différences.

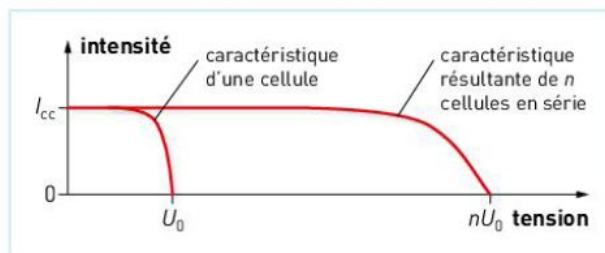
12 Associations de cellules

Une cellule photovoltaïque a la caractéristique ci-dessous.



On considère 3 points de fonctionnement notés A, B et C.

1. Parmi les points A, B et C, déterminer, en justifiant, celui qui conduit à la puissance maximale.



a Caractéristique de n cellules en série.

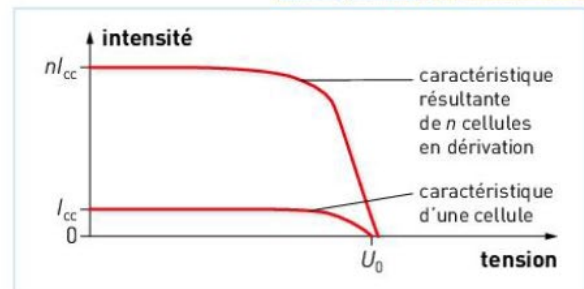
2. a. Montrer que les droites tracées ont pour coefficient directeur : $1/R$ avec R la résistance du circuit.

b. Déterminer la valeur R_m de la résistance maximisant la puissance.

3. On associe 5 cellules en série puis 5 cellules en dérivation. Les figures ci-dessous indiquent l'évolution des caractéristiques pour n cellules associées en série (a) et n cellules associées en dérivation (b).

Déterminer pour chaque association l'intensité de court-circuit I_{cc} et la tension à vide U_0 .

4. Dans les panneaux photovoltaïques, les cellules sont associées en série et en dérivation. Quel intérêt cela présente-t-il ?



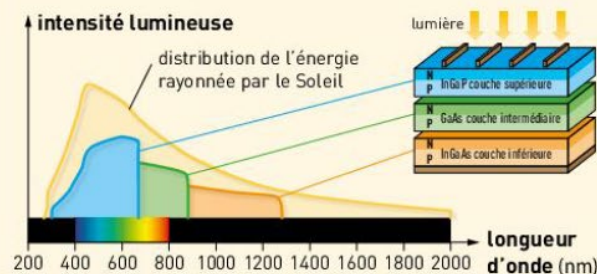
b Caractéristique de n cellules en dérivation.

14 La cellule triple jonction

La cellule photovoltaïque triple jonction est constituée de trois semi-conducteurs différents : la couche supérieure en phosphore d'indium-gallium InGaP, une deuxième couche en arséniure de gallium GaAs, puis une couche inférieure en arséniure d'indium-gallium InGaAs. Cette technologie permet d'améliorer grandement le rendement des cellules photovoltaïques qui se situe autour de 15 % pour une technologie au silicium monocristallin.

Document 1 : Comparaison de spectres

Sur le graphique ci-dessous sont représentées la distribution en longueur d'onde de l'énergie rayonnée par le Soleil et la sensibilité en longueur d'onde de la cellule triple jonction.



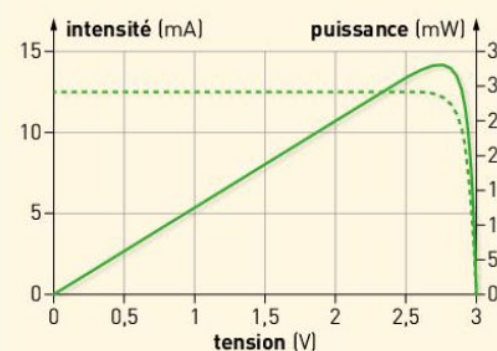
Document 3 : Rendement d'une cellule photovoltaïque

Le rendement (en %) d'une cellule photovoltaïque est défini par la relation suivante :

$$\eta = \frac{\text{puissance électrique maximale délivrée par cellule}}{\text{puissance lumineuse reçue par cellule}} \times 100$$

Document 2 : Caractéristique intensité-tension

Caractéristique intensité-tension de la cellule triple-jonction de surface $S = 8,9 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ avec un éclairement de $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$:



----- évolution de l'intensité du courant électrique en fonction de la tension.

----- évolution de la puissance électrique délivrée en fonction de la tension.