

Chapitre 5 : Deux siècles d'énergie électrique

Présentation	2
Activités	5
Activité documentaire 1 : La production d'électricité (p. 100-101)	5
Activité documentaire 2 : Fonctionnement et rendement d'un alternateur (p. 102)	9
Activité documentaire 3 : Étude d'une cellule photovoltaïque (p. 103)	11
Activité numérique : Étude d'une cellule photovoltaïque en version expérimentale	15
Activité documentaire 4 : Le capteur photovoltaïque (p. 104-105)	18
Bilan (p. 107)	20
Exercices	21
Zone d'échauffement (p. 108)	21
L'atelier des apprentis (p. 109)	23
Le repaire des initiés (p. 110-111)	25
Le coin des experts (p. 112)	29

Présentation

Le chapitre 5 propose dans un premier temps une approche historique du développement des concepts clés de l'électromagnétisme à l'origine des générateurs d'électricité. En effet, les expériences historiques réalisées au début du XXI^e siècle par le danois Hans Christian Ørsted et l'anglais Michael Faraday posent les bases du développement de l'électromagnétisme et de son formalisme quelques décennies plus tard par James Clerk Maxwell. Le phénomène d'induction, mis en évidence par Faraday, est au centre du principe de l'alternateur, dispositif utilisé dans la majeure partie des installations produisant de l'électricité de nos jours. Devant les enjeux environnementaux de notre époque, produire de l'électricité sans contribuer au réchauffement climatique est un objectif majeur de la transition climatique et environnementale. C'est dans cet esprit que le chapitre propose une étude des capteurs photovoltaïques et de leurs composants fondamentaux : les semi-conducteurs. Le défi majeur étant de pouvoir construire des cellules photovoltaïques dont le rendement est suffisamment important pour pouvoir être compétitif face à d'autres moyens de production d'électricité, tels que les centrales nucléaires par exemple.

Ce qui a été enseigné en seconde :

- Le spectre électromagnétique et la longueur d'onde : les élèves ont appris que la lumière n'est qu'un cas particulier d'un phénomène plus général que l'on appelle les ondes électromagnétiques. Celles-ci sont caractérisées par une grandeur appelée longueur d'onde. Les valeurs que peut prendre cette longueur d'onde permettent de « classer » les ondes électromagnétiques dans différentes catégories ou domaines (rayons X, gamma, visible, IR, UV, ondes radios, etc.). En suivant ce critère, les élèves ont pu voir que les valeurs des longueurs d'onde de la lumière visible s'étendent de 400 nm à 800 nm.
- Les élèves ont également appris à caractériser les différents spectres d'émission : d'une part, les spectres continus d'origine thermique et émis par un corps à une température donnée ; d'autre part, les spectres de raies émis par un gaz chauffé. Pour ce dernier point, le spectre de raies d'un gaz ne contenant qu'un seul élément chimique constitue une carte d'identité de cet élément. Par l'analyse d'un spectre d'émission de raies d'un gaz chauffé, on peut identifier la présence de certains éléments chimiques (voir le spectre des étoiles).

Ce qui a été enseigné en première :

- La partie 2 du programme d'Enseignement scientifique, intitulée « Le Soleil, notre source d'énergie », a été l'occasion d'approfondir l'étude du rayonnement solaire et de son impact sur la Terre en travaillant les notions suivantes :
 - spectre du rayonnement émis à la surface du Soleil en utilisant le modèle du corps noir ;
 - relation entre la longueur d'onde du rayonnement d'intensité maximale et la température absolue de surface (loi de Wien) ;
 - analyse du spectre d'émission du Soleil ;
 - étude de la puissance émise et radiative reçue par le Soleil ;
 - bilan radiatif terrestre, en tenant compte de la courbe d'absorption de l'atmosphère terrestre.

L'objectif général étant la compréhension de la relation entre le rayonnement solaire, sa nature et ses caractéristiques, et le bilan énergétique terrestre.

- Exploiter la caractéristique d'un dipôle électrique : point de fonctionnement, modélisation par une relation $U = f(I)$ ou $I = g(U)$. Les élèves ont appris à exploiter ou construire la caractéristique d'un dipôle. Ils ont pu également travailler les capacités numériques suivantes :
 - représenter un nuage de points associé à la caractéristique d'un dipôle ;
 - modéliser la caractéristique d'un dipôle à l'aide d'un langage de programmation.

Lien(s) avec les chapitres précédents ou suivants du manuel :

Le chapitre 6 aborde les avantages et les inconvénients de la production d'électricité sans combustion, c'est l'occasion de remobiliser les connaissances sur l'alternateur et les cellules photovoltaïques ainsi que les rendements de conversion.

Le chapitre 7 évoque le transport de l'électricité et la notion de courant alternatif, déjà introduite dans l'activité 1.

Bibliographie :

- R. Feynman, R. Leighton et M. Sands, *Les cours de physique de Richard Feynman*, Dunod, nouvelle édition 2018 : collection classique qui regorge de petits exemples ou d'interprétations physiques de phénomènes de la vie courante avec un contenu théorique important. À l'usage de l'enseignant uniquement.
- C. Ngô et H. Ngô, *Physique des semi-conducteurs*, Dunod, 1998.
- L. Chancelier, E Laurent, *Électricité photovoltaïque*, Gret, 1996.
- G. Moine, *L'électrification solaire photovoltaïque*, Observ'ER, 2016.

Sitographie :

- Le site de la Royal Society sur Michael Faraday : <https://www.rigb.org/our-history/people/f/michael-faraday>.
- Une vidéo sur le fonctionnement de l'alternateur : <https://youtu.be/0j2uS78H8Qs>.
- Des informations sur l'électricité et son histoire, d'Ampère à Maxwell, en passant par Faraday : <http://www.ampere.cnrs.fr/?lang=fr>.
- L'histoire de l'électricité en 3 vidéos de la BBC (en anglais) : <http://www.pearltrees.com/t/ils-ressources-terminale-es/theme-2-le-futur-des-energies/id25533525/item262065770>.
- Une vidéo sur l'utilisation de l'électricité : <https://youtu.be/O77ZvlwCd>.
- Le site du CEA : www.CEA.fr,
et plus particulièrement le livret sur les énergie du XXI^e siècle :
<http://www.cea.fr/multimedia/Pages/editions/livrets-thematiques/energies-du-21e-siecle.aspx>.

Idées d'activités alternatives ou complémentaires :

- Caractéristiques d'un alternateurs : à l'aide d'une maquette d'alternateur, montrer les différents paramètres qui influencent son rendement.
- Séance de classe inversée : proposer aux élèves de réaliser une vidéo de 3-4 minutes en *stop motion* (utilisation d'un *smartphone* et d'un logiciel gratuit du type *stop motion studio*) sur l'un des concepts clés du chapitre :
 - le principe de fonctionnement de l'alternateur ;

- le principe de fonctionnement d'un semi-conducteur ;
- le phénomène d'induction ;
- la cellule photovoltaïque.

Activités

L'enchaînement des activités permet de parcourir 200 ans de production d'énergie électrique. En proposant une approche historique, l'activité 1 permet de comprendre les notions fondamentales et l'origine des phénomènes électromagnétiques utilisés encore de nos jours dans la production d'électricité. Les notions de fonctionnement et de caractéristiques d'un alternateur sont abordées de manière plus approfondies dans l'activité 2. Enfin, devant les défis énergétiques auxquels nous faisons face, les activités 3 et 4 abordent une autre forme de production d'électricité, à savoir, la production d'énergie électrique à partir de l'énergie radiative solaire.

Activité documentaire 1 : La production d'électricité (p. 100-101)

Lien avec le programme :

- Les alternateurs électriques exploitent le phénomène d'induction électromagnétique découvert par Faraday puis théorisé par Maxwell au XIX^e siècle.

Objectifs notionnels :

- Identifier la source d'un champ magnétique et du mouvement d'un fil conducteur.
- Identifier les conditions expérimentales de la production d'un mouvement à partir d'un champ magnétique.

Objectifs méthodologiques :

- Recenser, extraire, organiser et exploiter des informations de documents à des fins de connaissances et pas seulement d'information.
- Rechercher des informations pour répondre à une question scientifique.
- Expérimenter pour comprendre un phénomène physique et la relation entre deux grandeurs physiques.

Durée estimée : 60 minutes.

Présentation des documents

Document 1 : Électricité et magnétisme

Ce document évoque l'expérience historique du danois Hans Christian Ørsted, réalisée en 1820. C'est la première expérience qui confirme une relation entre la circulation d'un courant électrique dans un fil conducteur et l'apparition d'un champ magnétique. Au cours de la même année, il développa ses recherches et montra que le courant électrique circulant dans le fil produit un champ magnétique circulaire.

Document 2 : Michael Faraday à la Royal Institution

En 1821, Michael Faraday réussit à montrer qu'un champ magnétique et un courant électrique peuvent créer un mouvement. Le moteur dans sa forme la plus élémentaire était né. Il est conseillé de consulter l'expérience de Faraday en vidéo sur [LLS.fr/ESTP100](https://www.lls.fr/ESTP100), ainsi que le site

de la Royal Society. Ces ressources permettent de visualiser toutes les étapes du cheminement intellectuel et expérimental de Michael Faraday.

Document 3 : Faraday et l'induction

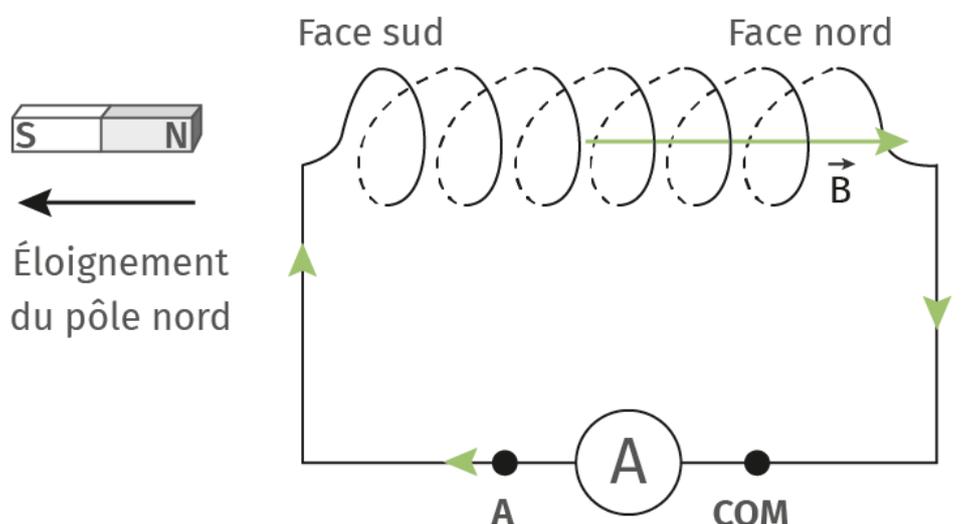
En 1831, Michael Faraday va encore plus loin dans l'exploration de la relation entre l'électricité, le magnétisme et le mouvement. Il arrive à créer de l'électricité grâce au mouvement d'un champ magnétique, lui-même produit par un courant électrique. La grande force de son dispositif est que les deux parties ne sont pas reliées physiquement. Le mouvement du premier cylindre induit un courant dans un autre cylindre : c'est pourquoi on parle d'induction. Il est intéressant d'expliquer aux élèves qu'il a fallu attendre près de 150 ans pour voir les premières applications courantes de ce phénomène (plaque à induction, chargeur sans fil de smartphone, etc.)

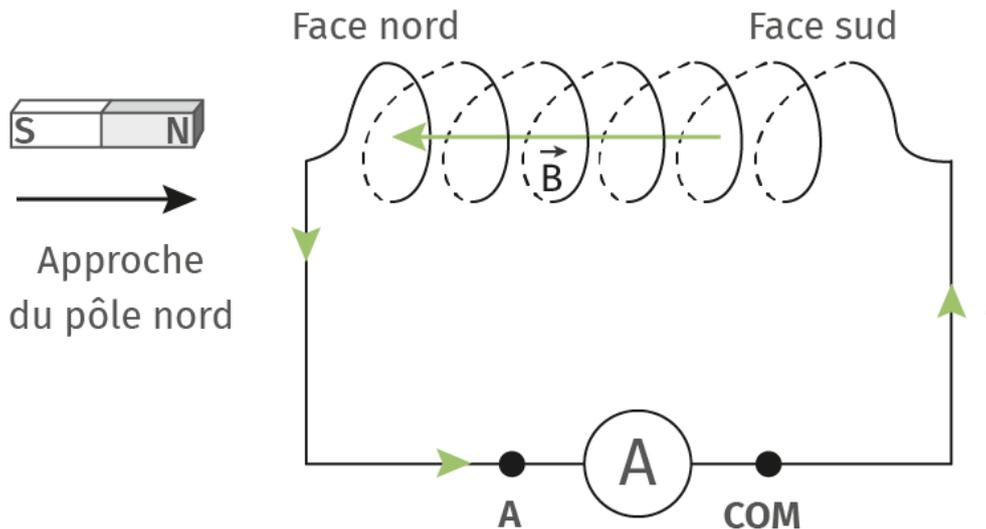
Document 4 : Solénoïde et champ magnétique

Ce document permet de faire le lien entre l'expérience de Michael Faraday, décrite dans le document 3, et la partie expérimentale de l'activité, en montrant que le champ créé par un solénoïde est identique dans sa forme à celui créé par un aimant droit.

Réponses attendues aux questions :

1. Il s'agit d'un moteur.
2. Le passage d'un courant électrique dans le solénoïde crée un champ magnétique dont les lignes de champs sont identiques à celles créées par un aimant droit.
3. Le courant électrique créé s'oppose au déplacement de l'aimant.
4. Si on inverse l'orientation de l'aimant par rapport au solénoïde, le courant électrique créé va dans le sens inverse.
- 5.





6. Le mouvement interrompu de va-et-vient permet de produire un courant alternatif.

7. On pourrait communiquer à l'aimant un mouvement de rotation devant la bobine. C'est le principe de fonctionnement d'un alternateur.

Protocoles et résultats expérimentaux

Créer un courant électrique par induction

Matériel nécessaire :

- aimant droit,
- fil de cuivre avec un tube en carton (un solénoïde si possible),
- deux fils de connexion,
- deux pinces crocodiles.

Protocole :

- Construire le solénoïde à l'aide du fil de cuivre et du tube en carton.
- Attacher une pince crocodile à chaque extrémité du fil de cuivre, puis relier les pinces au galvanomètre en utilisant les fils de connexion.
- Appliquer un mouvement de va-et-vient à l'aimant droit en le faisant pénétrer à l'intérieur du tube en carton, tout en observant le galvanomètre.
- Laisser l'aimant immobile à l'intérieur du tube en carton et observer le galvanomètre.
- Reproduire l'expérience en inversant l'orientation de l'aimant et observer l'effet produit sur le galvanomètre.

Résultats attendus :

On remarque que l'aiguille du galvanomètre est déviée dans un sens puis dans l'autre à chaque mouvement de va-et-vient de l'aimant. Cependant, elle ne bouge pas lorsque l'aimant est immobile. La déviation de l'aiguille du galvanomètre est inversée quand on inverse le sens d'orientation de l'aimant par rapport au tube en carton.

Ressources complémentaires :

- Informations sur l'électricité et son histoire, d'Ampère à Maxwell, en passant par Faraday : <http://www.ampere.cnrs.fr/?lang=fr>.

Activité documentaire 2 : Fonctionnement et rendement d'un alternateur (p. 102)

Lien avec le programme :

- Reconnaître les éléments principaux d'un alternateur (source de champ magnétique et fil conducteur mobile) dans un schéma fourni.
- Définir le rendement d'un alternateur et citer un phénomène susceptible de l'influencer.

Objectifs notionnels :

- La quasi-totalité de la production d'électricité repose de nos jours sur le principe de l'alternateur.
- Le rendement de conversion d'un alternateur est élevé et proche de 1. La baisse de la valeur du rendement dans les centrales électriques utilisant un alternateur a une autre origine.

Objectifs méthodologiques :

- Savoir réaliser un calcul numérique, la relation mathématique étant donnée.
- Recenser, extraire, organiser et exploiter des informations de documents à des fins de connaissances et pour résoudre un problème.

Durée estimée : 45 minutes.

Présentation des documents

Document 1 : Fonctionnement d'un alternateur

Le schéma et la visualisation de l'animation complète sur le site du CEA ([LLS.fr/ESTalternateur](https://lls.fr/ESTalternateur)) permettent de comprendre le fonctionnement d'un alternateur et de reconnaître les éléments principaux de celui-ci (stator, rotor).

Document 2 : Le barrage des Trois-Gorges

Les caractéristiques du barrage des Trois-Gorges sont des caractéristiques moyennes. En effet, tous les turbo-alternateurs ne sont pas identiques, les hauteurs de chute diffèrent selon l'endroit où l'on se situe sur ce barrage aux dimensions gigantesques. Il en est de même pour le débit maximal. Il est intéressant d'évaluer les dimensions de l'ouvrage en reportant sur l'image la hauteur de chute moyenne.

Réponses attendues aux questions :

1. La partie fixe de l'alternateur est le stator (une bobine) et la partie mobile de l'alternateur est le rotor (un aimant).

2. La puissance fournie aux turbo-alternateurs par l'eau est :

$$P_f = h \cdot d \cdot \rho \cdot g = 80,6 \times 1\,065 \times 1,0 \times 10^3 \times 9,81 = 8,4 \times 10^8 \text{ W}$$

$$r = \frac{P_u}{P_f} = \frac{710 \times 10^6}{8,4 \times 10^8} = 0,84 = 84\%$$

Le rendement du turbo-alternateur est :

3. Le rendement est différent à cause des frottements lors de la chute de l'eau dans la conduite forcée, et à l'envasement dans les retenues d'eau (essentiellement dû à l'érosion). La puissance fournie à l'alternateur est donc plus faible.

4. La puissance totale du barrage des Trois Gorges est :

$$P = 32 \times 710 \times 10^6 = 22,7 \times 10^9 \text{ W} = 22,7 \text{ GW}$$

Le rapport entre les puissances des barrages des Trois Gorges et le barrage d'Itaipu est :

$$\frac{22,7}{14} = 1,6$$

La puissance du barrage des Trois Gorges est donc 1,6 fois supérieure à celle du barrage d'Itaipu.

Ressources complémentaires :

- Sur l'impact écologique du barrage des Trois-Gorges : <https://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/developpement-durable-impact-ecologique-barrage-trois-gorges-4160/>

Activité documentaire 3 : Étude d'une cellule photovoltaïque (p. 103)

Lien avec le programme :

- Tracer la caractéristique $I(U)$ d'une cellule photovoltaïque et exploiter cette représentation pour déterminer la résistance d'utilisation maximisant la puissance électrique délivrée.

Objectifs notionnels :

- Une cellule photovoltaïque convertit l'énergie radiative en énergie électrique.
- Le couple de valeurs (U, I) pour lesquelles la puissance délivrée par le dipôle est maximale détermine le point de fonctionnement optimal d'un dipôle.

Objectifs méthodologiques :

- Réaliser un montage électrique à partir de son schéma normalisé.
- Utiliser un tableur-grapheur et exploiter une série de données pour résoudre un problème.

Durée estimée : 60 minutes.

Présentation des documents

Document 1 : Capteur photovoltaïque

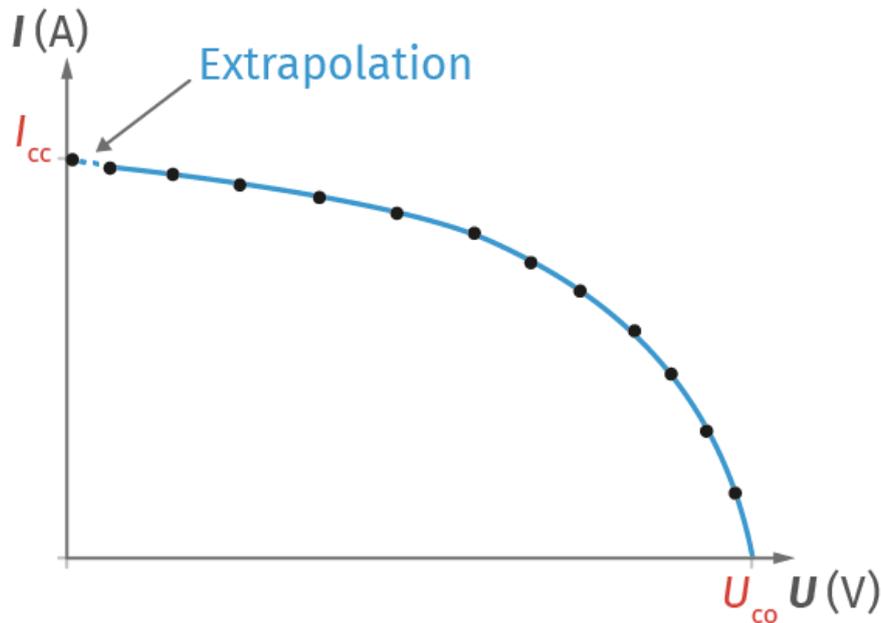
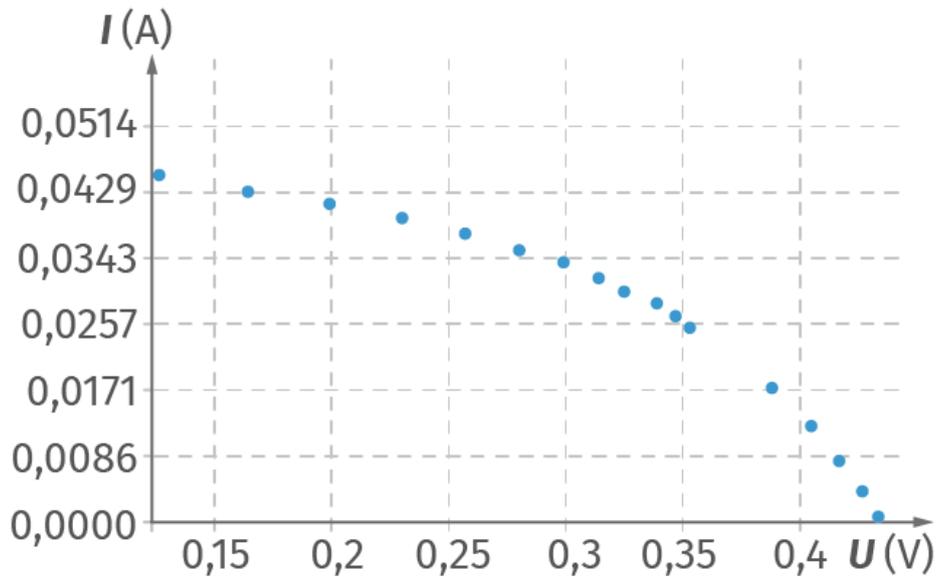
Ce document propose le schéma électrique du montage permettant d'étudier et de construire la caractéristique $I(U)$ d'un capteur photovoltaïque.

Document 2 : Caractéristique $I(U)$

Le tableau de valeurs fourni permet de donner, pour différentes valeurs de la résistance R du montage du document 1, les couples de valeurs (U, I) . L'élève peut alors tracer la caractéristique du capteur photovoltaïque et, en utilisant les fonctionnalités du logiciel tableur-grapheur, déterminer le couple de valeurs (U, I) pour lequel le dipôle délivre une puissance maximale.

Réponses attendues aux questions :

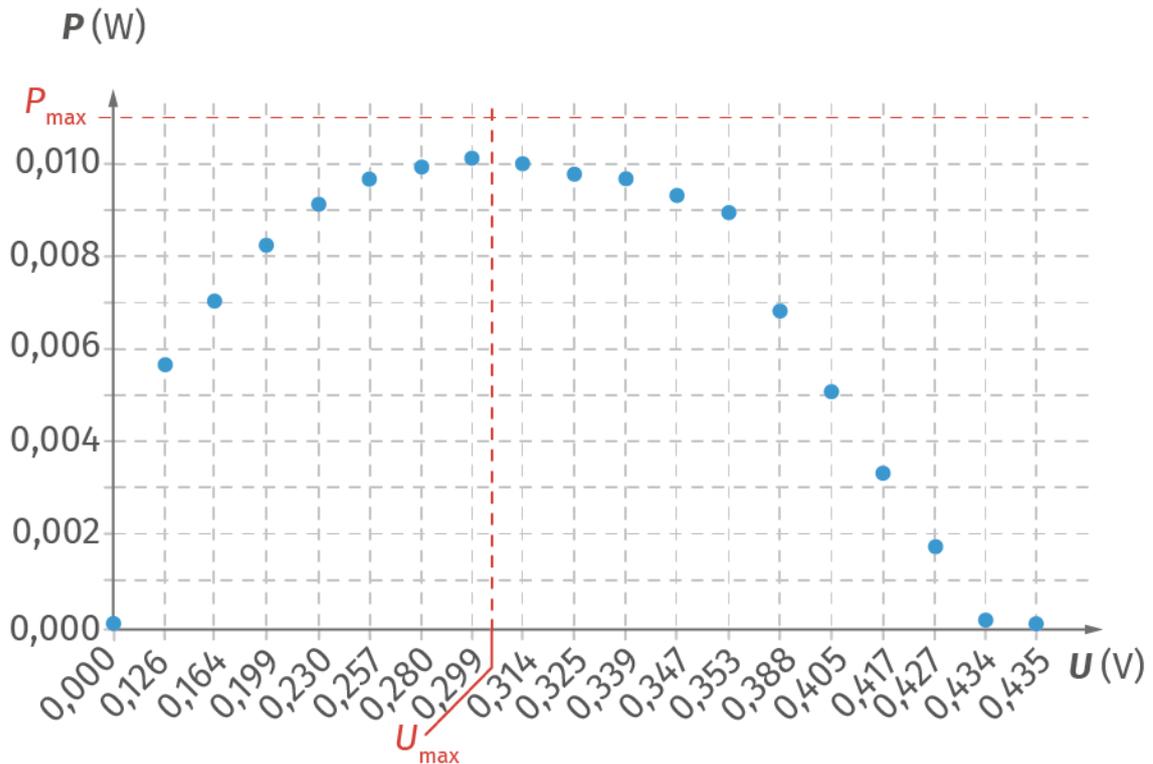
1.



D'après le graphique tracé, on a :

$U_{CO} = 0,435 \text{ V}$ et $I_{CC} = 0,052 \text{ A} = 52 \text{ mA}$.

2. Évolution de la puissance en fonction de la tension $P(U)$



D'après le graphique tracé : $P_{\max} = 11 \text{ mW}$.

La tension et l'intensité correspondante est : $U_{\max} = 0,3 \text{ V}$ et $I_{\max} = 34 \text{ mA}$.

3. Le point correspond au moment où la courbe n'est plus linéaire.

4. La puissance reçue par le capteur est : $P_{\text{fournie}} = 20 \times 54 \times 10^{-4} = 0,11 \text{ W}$.

$$r = \frac{P_u}{P_f} = \frac{11 \times 10^3}{0,11} = 0,10 = 10\%$$

Le rendement du capteur photovoltaïque est :

Le rendement d'un capteur photovoltaïque est faible en comparaison de celui d'un alternateur.

Protocoles et résultats expérimentaux

Caractéristique d'une cellule photovoltaïque : déterminer le point de fonctionnement optimal d'une cellule photovoltaïque

Matériel nécessaire :

- cellule photovoltaïque (elle peut être issue d'une maquette de type pile à combustible/électrolyse),
- luxmètre,
- lampe à incandescence de bureau dont la puissance radiative se situe entre 1 000 et 2 000 lux,
- fils de connexion,
- 3 multimètres (ampèremètre, voltmètre et ohmmètre),
- potentiomètre ou résistance variable (0 - 10 000 Ω).

Protocole :

- Réaliser le montage électrique correspondant au schéma fourni.
- Réaliser les mesures de l'intensité et de la tension pour différentes valeurs de la résistance allant de 1 à 10 000 Ω .
- Représenter graphiquement la caractéristique $I(U)$ ainsi que l'évolution de la puissance en fonction de la tension $P(U)$.

Activité numérique : Étude d'une cellule photovoltaïque en version expérimentale

Proposition de déclinaison de l'activité 3 en activité expérimentale pour les classes disposant du matériel et du temps nécessaire.

Lien avec le programme :

- Tracer la caractéristique $I(U)$ d'une cellule photovoltaïque et exploiter cette représentation pour déterminer la résistance d'utilisation maximisant la puissance électrique délivrée.

Objectifs notionnels :

- Une cellule photovoltaïque convertit l'énergie radiative en énergie électrique.
- Le couple de valeurs (U, I) pour lesquelles la puissance délivrée par le dipôle est maximale détermine le point de fonctionnement optimal d'un dipôle.

Objectifs méthodologiques :

- Réaliser un montage électrique à partir de son schéma normalisé.
- Utiliser un tableur-grapheur et exploiter une série de données pour résoudre un problème.

Durée estimée : 60 minutes.

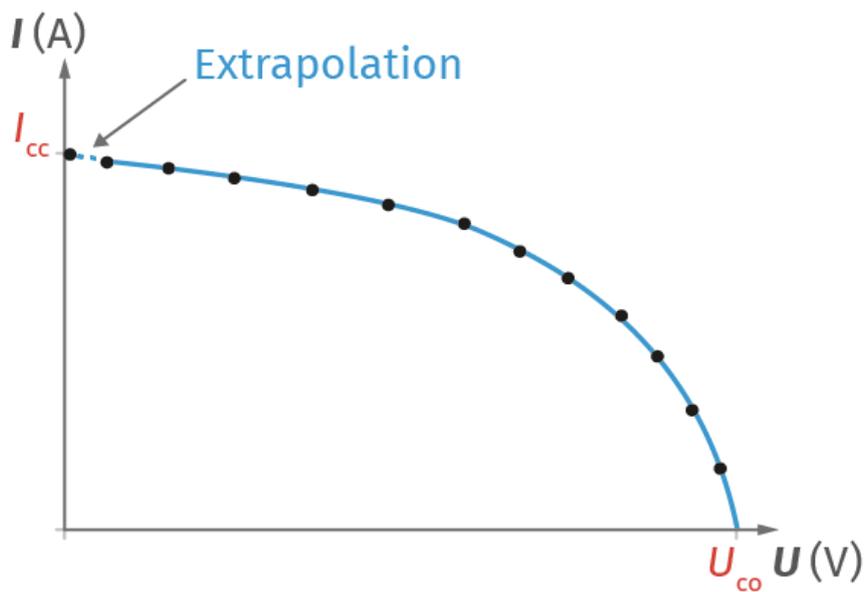
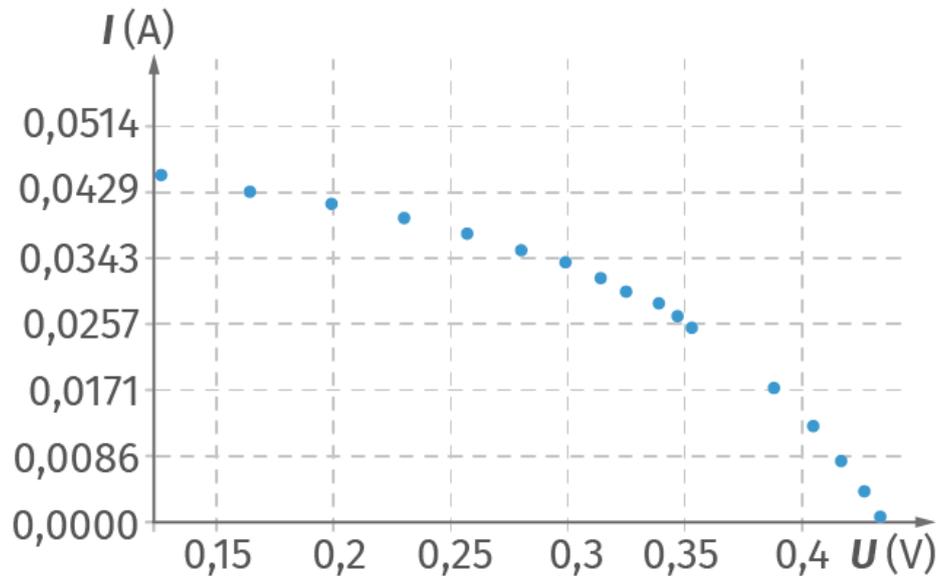
Présentation des documents

Document 1 : Capteur photovoltaïque

Ce document propose le schéma électrique du montage permettant d'étudier et de construire la caractéristique $I(U)$ d'un capteur photovoltaïque.

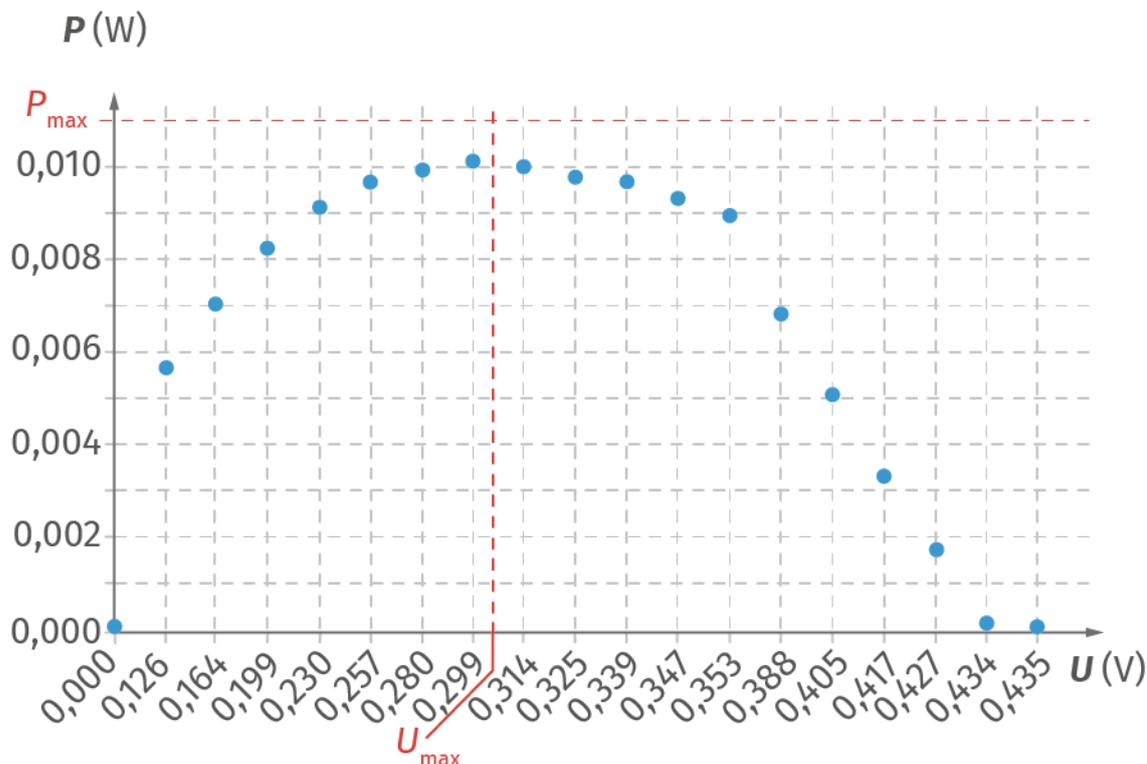
Réponses attendues aux questions :

1.



D'après le graphique tracé, on a :
 $U_{CO} = 0,435 \text{ V}$ et $I_{CC} = 0,052 \text{ A} = 52 \text{ mA}$.

2. Évolution de la puissance en fonction de la tension $P(U)$



D'après le graphique tracé : $P_{\max} = 11 \text{ mW}$.

La tension et l'intensité correspondante est : $U_{\max} = 0,3 \text{ V}$ et $I_{\max} = 34 \text{ mA}$.

3. Le point correspond au moment où la courbe n'est plus linéaire.

4. La puissance reçue par le capteur est : $P_{\text{fournie}} = 20 \times 54 \times 10^{-4} = 0,11 \text{ W}$.

$$r = \frac{P_u}{P_f} = \frac{11 \times 10^3}{0,11} = 0,10 = 10\%$$

Le rendement du capteur photovoltaïque est :

Le rendement d'un capteur photovoltaïque est faible en comparaison de celui d'un alternateur.

Activité documentaire 4 : Le capteur photovoltaïque (p. 104-105)

Lien avec le programme :

- Comparer le spectre d'absorption d'un matériau semi-conducteur et le spectre solaire pour décider si ce matériau est susceptible d'être utilisé pour fabriquer un capteur photovoltaïque.

Objectifs notionnels :

- Un semi-conducteur est un matériau qui peut passer d'un état isolant à un état conducteur par apport d'énergie lumineuse.
- Ces matériaux sont utilisés en électronique et sont constitutifs des capteurs photovoltaïques. Ceux-ci absorbent l'énergie radiative et la convertissent en énergie électrique.

Objectifs méthodologiques :

- Recenser, extraire, organiser et exploiter des informations de documents à des fins de connaissances et pour résoudre un problème.

Durée estimée : 80 minutes.

Présentation des documents

Document 1 : Conducteur, isolant et semi-conducteur

Ce document présente de façon très simplifiée la théorie des bandes, afin de comprendre la particularité des matériaux semi-conducteurs à travers les notions de bandes de valence, de bande de conduction et de *gap*. La vidéo, [LLS.fr/ESTbandes](https://www.lls.fr/ESTbandes), est très utile pour comprendre ces notions.

Document 2 : Cellule photovoltaïque à simple jonction

Ce document explicite le principe d'une cellule à simple jonction, également abordé dans la vidéo. Celle-ci permet de comprendre l'origine de la production d'un courant électrique par l'utilisation de deux types de semi-conducteurs (dopés n et dopés p).

Document 3 : Spectre solaire

Ce document, qui a peut-être déjà été vu par les élèves, permet de rappeler qu'une partie non négligeable du spectre solaire perçu par une cellule photovoltaïque se situe dans l'infrarouge et pas seulement dans le visible. Cela permet également d'introduire une discussion sur la terminologie employée et la représentation des élèves. En effet, les termes « d'énergie lumineuse » sont souvent employés, et ils sous-entendent souvent pour les élèves « énergie de la lumière visible ». C'est pourquoi on privilégie le terme d'énergie radiative.

Document 4 : Limite de Shockley-Queisser

Il est intéressant de pouvoir discuter de la limite structurelle de rendement des cellules photovoltaïques et des solutions qui sont à l'œuvre pour dépasser la limite de Shockley-Queisser (cellules multijonctions).

Document 5 : Spectre d'absorption de semi-conducteurs

Ce document permet de voir que les spectres d'absorption peuvent être très différents selon le semi-conducteur. Mais il permet également d'initier une discussion sur la recherche d'alliages aux propriétés semi-conductrices.

Document 6 : Coût de certains matériaux semi-conducteurs comparé au silicium

Ce tableau est à mettre en parallèle avec les documents 4 et 5 et permet d'alimenter la discussion sur le choix d'un semi-conducteur pour réaliser une cellule photovoltaïque. On voit clairement que le silicium est encore pour l'instant le meilleur choix, car il offre l'un des meilleurs rendements théoriques avec un spectre d'absorption relativement large, et ce pour un coût bien moindre, comparé à ses concurrents directs.

Réponses attendues aux questions :

1. L'énergie permettant aux électrons de franchir le *gap* des semi-conducteurs provient de l'énergie radiative du Soleil, donc des photons.
2. Les électrons se déplacent de la partie dopée n à la partie dopée p du semi-conducteur, en passant par le circuit électrique extérieur.
3. Les semi-conducteurs ayant un *gap* compris entre 1 et 1,7 eV sont Si, InP, a-Si, GaAS et CdTe.
4. Le semi-conducteur ayant la plus large bande d'absorption est Ge (germanium). Il n'est pas utilisé à la place du silicium car son *gap* est trop faible et il coûte 4 fois plus cher que le silicium.
5. Les semi-conducteurs absorbent essentiellement dans le visible (380 nm-780 nm) et dans l'infrarouge jusqu'à 1 400 nm pour le germanium par exemple. Ils absorbent peu dans les ultraviolets (jusqu'à 250 nm environ).
6. L'utilisation de semi-conducteurs multi-jonctions permet d'augmenter le rendement de la cellule, donc la puissance disponible est plus élevée pour une bande d'absorption plus élevée.

Bibliographie :

- C. Ngô et H. Ngô, *Physique des semi-conducteurs*, Dunod, 1998.
- L. Chancelier et E Laurent, *Électricité photovoltaïque*, Gret, 1996.
- G. Moine, *L'électrification solaire photovoltaïque*, Observ'ER, 2016.

Ressources complémentaires :

- Le site du CEA : www.cea.fr et plus particulièrement le livret sur les énergie du XXI^e siècle :
<http://www.cea.fr/multimedia/Pages/editions/livrets-thematiques/energies-du-21e-siecle.aspx>

Bilan (p. 107)

La production conventionnelle d'énergie électrique

La quantité d'énergie convertie par un alternateur dépend :

- > de sa vitesse de rotation ;
- > de l'intensité du champ magnétique ;
- > du nombre de spires (boucles) de la bobine de cuivre.

Énergie cinétique de rotation :

- > pour l'alternateur d'un vélo, le mouvement de la roue entraîne la rouelette, ce qui crée le courant, faisant briller la lampe. L'alternateur de la centrale fonctionne de la même manière.

Le rendement de conversion d'un alternateur est

$$\text{proche de } 1 : r_{\text{alternateur}} = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{fournie}}} \approx 1$$

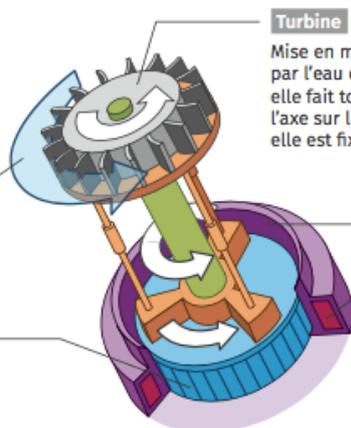
Énergie primaire

Vapeur, eau, vent

Cette énergie primaire, sous pression ou en mouvement, fait tourner la turbine

Aimant mobile (rotor)

Il est composé d'une série d'aimants collés sur la roue entraînée par l'axe



Turbine

Mise en mouvement par l'eau ou la vapeur, elle fait tourner l'axe sur lequel elle est fixée

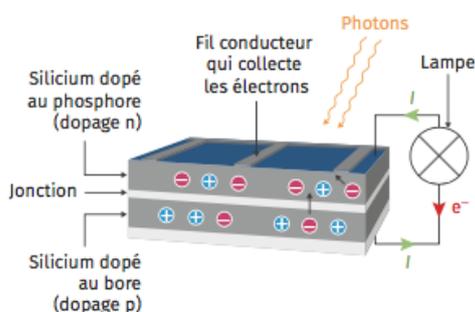
Alternateur

Cet appareil produit le courant électrique : il est constitué d'un axe, d'un aimant mobile et d'une bobine fixe

Bobine fixe (stator)

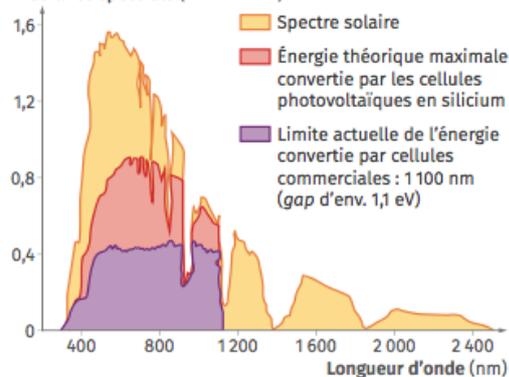
Elle est composée de fils de cuivre qui ne bougent pas : le courant électrique est créé par la proximité avec les aimants tournants du rotor

Les cellules photovoltaïques



- > Composition d'une cellule photovoltaïque.

Irradiance spectrale ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$)



- > Conversion de l'énergie solaire en électricité en fonction de la longueur d'onde.

Une cellule photovoltaïque est constituée de matériaux semi-conducteurs qui transforment de l'énergie lumineuse en énergie électrique. La partie du spectre solaire absorbée par une cellule photovoltaïque dépend de la nature du matériau semi-conducteur. Le rendement des cellules photovoltaïques reste encore faible (environ 25 %). Pour l'augmenter, l'une des techniques consiste à superposer plusieurs couches de semi-conducteurs différents (cellules à multi-jonctions).

Exercices

Zone d'échauffement (p. 108)

1. Alternateur de vélo.

- a. Le stator est en orange sur le schéma. Le rotor est, quant à lui, en vert et rouge.
- b. Le stator est constitué de bobines de cuivre tandis que le rotor est un aimant.

2. Barrage hydroélectrique.

a. La puissance fournie par l'eau du barrage est :

$$P_f = \frac{P_u}{r} = \frac{300}{0,82} = 366 \text{ MW}$$

b. Le rendement de l'alternateur est :

$$r_{\text{alternateur}} = \frac{0,82}{0,85} = 0,96 = 96\%$$

- c. Les pertes électriques proviennent de l'envasement dans la retenue d'eau, des frottements de l'eau sur la conduite forcée et des frottements dans l'alternateur.

3. Caractéristiques de cellules photovoltaïques.

a. Pour le capteur 1, graphiquement : $U_1 = 4 \text{ V}$ et $I_1 = 1,3 \text{ A}$.

Pour le capteur 2, graphiquement : $U_2 = 3 \text{ V}$ et $I_2 = 1,75 \text{ A}$.

b. La puissance délivrée par le capteur 1 est : $P_1 = U_1 \cdot I_1 = 4 \times 1,3 = 5,2 \text{ W}$.

La puissance délivrée par le capteur 2 est : $P_2 = U_2 \cdot I_2 = 3 \times 1,75 = 5,3 \text{ W}$.

On peut considérer que ces 2 capteurs délivrent la même puissance.

c. Pour le capteur 1 : $I_{CC1} = 1,6 \text{ A}$ et $U_{CO1} = 4,8 \text{ V}$.

Pour le capteur 2 : $I_{CC2} = 2,0 \text{ A}$ et $U_{CO2} = 3,4 \text{ V}$.

4. Alternateur de voiture. Un alternateur convertit :

- c. une énergie mécanique (énergie de cinétique de rotation en général) en énergie électrique.

Exercices supplémentaires :

A. Expliquer simplement le principe de fonctionnement d'un alternateur pour produire de l'électricité.

L'alternateur composé d'un stator, constitué de bobines de fil de cuivre, et d'un rotor, composé d'aimants ou d'électroaimants, et entraîné, le plus souvent par une turbine, produit de l'énergie électrique par induction

B. La puissance maximale délivrée par une cellule voltaïque est atteinte :

- a. à l'intensité maximale, la tension dépendant de la caractéristique.
- b. à la tension maximale, l'intensité dépendant de la caractéristique.
- c. à un autre couple de valeurs de tension et d'intensité.

C. Un dipôle de puissance P convertit une énergie E pendant un intervalle Δt , selon la formule :

a. $E = \frac{P}{\Delta t}$

b. $E = \frac{\Delta t}{P}$

c. $E = P \cdot \Delta t$

L'atelier des apprentis (p. 109)

5. Les pérovskites

Compétence principalement travaillée : Interpréter et exploiter un spectre d'absorption

Correction :

1. Un semi-conducteur est un matériau qui a les caractéristiques électriques d'un isolant, mais pour lequel un apport d'énergie extérieur (photons) peut permettre à un électron de contribuer à un courant électrique, en franchissant le *gap* d'énergie du matériau. La conductivité électrique d'un semi-conducteur est donc intermédiaire entre celle des métaux et celle des isolants.
2. Les pérovskites ont un maximum d'absorbance dans la partie visible du spectre électromagnétique (400 nm à 800 nm).
3. L'utilisation commune des pérovskites et du silicium permet de couvrir une bande plus large du spectre électromagnétique et donc d'augmenter le rendement du capteur photovoltaïque.

6. Comparaison

Compétence principalement travaillée : Savoir exploiter la caractéristique d'une cellule photovoltaïque

Correction :

1. La puissance d'une cellule photovoltaïque est :

$$P_{\text{cellule}} = U_{\text{max}} \cdot I_{\text{max}} = 15,5 \times 1,2 = 18,6 \text{ W}$$

Le nombre nécessaire de cellules pour être équivalent à la puissance de la centrale nucléaire

$$\text{est : } N_{\text{cellule}} = \frac{P_{\text{centrale}}}{P_{\text{cellule}}} = \frac{900 \times 10^6}{18,6} = 48,4 \times 10^6 \text{ cellules}$$

La surface de panneau solaire nécessaire est :

$$S_{\text{totale}} = N_{\text{cellule}} \cdot S_{\text{cellule}} = 48,4 \times 10^6 \times 0,200 = 9,68 \times 10^6 \text{ m}^2 = 9,68 \text{ km}^2$$

Correction de l'exercice décliné en version expert :

Compétence principalement travaillée : Savoir exploiter la caractéristique d'une cellule photovoltaïque

1. Au bout de combien de jours l'énergie délivrée par un champ de panneaux solaires dont la surface totale des cellules photovoltaïques est de 1,0 km² sera-t-elle égale à l'énergie délivrée en 1 jour par la centrale nucléaire ? On considère que les panneaux solaires fonctionnent en moyenne 12 heures par jour.

L'énergie électrique produite par la centrale par jour est :

$$E_{\text{centrale}} = P_{\text{centrale}} \times t = 900 \times 10^6 \times 3\,600 \times 24 = 7,8 \times 10^{13} \text{ J}$$

La puissance délivrée par une cellule photovoltaïque est :

$$P_{\text{cellule}} = U_{\text{max}} \cdot I_{\text{max}} = 15,5 \times 1,2 = 18,6 \text{ W}$$

Cette puissance est délivrée pour une surface de cellule de 0,200 m².

On exprime la surface totale du champ en m², puis, par proportionnalité, on trouve que la puissance délivrée par le champ de cellules photovoltaïques de surface 1,0 km² est :

$$P_{\text{champ}} = \frac{\text{Surface du champ} \times P_{\text{cellule}}}{\text{Surface cellule}} = \frac{1,0 \times 10^6 \times 18,6}{0,200} = 9,3 \times 10^7 \text{ W} = 93 \text{ MW}$$

Le nombre de jours de fonctionnement du parc pour produire la même quantité d'énergie que la centrale est :

$$t_{\text{jours}} = \frac{E_{\text{centrale}}}{P_{\text{parc}}} \times \frac{2}{3\,600 \times 24} = \frac{7,8 \times 10^{13}}{9,3 \times 10^7} \times \frac{2}{3\,600 \times 24} = 1,9 \times 10^1 \text{ jours}$$

Le nombre de jours peut paraître peu élevé. Il faut cependant considérer qu'il s'agit d'un champ de cellules photovoltaïques de 1 km² et que les conditions météorologiques sont très favorables.

Le repaire des initiés (p. 110-111)

7. Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque

Compétence principalement travaillée : Savoir exploiter la caractéristique d'une cellule photovoltaïque

Correction :

1. D'après le graphique, $I_{CC} = 1,7 \text{ A}$ et $U_{CO} = 6,0 \text{ V}$.

2. La puissance maximale correspond au sommet de la courbe rose. En utilisant la courbe verte, on en déduit les valeurs maximales de la tension et de l'intensité : $I_{\max} = 1,6 \text{ A}$ et $U_{\max} = 5,0 \text{ V}$.

3. La puissance maximale de la cellule est : $P_{\max} = U_{\max} \cdot I_{\max} = 5,0 \times 1,6 = 8 \text{ W}$. C'est donc suffisant pour charger le smartphone qui nécessite 5 W.

4. La puissance absorbée par la cellule photovoltaïque est :
 $P_{\text{abs}} = E \cdot S = 1\,000 \times 15 \times 10^{-2} \times 30 \times 10^{-2} = 45 \text{ W}$.

5. Le rendement de la cellule est : $r = \frac{P_{\max}}{P_{\text{abs}}} = \frac{8}{45} = 0,17 = 17\%$

8. Pour ou contre le photovoltaïque

Compétence principalement travaillée : Rédiger une réponse argumentée

Correction :

1. L'énergie solaire peut être utilisée pour :

- produire de l'énergie électrique (cellules photovoltaïques) ;
- produire de l'énergie thermique basse température (panneaux solaires thermiques) ;
- produire de l'énergie thermique haute température (fours solaires, centrales solaires thermodynamiques).

2. **Idée 1 :** l'énergie solaire est une source d'énergie renouvelable. Elle est inépuisable et représente donc un moyen de production d'énergie d'avenir face à l'épuisement des ressources fossiles.

Idée 2 : l'énergie solaire est intermittente et ne peut pas suffire pour fournir de l'énergie électrique. De plus, les rendements sont encore assez faibles et les matériaux qui composent les capteurs photovoltaïques sont assez durs à extraire et sources de pollution.

9. Alternateur bouteille/alternateur moyeu

Compétence principalement travaillée : Définir le rendement d'un alternateur et citer un phénomène susceptible de l'influencer

Correction :

1. La puissance transmise à la roue est : $P = \frac{2}{100} \times 310 = 6,2 \text{ W}$

2. La puissance produite par l'alternateur bouteille est : $P_b = 3,3 \text{ W}$. La puissance produite par l'alternateur moyeu est : $P_m = 5,0 \text{ W}$.

3. Le rendement de l'alternateur bouteille est : $r_b = \frac{3,3}{6,2} = 0,53 = 53\%$

Le rendement de l'alternateur moyeu est : $r_m = \frac{5,0}{6,2} = 0,81 = 81\%$

4. L'intérêt de produire une puissance supérieure est de compenser les pertes lors des transferts d'énergie. Cela supprime aussi les frottements sur la jante de l'alternateur bouteille. De plus, il est possible d'envisager d'utiliser l'excédent de puissance pour recharger un appareil électrique comme un smartphone.

Correction de l'exercice décliné en version expert :

Compétence principalement travaillée : Définir le rendement d'un alternateur et citer un phénomène susceptible de l'influencer

1. Si on estime que 2 % de la puissance développée par un cycliste est transmise à la roue, quelle serait la puissance développée par le cycliste roulant sur un vélo muni d'une dynamo moyeu dont le rendement est de 80 %, permettant d'alimenter une lampe de 4 W et de charger un *smartphone* nécessitant une puissance de 5 W ?

$$P_{\text{utile}} = 4,0 + 5,0 = 9,0 \text{ W}$$

$$P_{\text{reçue}} = \frac{P_{\text{utile}}}{r} = \frac{9,0}{0,8} = 11 \text{ W}$$

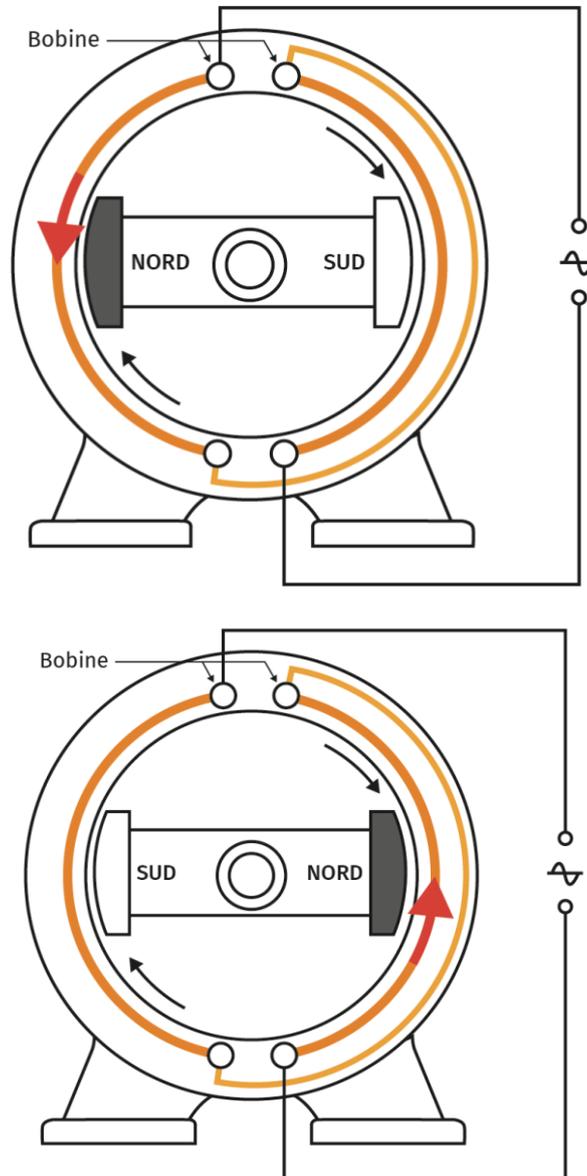
$$P_{\text{cycliste}} = \frac{P_{\text{reçue}}}{0,02} = \frac{11}{0,02} = 5,5 \times 10^2 \text{ W}$$

10. Produire un courant alternatif

Compétence principalement travaillée : Reconnaître les éléments principaux d'un alternateur

Correction :

1.

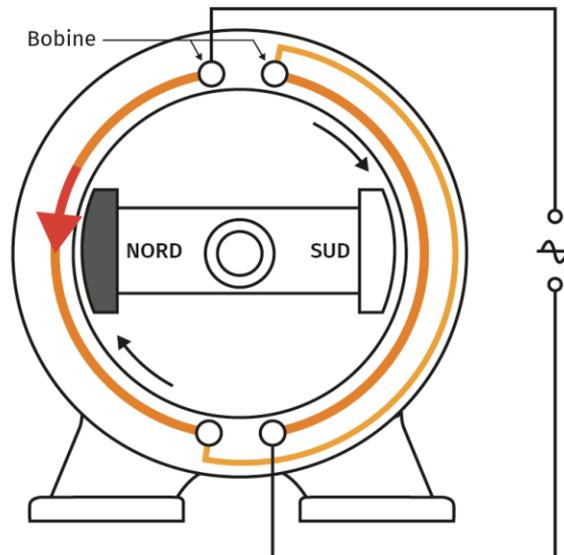


La variation du champ magnétique est alternativement dans un sens, puis dans l'autre, ce qui crée un courant induit qui s'oppose à la variation du champ magnétique, tantôt dans un sens, puis dans l'autre. Cela crée un courant alternatif dont la fréquence dépend de la vitesse de rotation de l'aimant.

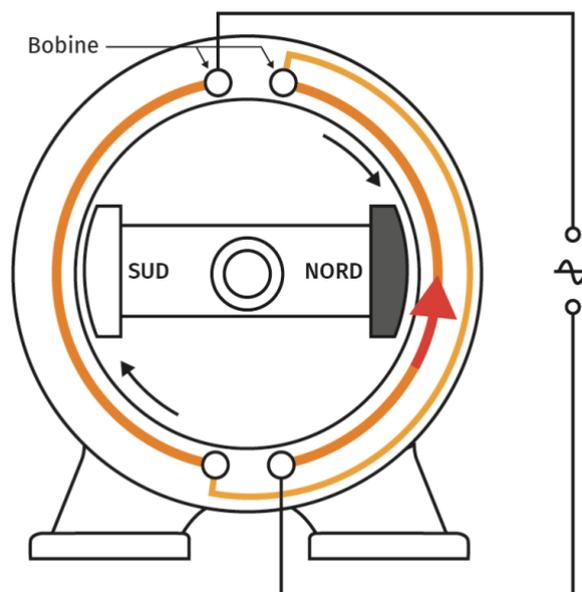
Correction de l'exercice décliné en version apprenti :

Compétence principalement travaillée : Reconnaître les éléments principaux d'un alternateur

1. Reproduire le schéma et représenter arbitrairement le sens de circulation du courant électrique dans le circuit électrique et la bobine.



2. Reproduire le schéma en quand l'aimant à réalisé un demi-tour par rapport à sa position initiale. Puis faire apparaître le sens de circulation du courant électrique dans le circuit et la bobine.



3. Choisir parmi les propositions ci-dessous celles qui sont vraies :

- a. Le courant électrique change de sens à chaque fois que l'aimant fait un tour complet.
- b. Le courant électrique change de sens à chaque fois que l'aimant fait un demi-tour.**
- c. Le courant électrique change 2 fois de sens à chaque fois que l'aimant fait un tour complet.**

Le coin des experts (p. 112)

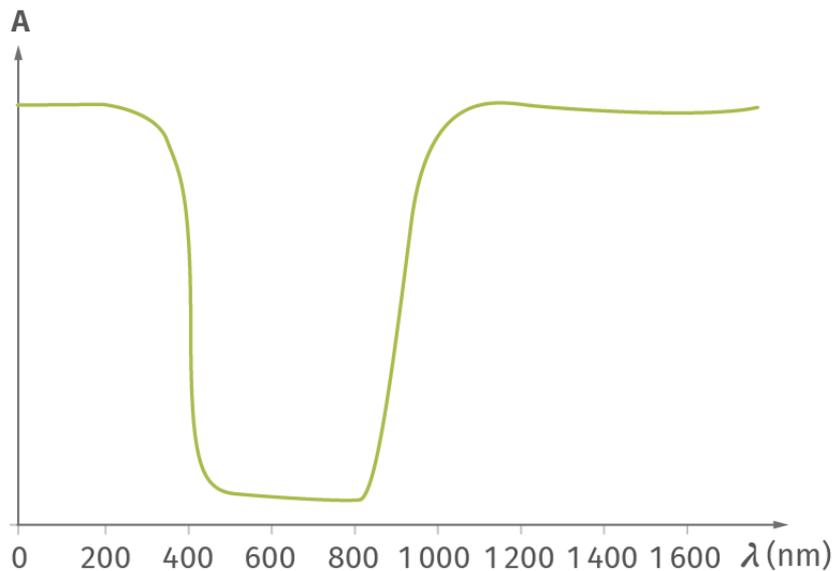
11. Cellule photovoltaïque du futur

Compétence principalement travaillée : Interpréter et exploiter un spectre d'absorption

Correction :

1. L'intervalle de longueur d'onde du domaine des UV est de 100 à 400 nm. L'intervalle de longueur d'onde des IR est de 800 nm à 20 μm.

2. Allure de la courbe :



3. Le rendement de cette cellule est :

$$r = \frac{P_u}{P_f} = \frac{P_u}{E \cdot S} = \frac{0,72}{1\,000 \times 8,0 \times 10^{-2} \times 12,5 \times 10^{-2}} = 0,072 = 7,2\%$$

4. Le rendement est plus faible qu'une cellule photovoltaïque conventionnelle (environ 20%).

5. Le fait que le rendement soit plus faible n'est pas réellement un problème, car ce type de cellule laisse tout de même passer la lumière du jour, elles peuvent donc être montées sur des fenêtres sans que cela diminue la luminosité de la pièce. De plus, les surfaces vitrées peuvent être très importantes dans beaucoup de constructions modernes, ainsi la surface totale exposée ramenée au m² peut être très importante.

Correction de l'exercice décliné en version apprenti :

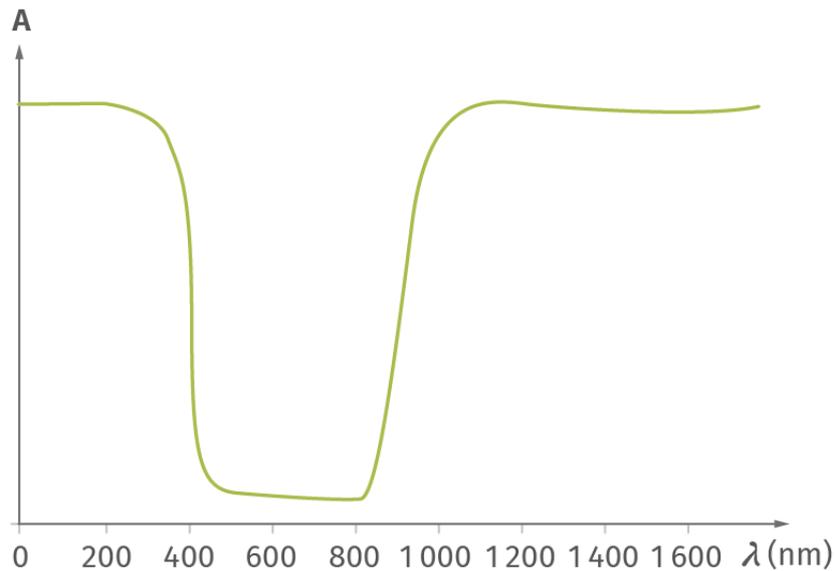
Compétence principalement travaillée : Interpréter et exploiter un spectre d'absorption

1. Donner l'intervalle de longueur d'onde correspondant au domaine UV, au domaine visible et au domaine IR.

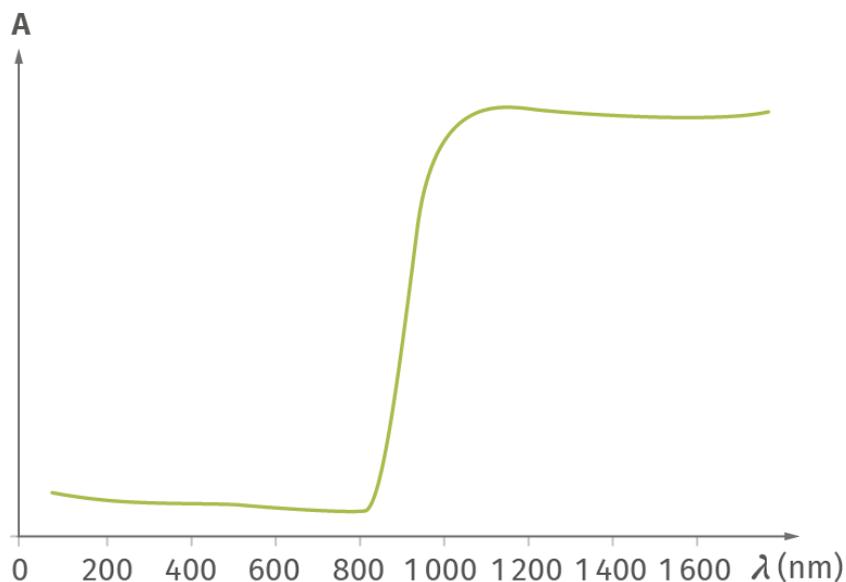
L'intervalle de longueur d'onde du domaine des UV est de 100 à 400 nm. L'intervalle de longueur d'onde des IR est de 800 nm à 20 μm .

2. Identifier pour chaque courbe ci-dessous, les domaines des rayonnements absorbés. Quelle(s) courbe(s) correspond(ent) à une cellule transparente ?

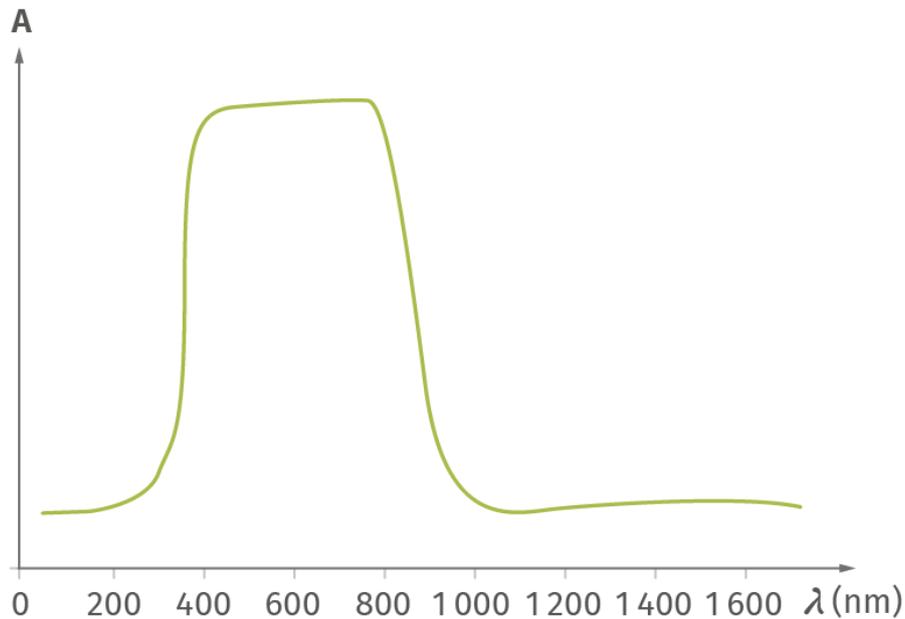
Courbe a :



Courbe b :



Courbe c :



Courbe a. : Absorption des UV et des IR.

Courbe b. : Absorption des IR.

Courbe c. : Absorption de la lumière visible.

Les courbes a. et b. correspondent donc à des cellules transparentes.

3. Une cellule photovoltaïque transparente de surface 0,012 m² permet de générer une puissance électrique de 0,86 W lorsqu'elle reçoit une puissance lumineuse surfacique de 1 000 W·m⁻².

a. Calculer la puissance lumineuse reçue par la cellule.

La puissance lumineuse reçue est : $P = 1\,000 \times 0,012 = 12\text{ W}$

b. En déduire le rendement de la cellule.

Le rendement de cette cellule est $r = \frac{0,86}{12} = 0,072 = 7,2\%$

4. Comparer la valeur obtenue avec le rendement moyen de cellules conventionnelles.

Le rendement est plus faible qu'une cellule photovoltaïque conventionnelle (environ 20 %).

5. Cette valeur de rendement peut-elle être facilement compensée dans le cas de ces cellules transparentes ? Détailler la réponse.

Pour obtenir la même puissance avec un rendement de conversion plus faible, il faudrait utiliser des surfaces plus grandes. Ces cellules étant transparentes, on peut potentiellement les utiliser pour optimiser les nombreuses surfaces vitrées des immeubles. Cette surface supplémentaire est donc potentiellement disponible.