

Chapitre 4: Deux siècles d'énergie électrique

Sommaire

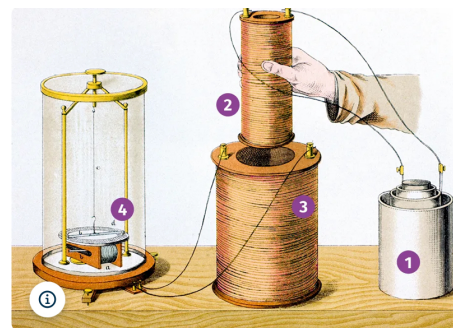
Activités	Page(s)	Autoévaluation
Histoire des sciences : De l'induction à l'alternateur	1-3	
Activité documentaire : Les semi-conducteurs	4-5	
Activité documentaire : Une installation photovoltaïque communale	6-8	
Activité documentaire : Le silicium, ressource clé du photovoltaïque	9-10	
Cours	11-12	

Activité 1: De l'induction à l'alternateur

Introduction : La production d'électricité joue un rôle majeur dans le quotidien, tant elle est devenue omniprésente. Comprendre les mécanismes de production d'électricité, c'est revenir sur les expériences historiques de l'électromagnétisme, se plonger dans la technologie des convertisseurs et s'interroger sur la forme d'énergie qui a été convertie.

Problématique : Comment un alternateur génère-t-il de l'électricité ?

Objectifs : Reconnaître les éléments principaux d'un alternateur (source de champ magnétique et fil conducteur en mouvement relatif) dans un schéma fourni. Relier la vitesse de rotation du rotor et la fréquence du courant électrique. Définir le rendement d'un alternateur et citer un phénomène susceptible de l'influencer.



Schématisme de l'expérience historique de Faraday sur l'induction électromagnétique en 1831

Document 1: L'expérience de Faraday

Michael Faraday est un physicien qui a mis en évidence en 1831 le lien entre électricité, magnétisme et mouvement : l'induction électromagnétique.

Ce phénomène apparaît lorsqu'un conducteur est en mouvement par rapport à un champ magnétique (produit par exemple par un aimant). Si cette variation est suffisamment importante, un courant électrique apparaît alors dans les conducteurs à proximité. On peut notamment l'observer en déplaçant un aimant à l'intérieur d'une bobine reliée à un dipôle électrique.

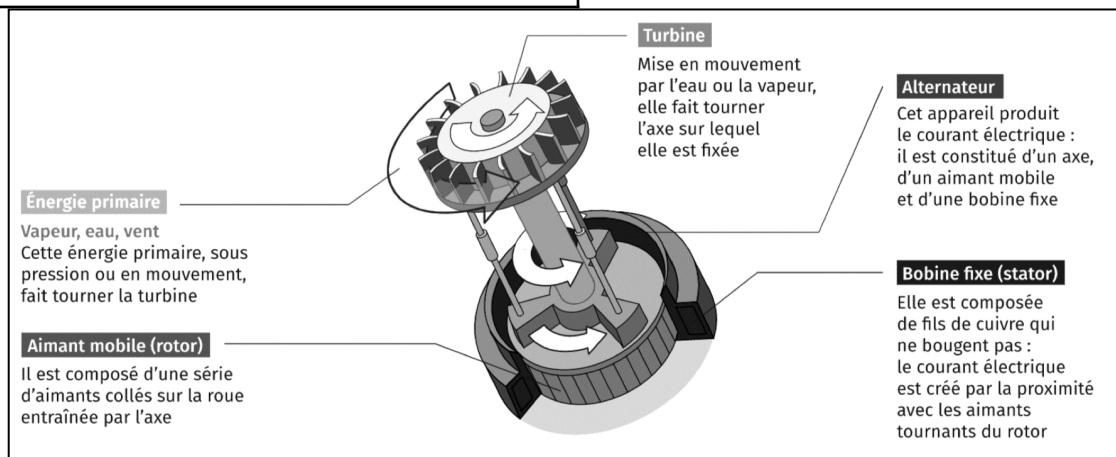
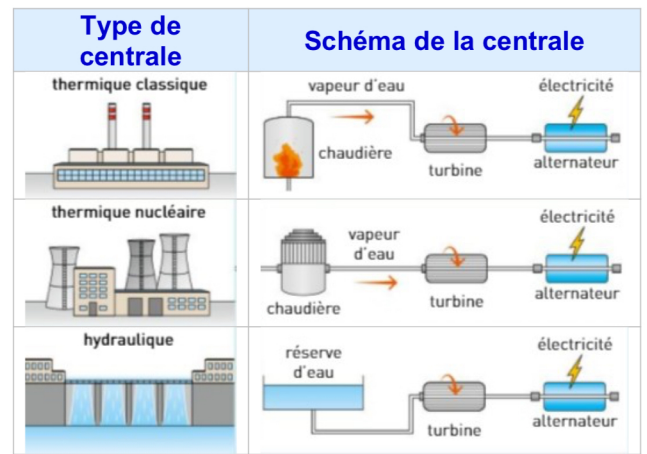
L'expérience de Faraday reposait, à l'époque, sur une bobine 2 alimentée par une pile 1 qui permettait de produire un champ magnétique. Lorsque la bobine 2 restait immobile, rien ne se produisait. En revanche, si la bobine 2 était déplacée avec un mouvement périodique à l'intérieur de la bobine 3, l'aiguille du galvanomètre 4 se mettait aussitôt à osciller, mettant en évidence qu'un courant électrique était apparu. Ainsi, sans que les deux bobines ne soient en contact l'une et l'autre, le seul mouvement de la bobine 2 permettait d'induire un courant électrique alternatif dans la bobine 3.

Document 2: L'alternateur

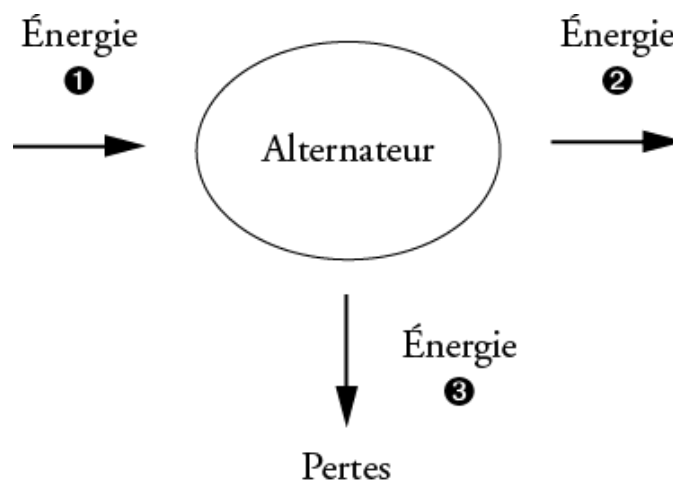
L'électricité est indispensable aux modes de vie actuels. Elle existe à l'état naturel, comme dans la foudre, mais sous des formes difficilement exploitables.

Une centrale électrique est un site dédié à la production d'électricité. Il existe différents types de centrales mais elles présentent toutes des similitudes de fonctionnement.

Dans la plupart des centrales, une turbine met en mouvement un alternateur pour produire de l'électricité. Au sein de l'alternateur, la mise en mouvement du rotor crée un courant par induction.



- 1) Quel type de courant **est** généré dans la bobine 3 lorsque la bobine 2 est déplacée de manière périodique ?
- 2) **Indiquer** les noms donnés à la partie fixe de l'alternateur, puis à sa partie mobile. En **donner** les compositions.
- 3) **Compléter** le diagramme de conversion d'énergie de l'alternateur suivant :



Document 3: Le barrage des Trois-Gorges en Chine

C'est le barrage qui délivre la plus grande puissance électrique au monde. Il est constitué de 32 turbo-alternateurs mis en mouvement par l'eau retenue par le barrage. Les turbo-alternateurs sont activés par la descente de l'eau du barrage qui chute en moyenne $h = 80,6 \text{ m}$. Le débit moyen maximal du barrage est $d = 1\,065 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Chacun de ces 32 alternateurs fournit une puissance de 710 MW avec un rendement nominal égal à 0,96.



Document 4: Formules et données

Rappel : $E = P \times \Delta t$

L'énergie existe sous différentes formes. Lors de la conversion d'énergie dans une machine, l'énergie passe d'une forme à d'autres formes d'énergie. L'énergie reçue est ainsi convertie en énergie « utile » et en énergie perdue ou dissipée sous forme thermique. On peut citer l'échauffement suite à un frottement mécanique ou l'échauffement des fils électriques lors du passage d'un courant électrique appelé effet Joule.

D'après le principe de conservation de l'énergie, on peut écrire : $E_{\text{absorbée}} = E_{\text{utile}} + E_{\text{perdue}}$

(ou $P_{\text{absorbée}} = P_{\text{utile}} + P_{\text{perdue}}$).

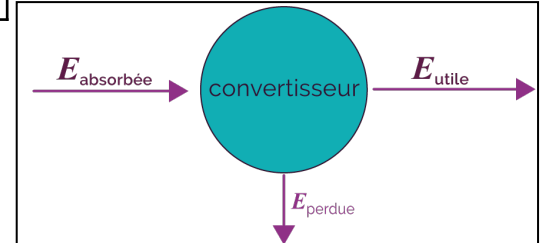
Le rendement du convertisseur noté η (lettre grecque êta)

est alors défini par : $\eta = \frac{E_{\text{utile}}}{E_{\text{absorbée}}} = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{absorbée}}}$

Un rendement est toujours positif et inférieur à 1. Il n'a pas d'unité car il mesure une proportion. Il peut également être exprimé en pourcentages.

Données :

- masse volumique de l'eau : $\rho = 1,0 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$;
- intensité du champ de pesanteur : $g = 9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$;
- fréquence du courant électrique en Chine : $f = 50 \text{ Hz}$
- expression de la puissance fournie par l'eau en watt : $P_{\text{chute}} = h \times d \times \rho \times g$ avec h la hauteur de chute en m, d le débit volumique en $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, ρ la masse volumique de l'eau en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ et g l'intensité de pesanteur en $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$.



4) **Calculer** la puissance fournie par l'eau, notée P_{chute} , à un turbo-alternateur du barrage des Trois-Gorges.

5) En **déduire** la valeur du rendement, noté η , du barrage.

6) **Proposer** une explication à un éventuel écart entre la valeur annoncée du rendement et celle calculée précédemment.

7) **Discuter** en termes énergétiques de l'évolution du rendement de l'alternateur si la liaison entre le rotor et le stator est de mauvaise qualité, par exemple si elle occasionne beaucoup de frottements mécaniques entre les pièces constitutives de l'alternateur.

8) La puissance délivrée par le second plus puissant barrage du monde, à Itaipu, est de 14 GW. **Comparer** cette puissance avec celle du barrage des Trois-Gorges et quantifier la comparaison à l'aide d'un pourcentage.

9) La fréquence f du courant induit par l'alternateur est donnée par la relation $f = N \times \omega$ avec f la fréquence du courant électrique en Hz, N le nombre d'aimants du rotor et ω (lettre grecque oméga) la vitesse de rotation du rotor en $\text{tr} \cdot \text{s}^{-1}$. Sachant que la vitesse de rotation ω des alternateurs est de $0,8 \text{ tr} \cdot \text{s}^{-1}$, **déduire** les fréquences f possibles du courant électrique produit pour 20, 40, 80 et 100 aimants. **Comparer** ces fréquences à celle du courant du réseau électrique chinois.

Activité 2: Les semi-conducteurs

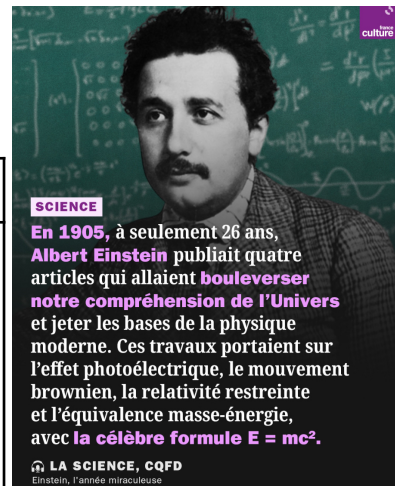
Introduction : Les matériaux semi-conducteurs sont très employés dans la composition des composants électroniques et jouent un rôle essentiel dans la construction des panneaux solaires par exemple.

Problématique : Quelle est la structure électronique d'un semi-conducteur et comment fonctionne-t-il ?

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

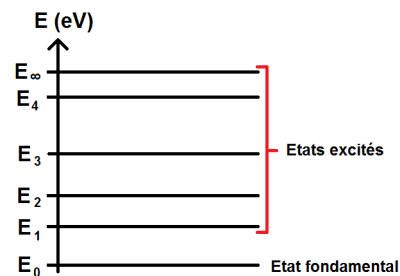
Document 1 : Einstein et l'effet photoélectrique

Bien que célèbre pour sa théorie de la relativité, Einstein reçut le prix Nobel en 1921 pour son explication de l'effet photoélectrique. Celui-ci, observé au XIX^{ème} siècle, montre que la lumière peut arracher des électrons à un métal. En 1905, Einstein propose que la lumière est faite de photons, des particules transportant une énergie précise. Cette idée marque une étape clé dans la naissance de la mécanique quantique.



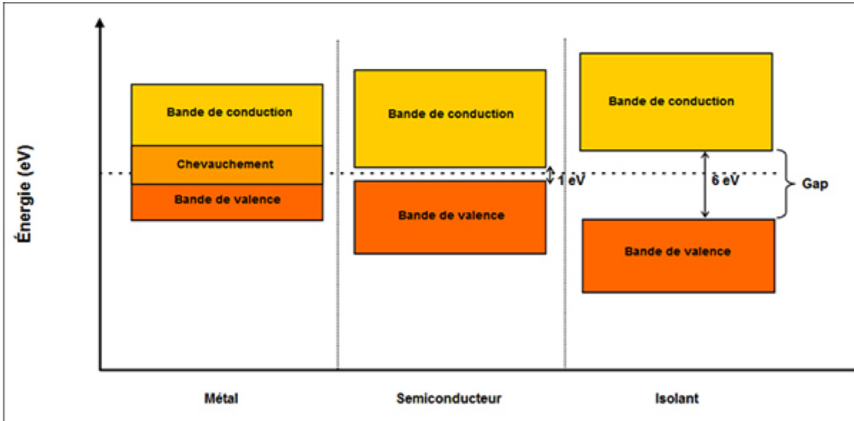
Document 2 : Le modèle atomique de l'atome

Lorsqu'un gaz est excité, il émet de la lumière sous forme de raies colorées, correspondant à des photons de même longueur d'onde. Selon la théorie des quanta d'Einstein, l'énergie des atomes est quantifiée : un atome ne peut avoir que certaines énergies précises. Les photons émis ou absorbés correspondent à la différence entre deux niveaux d'énergie de l'atome. Ainsi, seule une lumière bien spécifique peut être absorbée, ce qui permet d'identifier l'atome.



Document 3 : Conducteurs, isolants ou semi-conducteurs

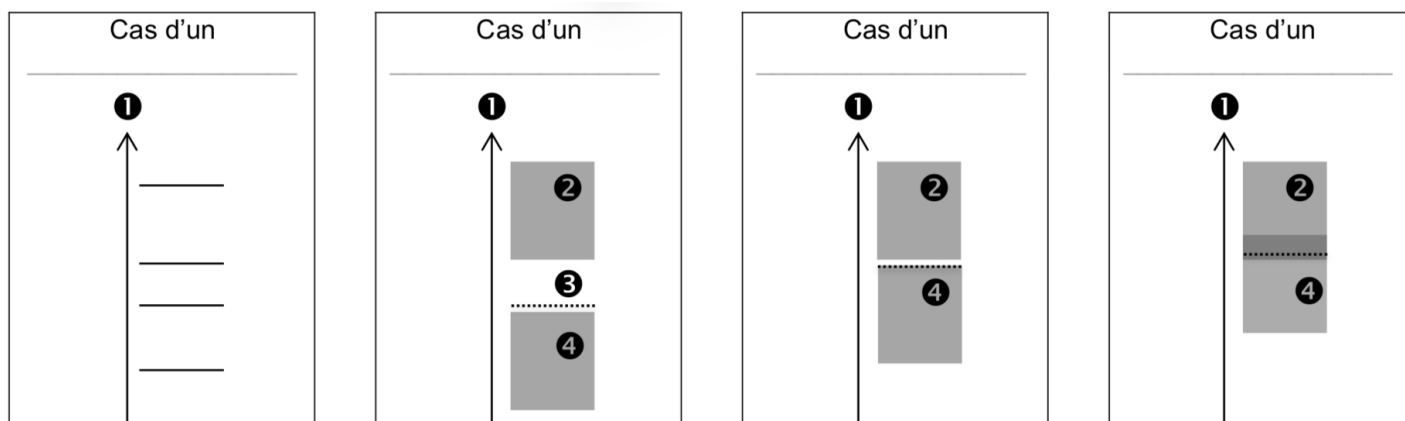
Dans les solides, les électrons occupent des bandes d'énergie séparées par des zones interdites. Un matériau est isolant si la bande interdite est trop large pour que les électrons atteignent la bande de conduction. Dans un conducteur, les bandes se chevauchent, permettant aux électrons de circuler. Les semi-conducteurs ont une bande interdite étroite : un photon d'énergie suffisante peut y faire passer un électron dans la bande de conduction. Le dopage (ajout d'impuretés comme le bore ou le phosphore) facilite ce passage.



Document 4 : Vocabulaire

Un **conducteur** permet le passage du courant électrique (ex. : cuivre, fer), tandis qu'un **isolant** ne le permet pas dans des conditions normales (ex. : plastique, verre). Un **semi-conducteur** peut se comporter comme l'un ou l'autre selon l'énergie reçue (ex. : silicium, germanium). Un **photon** est une particule de lumière, porteuse d'un **quantum** d'énergie. Le **quantum** désigne une quantité élémentaire d'énergie. L'**électron-volt** (eV) est une unité d'énergie adaptée aux phénomènes microscopiques. La **conductivité électrique** mesure la capacité d'un matériau à conduire l'électricité.

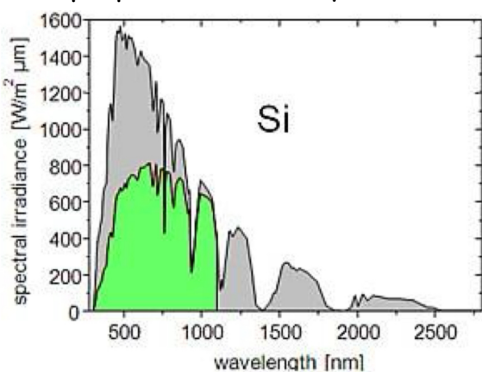
- 1) À température ambiante, **comparer** la conductivité des matériaux isolants, conducteurs et semi-conducteurs.
- 2) **Compléter** les mots manquants des schémas suivants représentant les diagrammes de niveaux d'énergie et attribuer une légende aux numéros 1 à 4.



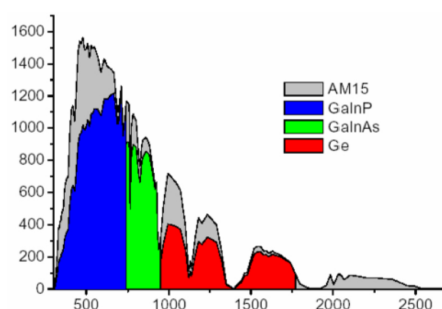
Les pointillés matérialisent la position du niveau de Fermi.

Document 5 : Spectres de semi-conducteurs

Les semi-conducteurs comme le silicium ont une conductivité intermédiaire entre isolants et conducteurs. Leurs propriétés électriques sont faciles à contrôler, ce qui les rend utiles pour fabriquer des cellules photovoltaïques. Dans ces cellules photovoltaïques, l'énergie nécessaire pour libérer des électrons, générant ainsi un courant électrique.



Cette figure représente le spectre d'émission solaire et le spectre d'absorption du silicium.



Cette figure représente le spectre d'émission solaire (AM1,5), celui du phosphore d'indium et de gallium (GaInP), celui de l'arséniure d'indium et de gallium (GaInAs) et du germanium (Ge)

- 3) À l'aide de vos connaissances, **représenter** la chaîne de conversion énergétique à l'œuvre dans le fonctionnement d'un panneau solaire (composé de cellules photovoltaïques).
- 4) Pour chacune des propositions suivantes, **indiquer** si elle est vraie ou fausse. **Justifier**.
 - a) Le silicium absorbe des rayonnements dont la longueur d'onde vaut 1 500 nm.
 - b) Le germanium absorbe globalement des rayonnements à des longueurs d'onde supérieures à ceux absorbés par le silicium.
 - c) Le germanium n'est pas approprié pour la fabrication de panneaux solaires.
 - d) Un panneau solaire composé uniquement de silicium exploite moins d'énergie électromagnétique du Soleil qu'un panneau composé uniquement d'un mélange GaInP, GaInAs et Ge.
 - e) Un panneau solaire ne peut convertir que l'énergie de la lumière visible en énergie électrique.

Activité 3: Une installation photovoltaïque communale

Introduction : Depuis toujours, l'électricité est majoritairement produite à partir d'un transfert mécanique, souvent via des turbines. Cependant, au XXe siècle, un nouveau mode de production a émergé : la conversion directe de l'énergie solaire en électricité grâce aux capteurs photovoltaïques. D'abord expérimentale, cette technologie est aujourd'hui utilisée à grande échelle.

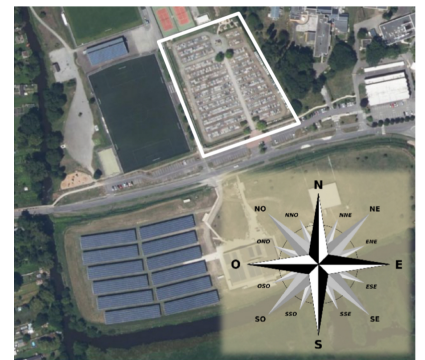
Problématique : Dans un contexte de hausse des prix de l'électricité et d'urgence climatique, comment les installations photovoltaïques, notamment en autoconsommation, peuvent-elles contribuer à une production énergétique plus durable et locale ?

Objectif : Argumenter autour de la mise en place d'une installation photovoltaïque domestique ou industrielle.

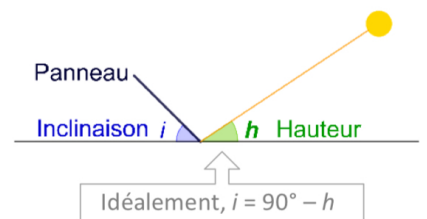
Document 1 : Equipement de Saint-Joachim

La commune de Saint-Joachim, située à environ 100 km au sud de Rennes, à la latitude 47° Nord, est en avance dans l'installation de panneaux photovoltaïques sur ses bâtiments publics. Une quinzaine de bâtiments, comme des équipements sportifs, une école ou une salle de spectacle, en sont déjà équipés.

Avec un peu plus de 4 000 habitants (soit 1 800 foyers), la commune prévoit d'aller plus loin : à l'été 2025, elle projette d'installer 5 375 panneaux photovoltaïques sur le cimetière, couvrant une surface de 8 600 m². Les panneaux seront inclinés à 20° et orientés vers le Sud-Sud-Est, dans le sens des tombes, pour des raisons esthétiques.



Vue aérienne du lieu d'installation.



Document 2 : Consommation par foyer à Saint-Joachim

Électricité

4,7 MWh

2,6 MWh
Commune la plus économe du dépt.

4,2 MWh
Moy. départementale

7,6 MWh
Commune la plus énergivore du dépt.

Entre 2021 et 2022

-10,6 %

Saint-Joachim

-4,2 % en France

Gaz

9,7 MWh

6,6 MWh
Commune la plus économe du dépt.

7,9 MWh
Moy. départementale

11,3 MWh
Commune la plus énergivore du dépt.

Entre 2021 et 2022

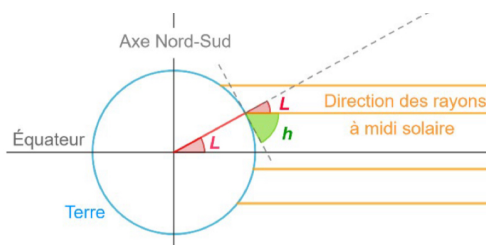
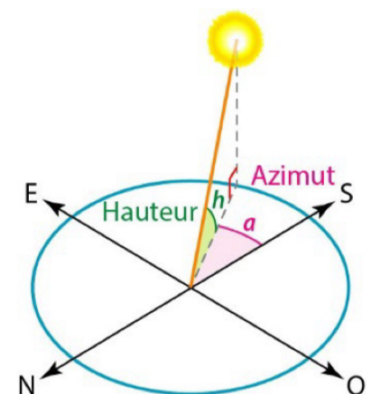
-20,8 %

Saint-Joachim

-19,8 % en France

Sources : Agence ORE – jusqu'au 31.12.2021 ; SDES – du 01.01.2022 au 31.12.2022

Consommation annuelle moyenne d'énergie par foyer à Saint-Joachim en 2022.



Aux équinoxes d'automne et de printemps, la hauteur maximale du Soleil est égale à $(90^\circ - L)$ où L est la latitude du lieu.

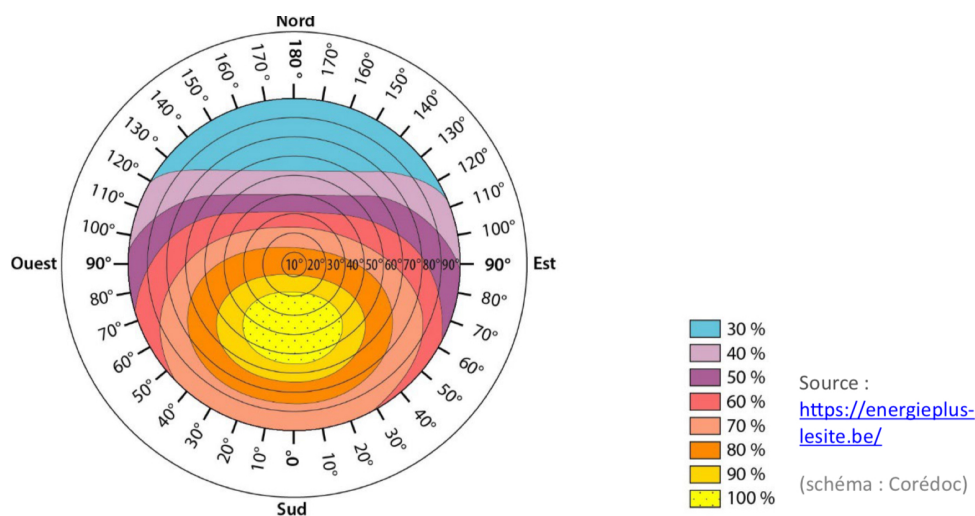
Document 3 : Critères de mise en place de panneaux photovoltaïques

Un panneau photovoltaïque capte le plus d'énergie quand les rayons du Soleil arrivent perpendiculairement à sa surface. L'énergie reçue par mètre carré dépend de deux facteurs : l'inclinaison et l'orientation du panneau.

Inclinaison : elle doit être adaptée à la hauteur du Soleil, qui varie selon la latitude, l'heure et la saison. Aux équinoxes (mars et septembre), la hauteur maximale du Soleil est $(90^\circ - L)$, où L est la latitude du lieu.

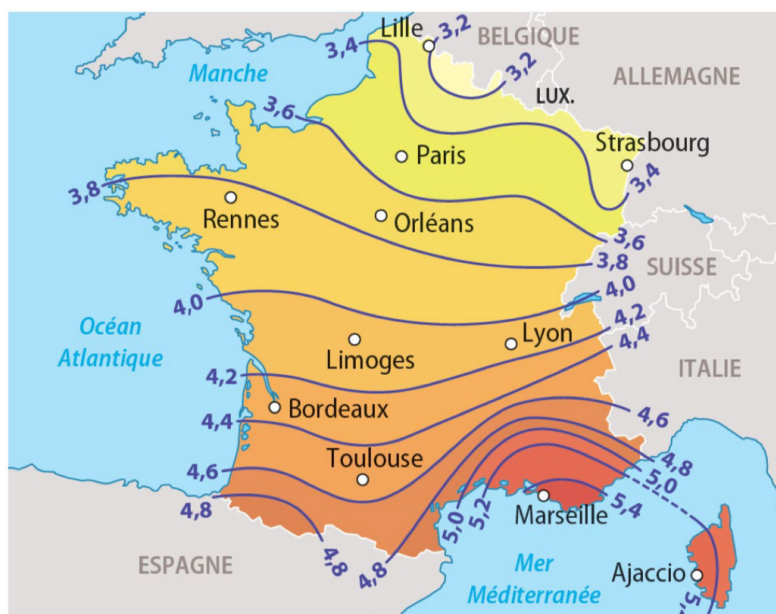
Orientation : elle influence l'éclairement tout au long de la journée. En France (hémisphère Nord), une orientation plein Sud est la plus efficace. L'orientation se mesure par l'azimut, l'angle entre la direction du panneau et le Sud.

Comme l'inclinaison et l'orientation des panneaux sont souvent fixes (notamment sur les toitures), il faut chercher le meilleur compromis entre contraintes techniques et efficacité. Le diagramme, ci-dessous, indique la puissance reçue selon ces deux paramètres, en comparant chaque configuration à une inclinaison optimale de 35° à 45° .



Document 4 : Valeurs moyennes d'éclairement en France

La carte ci-dessous indique les valeurs moyennes d'éclairement en $kWh \cdot m^{-2} \cdot J^{-1}$ pour des panneaux photovoltaïques dans leur inclinaison optimale.



Document 5 : Rendement de différents types de panneaux photovoltaïques au silicium

	Rendement	Prix (hors frais d'installation)	Caractéristiques
Silicium amorphe	Entre 6 et 7 %	De l'ordre de 100 € par m ²	Bon marché
Silicium polycristallin	Entre 15 et 18 %	Entre 150 et 300 € par m ²	Bonnes performances dans les régions avec un ensoleillement maximal
Silicium monocristallin	Environ 20 %	Entre 250 et 450 € par m ²	Bonnes performances dans les régions avec un climat tempéré

Document 6 : Cycle de vie des panneaux photovoltaïques

L'analyse du cycle de vie d'un panneau photovoltaïque permet d'évaluer son impact environnemental à chaque étape : extraction des matières premières, fabrication, transport, installation, utilisation (sur 25 à 30 ans), et fin de vie (recyclage ou déchets). Un panneau est recyclable à 95 %.

Aujourd'hui, plus de 90 % des panneaux sont faits de cellules photovoltaïques en silicium, le deuxième élément le plus abondant sur Terre. Il est extrait de minéraux comme le sable ou le quartz par un procédé de réduction à environ 3 000 °C, avec du carbone (souvent du bois). Le silicium est ensuite purifié à 99,9999 %, ce qui consomme 12 000 kWh d'énergie par tonne produite. Ce procédé est donc très énergivore et émet des gaz à effet de serre, souvent liés à l'usage d'énergies fossiles.

Un panneau met 2 à 3 ans à produire l'énergie nécessaire à sa fabrication. Le transport, notamment depuis la Chine (origine de 73 % des panneaux), contribue aussi aux émissions.

Sur l'ensemble de son cycle de vie, un panneau photovoltaïque émet entre 10 et 40 g CO₂eq/kWh, ce qui est comparable au nucléaire, mais bien inférieur aux énergies fossiles comme le gaz, le charbon ou le fioul (500 à 1 000 g CO₂eq/kWh). L'empreinte carbone de ces systèmes continue de diminuer.

Pour respecter l'accord conclu à l'issue de la COP21 (conférence sur le climat), la France vise une part de 32 % d'énergie renouvelable dans sa consommation d'énergie globale en 2030.

Technologie	Émissions (en gCO ₂ eq/kWh)
Photovoltaïque (Si cristallin)	
<i>Fabrication en Chine</i>	44
<i>Fabrication en Europe</i>	32
<i>Fabrication en France</i>	25
Éolien (moyenne terrestre et en mer)	12
Hydroélectrique	24
Centrale nucléaire	12
Centrale à gaz	500
Centrale à charbon	820

Bilan carbone approximatif de différentes technologies de production d'électricité sur l'ensemble du cycle de vie

- A) **Estimer** l'énergie renouvelable que doit produire la commune de Saint-Joachim.
- B) À l'aide des différents documents, **estimer** la part des besoins énergétiques des habitants de la commune qui seront couverts par la nouvelle installation du cimetière communal. **Explicit**er clairement chaque étape de la démarche.
- C) À l'aide de vos connaissances, **expliquer** pourquoi l'électricité produite par les panneaux photovoltaïques est dite « décarbonée ».
- D) **Expliquer**, à l'aide des documents, pourquoi il est tout de même nécessaire de nuancer cette affirmation.

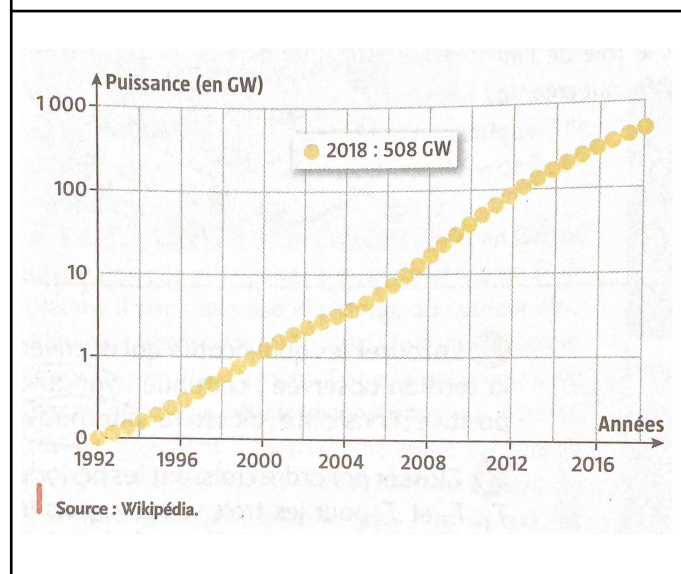
Activité 4: Le silicium, ressource clé du photovoltaïque

Introduction : Un panneau photovoltaïque produit de l'énergie électrique à partir de l'énergie lumineuse, en générant très peu de CO_2 . Mais ce n'est pas le cas de sa fabrication, très énergivore.

Problématique : Comment améliorer le bilan carbone de la filière photovoltaïque ?

Objectif : Identifier et comprendre les effets de la science sur les sociétés et sur l'environnement.

Document 1 : L'évolution de la puissance photovoltaïque dans les dernières décennies



Document 2 : Des panneaux photovoltaïques à partir du silicium

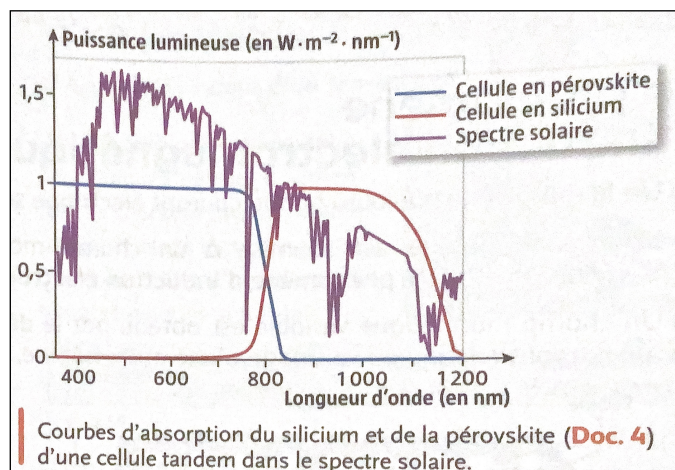
Le silicium est un élément très abondant sur Terre, en particulier dans le sable où il se trouve sous forme de silice (SiO_2). Toutefois, la fabrication de cellules photovoltaïques nécessite une silice extrêmement pure. Les cristaux de quartz pourraient convenir, mais ils sont beaucoup moins répandus et leur extraction reste coûteuse.

Pour obtenir du silicium, on fait réagir la silice avec du carbone et du dioxygène à plus de 3 000 °C : cette réaction produit du CO_2 et du silicium à l'état atomique. Le silicium doit ensuite subir plusieurs étapes de purification, elles aussi très énergivores car réalisées à haute température, afin d'atteindre une pureté de 99,999999 %. Après une dernière étape appelée « dopage », effectuée à environ 900 °C, le silicium est prêt à être utilisé dans les cellules photovoltaïques.

Un panneau photovoltaïque, composé de plusieurs dizaines de cellules, possède une durée de vie estimée à environ 25 ans. Son recyclage, encore peu développé, reste un processus coûteux en énergie et en eau.

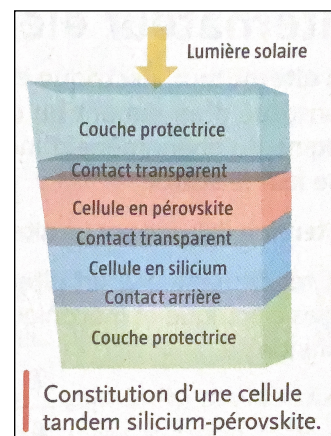
Document 3 : Choix d'un matériau adapté pour produire des cellules photovoltaïques

Pour qu'un matériau puisse servir à la fabrication d'une cellule photovoltaïque, il doit être capable d'absorber une partie de la lumière du Soleil qui atteint la Terre et posséder des propriétés de semi-conducteur. Le silicium, le plus utilisé, doit être « dopé » : on ajoute du phosphore pour obtenir un dopage N ou du bore pour obtenir un dopage P. Une cellule photovoltaïque est ensuite formée en associant ces deux types de silicium. Lorsque la lumière solaire est absorbée dans la zone N, certains électrons gagnent de l'énergie et se mettent en mouvement. Ils traversent alors un circuit extérieur pour rejoindre la zone P, ce qui génère un courant électrique.



Document 4 : Une piste prometteuse : l'utilisation de pérovskite dans des cellules tandem

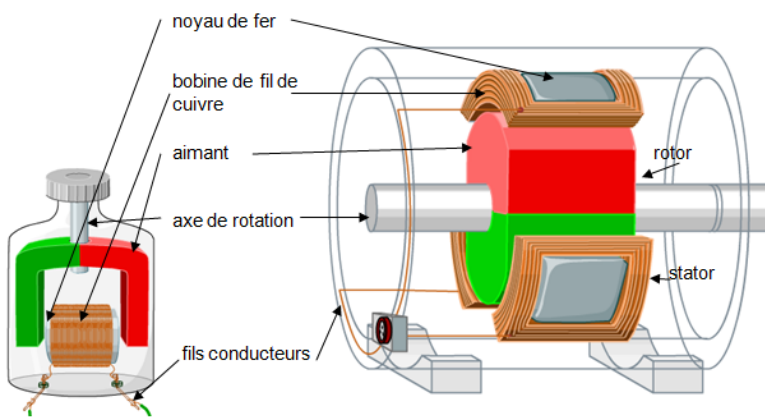
La recherche de nouvelles technologies pour améliorer le rendement et réduire le coût des cellules photovoltaïques est en pleine expansion. Parmi les solutions étudiées, une piste très prometteuse consiste à ajouter une fine couche de pérovskite sur les cellules en silicium. La pérovskite absorbe efficacement la lumière visible, tandis que le silicium capte mieux l'infrarouge, ce qui permet d'optimiser la conversion de l'énergie solaire. Quinze ans seulement après les premiers essais, des cellules expérimentales atteignent déjà un rendement de 34 %, contre un maximum de 23 % pour le silicium seul. L'ajout de la couche de pérovskite reste en outre peu coûteux, grâce à une technique proche de l'impression jet d'encre. Toutefois, les connaissances actuelles ne permettent pas encore d'assurer une production industrielle de ces cellules tandem avec une durée de vie suffisamment longue (environ 25 ans). Malgré cela, le nombre de recherches et d'articles scientifiques publiés sur ce sujet augmente rapidement.



- 1) **Calculer** le coefficient par lequel a été multiplié la puissance photovoltaïque entre 2000 et 2007, entre 2000 et 2012 et entre 2000 et 2018.
- 2) **Entourer** le terme qui convient dans la phase suivante : L'évolution de la puissance photovoltaïque utilisable dans le monde entre 1992 et 2018 est décrite par une fonction linéaire / affine / exponentielle / constante.
- 3) **Compléter** l'équation de la réaction modélisant la production de silicium à partir de silice.
$$\text{SiO}_2 + \text{C} \rightarrow \text{Si} + \text{CO}_2$$
- 4) On estime que produire un kilowattheure d'énergie électrique avec des panneaux photovoltaïques génère 40 fois moins de CO_2 que la combustion du pétrole. Le fioul étant obtenu à partir du pétrole, **proposer** une explication en comparant avec une centrale thermique alimentée en fioul.
- 5) **Expliquer** pourquoi le silicium est bien adapté à l'utilisation de l'énergie du Soleil.
- 6) **Indiquer** l'intérêt des cellules photovoltaïques associant le silicium et la pérovskite.
- 7) **Identifier** les étapes qui ont un impact sur le bilan carbone de la filière photovoltaïque et **proposer** des pistes permettant de l'améliorer.

1. Les alternateurs électriques et l'induction électromagnétique

Les alternateurs électriques sont des machines qui transforment l'énergie mécanique en énergie électrique grâce au phénomène d'**induction électromagnétique**, découvert par **Michael Faraday** au XIX^e siècle et théorisé par **James Clerk Maxwell**. Le principe repose sur la variation d'un champ magnétique dans le temps à proximité d'un conducteur, ce qui induit un courant électrique dans ce conducteur. Dans un alternateur, un **rotor** tournant, entraîné par une source d'énergie mécanique, crée un champ magnétique variable autour du **stator**, qui contient des bobines de fil conducteur. L'interaction entre le champ magnétique et les bobines du stator induit un courant alternatif qui peut être utilisé pour alimenter un réseau électrique.



Le fonctionnement des alternateurs repose sur la géométrie et la vitesse du rotor. La **fréquence du courant produit** dépend du nombre d'aimants N et de la vitesse de rotation ω (tr/s), la fréquence f (Hz) est donnée par : $f = N \times \omega$.

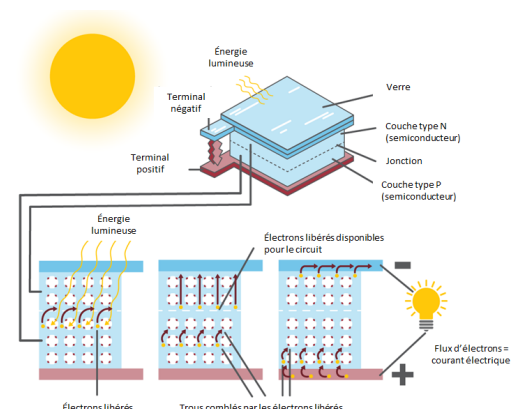
Les alternateurs modernes présentent un **rendement élevé**, parfois proche de 1, ce qui signifie que presque toute l'énergie mécanique est convertie en énergie électrique. Le **rendement** (η) d'une machine est le **rapport entre la puissance utile et la puissance absorbée**. Il exprime la **part de l'énergie reçue qui est transformée efficacement par la machine**, le reste étant perdu (principalement sous forme de chaleur, frottements, etc.).

$$\eta = \frac{E_{\text{utile}}}{E_{\text{absorbée}}} = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{absorbée}}}$$

Cependant, plusieurs facteurs réduisent le rendement réel. Parmi eux, on trouve les **pertes par frottement** dans les pièces mécaniques, les **pertes thermiques** dues à l'échauffement des conducteurs et du noyau, les **pertes électriques** dans les résistances des bobines, et les **pertes magnétiques** dans les parties ferromagnétiques de la machine.

2. Révolution de la physique et semi-conducteurs

Au début du XX^e siècle, la mécanique quantique a permis de comprendre le comportement des électrons dans les matériaux et d'exploiter les **semi-conducteurs** comme le silicium, qui, **dopé en zones P et N**, forme des jonctions capables de convertir la lumière en électricité.



3. Les capteurs photovoltaïques

Les **panneaux photovoltaïques** fonctionnent sur le principe de la conversion de l'énergie radiative du soleil en électricité. La lumière incidente excite les électrons dans le matériau semi-conducteur, générant un courant. Le rendement de cette conversion n'est pas total et dépend du matériau utilisé ; pour le silicium cristallin, il se situe généralement entre **15 et 22 %**.

L'étude des **spectres** permet de vérifier l'adéquation d'un matériau pour un capteur solaire. Le **spectre solaire** couvre principalement le visible ($\approx 400-700$ nm) et le proche infrarouge ($\approx 700-1100$ nm). Le silicium absorbe efficacement jusqu'à ~ 1100 nm et devient transparent au-delà, ce qui le rend particulièrement adapté pour capter la majeure partie du rayonnement solaire utile.

3.1 Contraintes d'installation des panneaux solaires

Pour maximiser la production d'électricité, les panneaux doivent être installés dans des conditions optimales. Il faut une bonne **orientation**, une bonne **inclinaison** et un bon **emplacement**.

3.2 Intérêts des panneaux photovoltaïques

Les panneaux photovoltaïques présentent un double intérêt : **environnemental** et **économique**. Sur le plan environnemental, ils utilisent une énergie renouvelable et propre, réduisant les émissions de CO_2 et la dépendance aux énergies fossiles. Sur le plan économique, ils permettent de produire de l'électricité gratuite après installation, de diminuer la facture énergétique et de revendre éventuellement le surplus au réseau, offrant un retour sur investissement à long terme.

3.3 Limites et contraintes

Malgré leurs avantages, les panneaux solaires présentent plusieurs limites. Leur **rendement limité** signifie qu'une grande partie de l'énergie solaire n'est pas convertie en électricité. L'énergie solaire est **intermittente** et dépend des conditions météorologiques et de la saison. Les panneaux ont également une **durée de vie limitée**, nécessitent un **recyclage en fin de vie**, et leur installation dépend fortement de l'emplacement et de la surface disponible.