



POUR BIEN COMMENCER

Quelques notions déjà vues

PC 2^{de} Puissance et énergie électriques



La **puissance électrique** fournie par un générateur est :

$$W = U \times I$$

W U
V I

L'**énergie électrique** fournie par un générateur de puissance P pendant un temps Δt est :

$$J = P \cdot \Delta t.$$

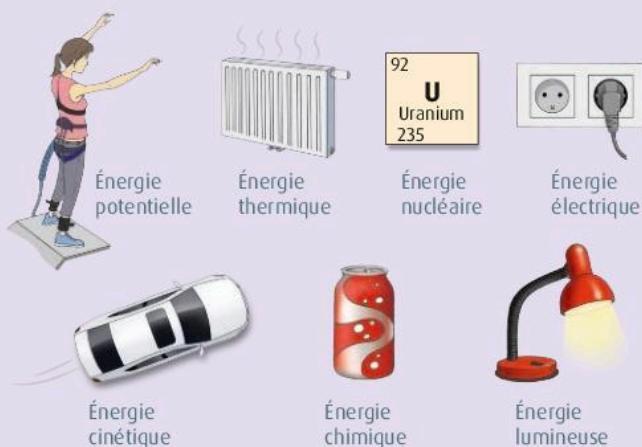
J P
W s

L'énergie s'exprime en J (SI), on la trouve aussi exprimée en Wh.

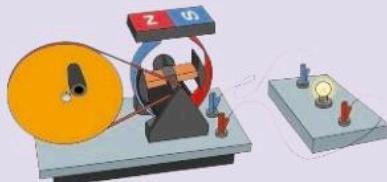
Conversion utile : 1 Wh = 3 600 J.

PC Cycle 4 Différentes formes d'énergie

L'énergie d'un système caractérise sa capacité à fournir un travail. Elle existe sous différentes formes (électrique, chimique, potentielle, cinétique, thermique, nucléaire, lumineuse).



PC Cycle 4 Chaîne de conversion énergétique



Se tester avant de démarrer

Savez-vous répondre aux questions suivantes ?

1. L'affirmation « la puissance correspond à un débit d'énergie » vous semble-t-elle juste ? Justifiez.
2. Qu'est-ce que la conservation d'énergie dans un système ?
3. Quelles méthodes de production d'électricité utilisées dans votre quotidien connaissez-vous ?

Centrales électriques près de Cruas. En Ardèche, une centrale solaire photovoltaïque disposée sur les toits de serres agricoles se trouve à proximité de la centrale nucléaire de Cruas et de deux éoliennes. Cette image illustre la diversité des modes de production d'électricité en France, bien que le nucléaire reste largement majoritaire.



LES ATOUTS DE L'ÉLECTRICITÉ



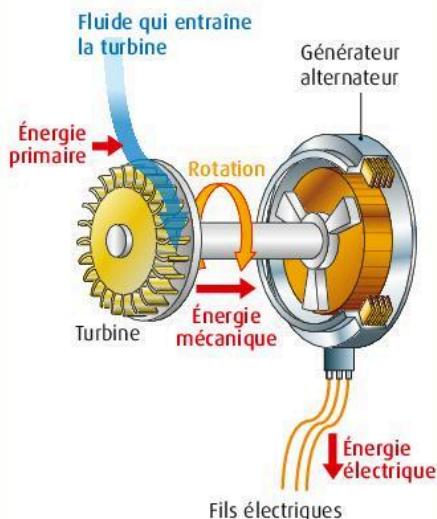
Quelles méthodes permettent d'obtenir de l'énergie électrique sans combustion et quelles sont leurs conséquences écologiques ?

La conversion de l'énergie mécanique en électricité

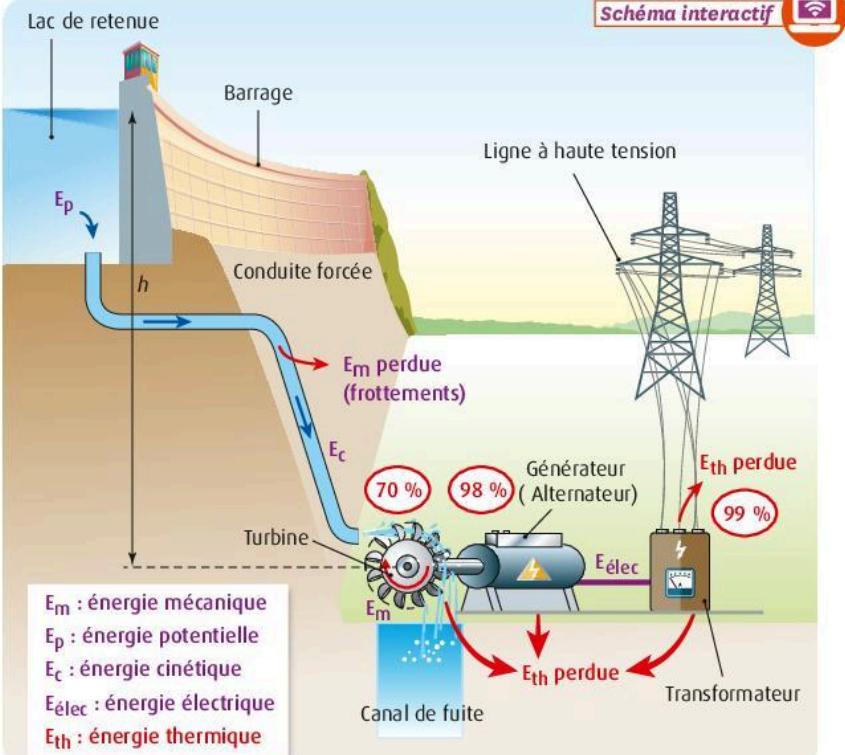
Différentes méthodes permettent d'obtenir de l'énergie électrique dans nécessiter de combustion. La plupart repose sur la conversion d'énergie mécanique de rotation en énergie électrique.

Comment obtenir de l'électricité à partir d'énergie mécanique ?

Une centrale électrique est un site industriel destiné à la production d'électricité. Les sources d'énergie primaire sont variables, ce qui détermine les différents types de centrale (éolienne, hydraulique, nucléaire, thermique, etc.).



DOC 1 Le principe des centrales électriques.



DOC 2 Le fonctionnement d'un barrage. Les pourcentages indiqués sont des rendements estimés, qui varient en fonction des barrages.



DOC 3 Exemple de barrage. Le barrage hydraulique de Grand'Maison en Isère alimente la centrale hydroélectrique la plus puissante de France, 1800 MW au total. La retenue en amont du barrage se situe environ 900 m au-dessus de deux usines de production.

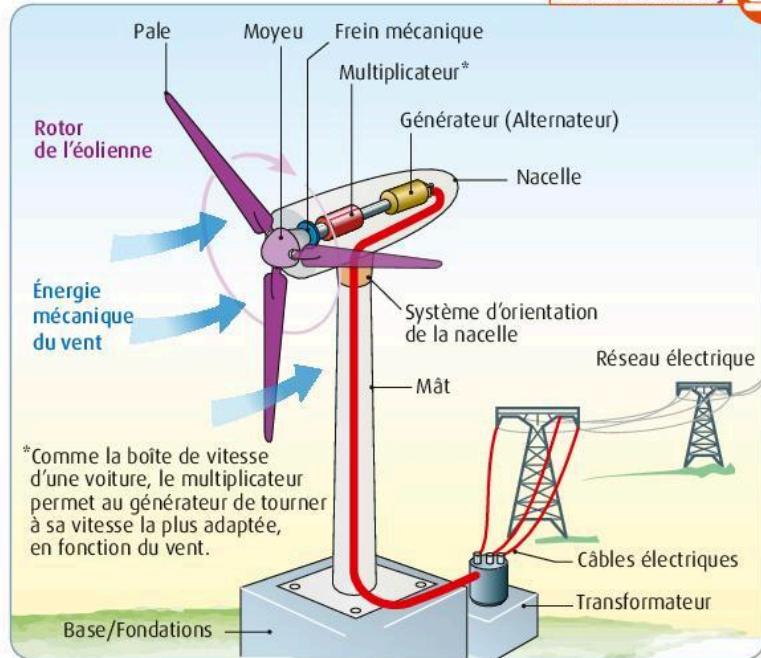
Schéma interactif

**DOC 4** Éoliennes et hydroliennes.

Les éoliennes et les hydroliennes utilisent l'énergie mécanique (cinétique) du vent et des courants marins respectivement, qu'elles convertissent en électricité grâce à une turbine couplée à un générateur.

	Diamètre du rotor	Rendement (%)	Ordres de grandeur des puissances électriques fournies
Petit éolien	< 35 m	22	1 kW à 350 kW
Éolien moyen	35 à 100 m	30	350 kW à 5 MW
Grand éolien	> 100 m	35	Autour de 5 MW
Hydrolien	Entre 10 et 20 m	Environ 40	300 kW à 1,2 MW

DOC 6 Tableau des rendements. Le rendement des éoliennes et hydroliennes dépend de paramètres comme la taille du rotor (pales et moyeu), mais également de variables comme la vitesse du vent ou des courants. On peut cependant estimer un rendement moyen, donné ici pour différents diamètres de rotor.

**DOC 5 Fonctionnement d'une éolienne.**

ESPRIT CRITIQUE		
Paramètre considéré	Hydrolien	Éolien terrestre
Discretion	⊕ (immérgé)	⊖
Compacité	⊕ (20 m de diamètre en moyenne)	⊖ (80 m de diamètre en moyenne)
Prédicibilité de la production	⊕ courants et marées connus et prédictibles	⊖ variabilité de la vitesse du vent
Sites d'installation possibles	⊖ plus rares; compatibilité demandée avec les activités humaines	⊕
Accessibilité pour l'installation et la maintenance	⊖	⊕
Prix de l'énergie (estimation)	⊖ 250 €/MWh	⊕ 70 €/MWh

DOC 7 Hydrolien ou éolien?**EXPLOITER LES DOCUMENTS**

- On considère qu'1 kg d'eau du lac de retenue du barrage de Grand'Maison a une énergie potentielle de 9 kJ. À partir des rendements du **DOC. 2**, calculez l'énergie récupérée à la sortie du transformateur pour 1 kg d'eau traversant la turbine.
- Un foyer français qui se chauffe à l'électricité consomme environ 10 000 kWh/an. Calculez combien de kg d'eau traversant la turbine du barrage de Grand'Maison cela représente. ($1 \text{ Wh} = 3,6 \times 10^3 \text{ J}$)
- Dessinez la chaîne de conversion énergétique pour une éolienne et une hydrolien (**DOCS 4 et 5 et rappel p. 130**).
- Calculez la quantité d'énergie susceptible d'être produite (en kWh) par une éolienne moyenne de 1 MW sur 24 h (**DOC. 6**), puis calculez la consommation moyenne sur une journée d'un foyer français (question 2). Déduisez-en combien de foyers au maximum peuvent être alimentés par cette éolienne sur 24 h.

ESPRIT CRITIQUE

En 2018, le groupe fabricant de turbines Naval Energies se retire de l'hydrolien qu'il ne juge pas assez rentable.
Un débat est de plus toujours en cours entre les partisans et les détracteurs de l'énergie hydrolienne.

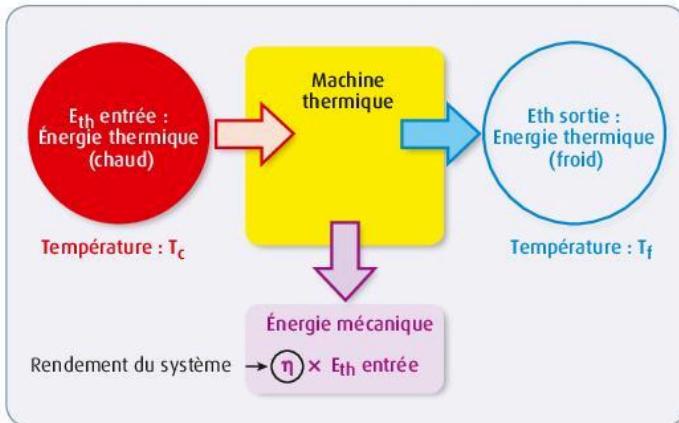
→ Comment expliquer que l'énergie hydrolienne soit beaucoup plus chère que l'énergie éolienne ?

Pistes de travail ► **DOCS 6 et 7 et recherche Internet**

La conversion de l'énergie thermique en électricité

Les centrales nucléaires, géothermiques et solaires thermiques ont un point commun : elles convertissent de l'énergie thermique obtenue sans combustion en énergie électrique.

Comment obtenir de l'électricité à partir d'énergie thermique ?



En 1824, le physicien Carnot établit qu'une machine thermique, comme la turbine entraînée par de la vapeur dans une centrale électrique, ne peut fonctionner qu'en utilisant au minimum deux sources de température différente : une source chaude à T_c et une source froide à T_f .

Il démontre que le rendement maximal d'une telle machine vaut :

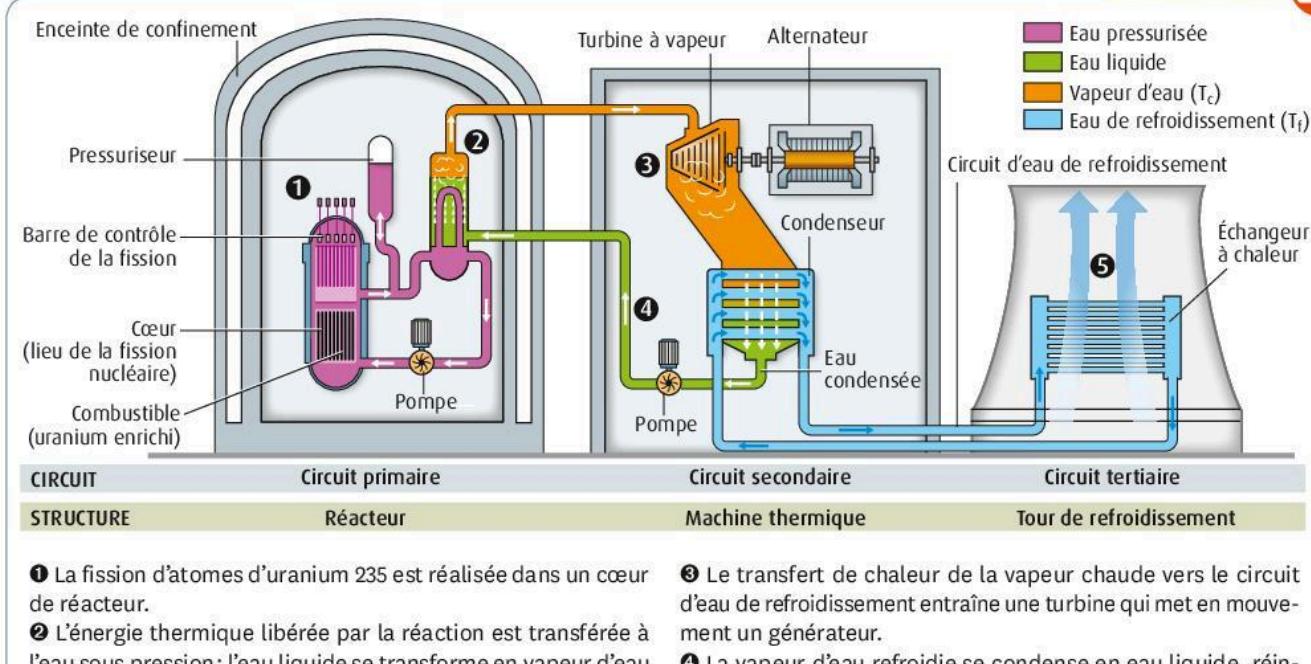
$$1 - \frac{T_f}{T_c} \quad \text{avec } T \text{ en Kelvin (K).}$$

Rappel: $T(K) = T(^{\circ}\text{C}) + 273,15$

DOC 1 Principe d'une machine thermique. Pour transformer l'énergie thermique (E_{th}) en énergie mécanique (E_m), il faut la transférer d'une source chaude vers une source froide. On appelle cela une machine thermique. Son rendement η dépend essentiellement des deux températures chaude (T_c) et froide (T_f).

DOC 2 Le rendement maximal d'une machine thermique.

Schéma interactif



① La fission d'atomes d'uranium 235 est réalisée dans un cœur de réacteur.

② L'énergie thermique libérée par la réaction est transférée à l'eau sous pression : l'eau liquide se transforme en vapeur d'eau sous pression.

③ Le transfert de chaleur de la vapeur chaude vers le circuit d'eau de refroidissement entraîne une turbine qui met en mouvement un générateur.

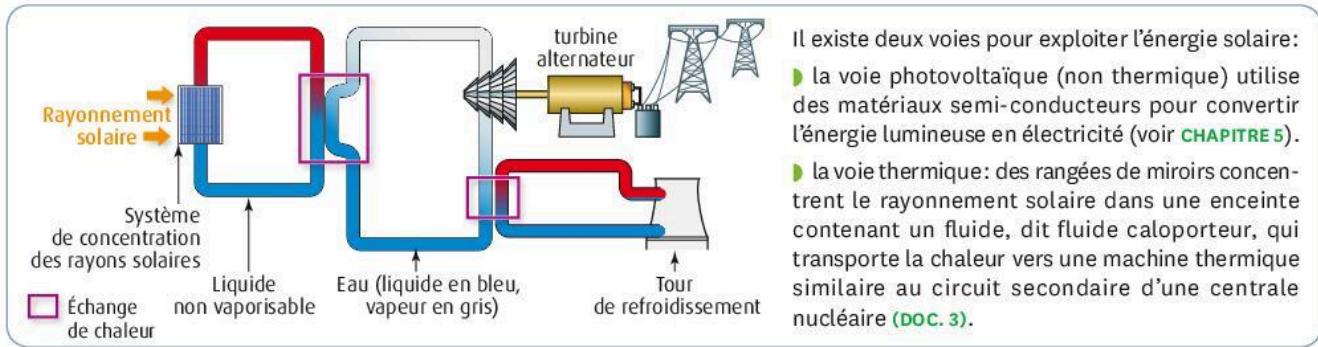
④ La vapeur d'eau refroidie se condense en eau liquide, réinjectée dans le circuit primaire.

⑤ La tour de refroidissement refroidit l'eau du circuit tertiaire.

La fission d'un gramme d'uranium 235 libère 73 MJ d'énergie, soit autant que la combustion de 2 tonnes de pétrole.



DOC 3 Cas d'une centrale nucléaire à eau pressurisée. Une tranche de centrale nucléaire (c'est-à-dire un réacteur) de ce type fournit une puissance électrique de l'ordre de 1GW.



Il existe deux voies pour exploiter l'énergie solaire:

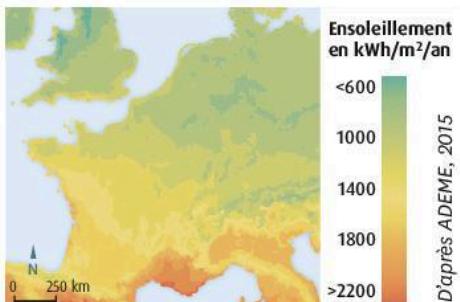
- la voie photovoltaïque (non thermique) utilise des matériaux semi-conducteurs pour convertir l'énergie lumineuse en électricité (voir CHAPITRE 5).
- la voie thermique: des rangées de miroirs concentrent le rayonnement solaire dans une enceinte contenant un fluide, dit fluide caloporeur, qui transporte la chaleur vers une machine thermique similaire au circuit secondaire d'une centrale nucléaire (DOC. 3).

DOC 4 Exploitation de l'énergie solaire.

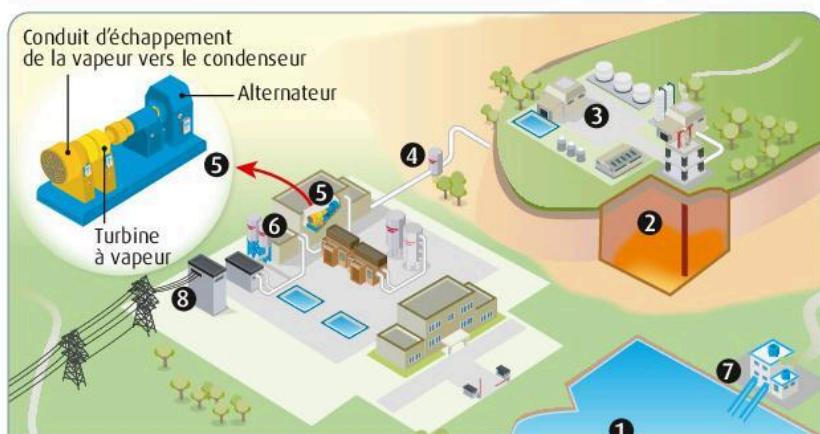


DOC 5 La centrale solaire thermique de Llo.

Cette centrale inaugurée en 2019 a une puissance de 9 MW. C'est la première centrale de ce type à stocker de l'énergie. Des ballons accumulateurs permettent de stocker plus de 1000 m³ de vapeur, ce qui permet d'alimenter le réseau en électricité la nuit.



DOC 6 Carte de l'ensoleillement.



- ❶ L'eau de mer et l'eau de pluie s'infiltrent dans le sous-sol.
- ❷ En profondeur, l'eau infiltrée se réchauffe au contact des roches chaudes (environ 250 °C).
- ❸ L'eau chaude prélevée grâce à des forages se vaporise partiellement lors de sa remontée vers la surface.
- ❹ Le mélange eau-vapeur se sépare par gravité dans un ballon séparateur. L'eau et la vapeur sont transportées séparément jusqu'à la centrale.

- ❺ La vapeur, en se refroidissant, entraîne la turbine reliée au générateur, qui produit de l'électricité.
- ❻ La vapeur est refroidie grâce au condenseur, alimenté par l'eau de mer. Elle est ensuite acheminée jusqu'à la mer avec l'eau issue du ballon séparateur.
- ❼ La station de pompage fournit l'eau de mer de refroidissement nécessaire au condenseur.
- ❽ L'électricité produite par la centrale est délivrée sur le réseau électrique.

DOC 7 La géothermie. La chaleur de la Terre permet de récupérer de l'eau chaude qui se transforme en eau et vapeur à pression atmosphérique. Une centrale de ce type a une puissance de l'ordre de 15 MW.

EXPLOITER LES DOCUMENTS

1. Notez dans un tableau les points communs et les différences dans le fonctionnement des centrales nucléaires, solaires thermiques et géothermiques.
2. Calculez le rendement théorique maximal d'une centrale nucléaire dont la vapeur est à 300 °C et la source froide est à 27 °C (DOC. 2).
3. À l'aide d'une recherche internet, trouvez et comparez les rendements moyens d'une centrale nucléaire et d'une centrale solaire thermique.
4. Indiquez l'avantage de la centrale solaire du DOC. 5 par rapport à une centrale photovoltaïque. Justifiez de la situation géographique de cette centrale en France (DOC. 6).
5. Indiquez combien de centrales solaires et géothermiques sont nécessaires pour remplacer une centrale nucléaire?

ESPRIT CRITIQUE

Comparez l'ensoleillement en France et en Allemagne et la puissance produite par ces deux pays par des centrales solaires thermiques ou photovoltaïques.

→ Qu'en concluez-vous ?

Pistes de travail ► DOC. 6 et recherche Internet

La conversion électrochimique

Dans les appareils domestiques ou les véhicules électriques, on produit de l'électricité à partir d'énergie chimique que l'on peut stocker de façon locale dans des batteries éventuellement rechargeables.

Comment produire de l'électricité à partir de réactions chimiques ?



S'opposant à Galvani qui pensait que l'électricité était d'origine animale, l'Italien Alessandro Volta découvre en 1799 que deux métaux différents reliés par une solution conductrice comme de l'eau salée produisent de l'électricité. Pour amplifier cet effet, Volta empile alternativement des disques de zinc, d'argent et de carton imbibé de solution salée. Il touche le dernier disque de cuivre en haut de la pile

et plonge un fil conducteur relié au premier disque en bas de la pile dans une solution d'eau salée. En mettant sa deuxième main dans la solution d'eau salée, il ressent un choc électrique. Il présente sa découverte en 1800 à Napoléon et l'Académie des Sciences. Le succès est total, la première pile électrochimique est née.

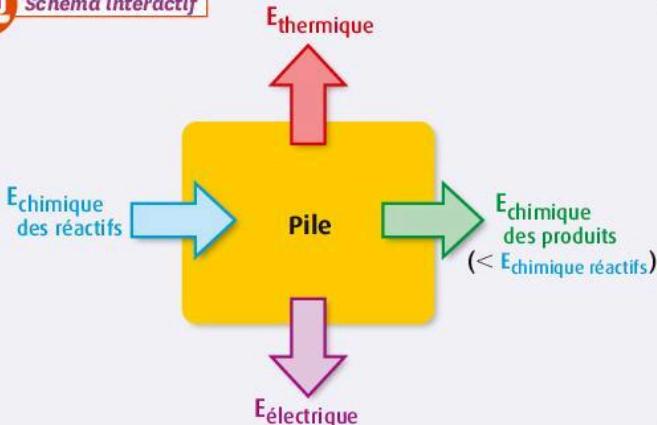
Vidéo: la pile de Volta



DOC 1 Expérience historique, la pile de Volta.



Schéma interactif



DOC 2 Conversion d'énergie chimique en énergie électrique.

Une pile électrochimique est constituée de **deux électrodes** de nature différente, généralement métalliques, plongeant dans une solution conductrice (ou électrolyte). Lorsque la pile fonctionne, il se produit une transformation chimique spontanée entraînant un mouvement d'ions dans la solution conductrice et un mouvement d'électrons dans les électrodes reliées par un fil conducteur. Ce mouvement d'électrons est à l'origine de la tension aux bornes de la pile.

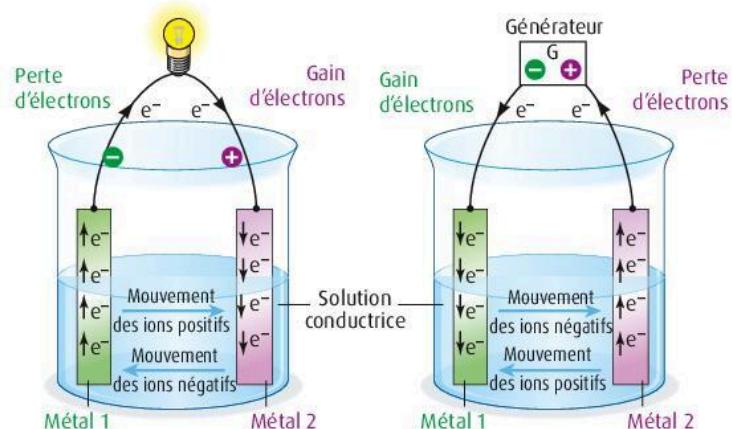
La consommation des réactifs entraîne l'usure de la pile. Une pile rechargeable, ou **accumulateur**, est une pile dont le fonctionnement est réversible: en appliquant une tension aux bornes de la pile, on force la transformation chimique à se dérouler dans l'autre sens afin de régénérer les réactifs. Cette transformation forcée est appelée une **électrolyse**. Elle permet de recharger un accumulateur (ou batterie) et de stocker l'énergie électrique sous forme d'énergie chimique (voir **UNITÉ 5**).

EXPÉRIMENTATION

- Plonger deux lames métalliques (électrodes), l'une en cuivre et l'autre en zinc, dans un bêcher contenant une solution de sulfate de cuivre.
- Relier les deux électrodes à un ampèremètre.



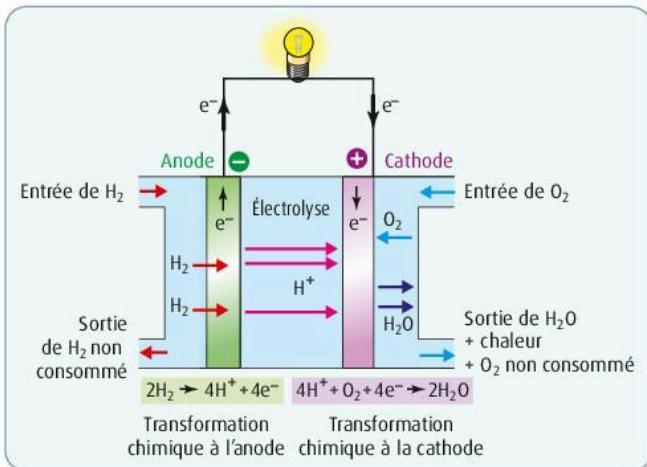
DOC 3 Fabrication expérimentale d'une pile.



Conversion d'énergie chimique en énergie électrique : pile

Conversion d'énergie électrique en énergie chimique : charge d'un accumulateur

DOC 4 Principe de fonctionnement des piles et accumulateurs.



DOC 5 La pile à hydrogène. Les piles à hydrogène sont des piles à combustible car la décomposition de H_2 en $2H^+$ et $2e^-$ est appelée une **combustion électrochimique**. Le métal permettant cette décomposition est le platine, un métal très rare et précieux.

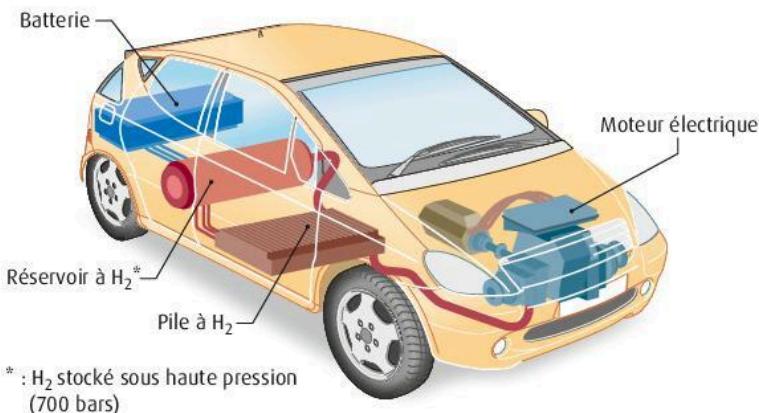


DOC 6 Des bus à hydrogène en Île-de-France.

Depuis la rentrée 2019, deux bus à hydrogène sont en service sur la ligne 264 entre Jouy-en-Josas et Versailles-Chantiers.

Conçues à l'origine pour alimenter les navettes spatiales, les piles à combustible ont maintenant un potentiel d'utilisation plus large. Ainsi, Toyota investit depuis 2012 des milliards dans le développement de cette technologie. Ce pionnier de la voiture à hydrogène travaille de plus à l'élaboration d'une pile qui n'utiliserait

que 10 g de platine pour 100 kW de puissance. Persuadé que l'hydrogène est l'avenir de la voiture électrique, le constructeur a partagé gratuitement ses 5 600 brevets relatifs à la pile à combustible en janvier 2015. But clairement annoncé : que ses concurrents adoptent également la pile à combustible et la fassent progresser.



DOC 7 De la navette spatiale à la voiture électrique.

EXPLOITER LES DOCUMENTS

- Schématisez le circuit électrique du **DOC. 3**. Proposez un protocole pour visualiser le sens de propagation du courant en sortie de la pile.
- Proposez un protocole pour mettre en évidence les pertes thermiques (**DOCS 2 et 3**).
- Schématisez le bilan énergétique de la pile à hydrogène. Précisez la nature des réactifs et des produits (**DOCS 2 et 5**).
- Une batterie de voiture fournit 648 Wh. Estimez le nombre de batteries nécessaires à un foyer qui ne consomme que de l'énergie électrique (10 000 kWh/an). Déduisez si la conversion électrochimique pourrait servir pour produire de l'électricité à l'échelle industrielle.

ESPRIT CRITIQUE Sources de la production mondiale de H_2



La production de H_2 à partir de gaz naturel et de combustibles fossiles libère du CO_2 . L'électrolyse de l'eau consiste à transformer l'eau en H_2 et O_2 sous l'action d'un courant électrique. Cette méthode ne libère pas de CO_2 mais son rendement est plus faible.

Le stockage de H_2

La compression de H_2 pour son stockage sous forme liquide requiert beaucoup d'énergie. De plus, les procédés de stockage de H_2 représentent des défis technologiques. Le mélange $H_2 + O_2$ produisant un gaz détonant, la moindre fuite de H_2 peut avoir de graves conséquences.

DOC 8 L'hydrogène, une énergie d'avenir ?

ESPRIT CRITIQUE

L'utilisation de la pile à hydrogène pour le transport est encore anecdotique et toutes les compagnies automobiles n'investissent pas dans cette technologie.

→ Quels sont les arguments des opposants à cette technologie ? Vous parlerez des problèmes technologiques liés au stockage et aux impacts environnementaux de la production.

Pistes de travail ► **DOC. 9 et recherche Internet**

Des conséquences environnementales de la production d'électricité

Si l'électricité produite sans combustion est souvent considérée comme une « énergie verte », l'impact sur l'environnement n'est cependant pas sans conséquences.

Quelles sont les conséquences environnementales de méthodes de production d'électricité sans combustion ?

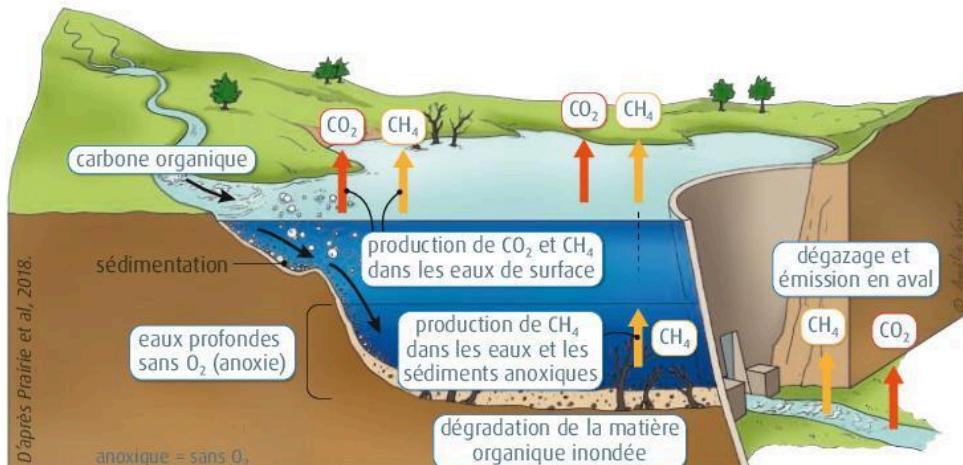


Le barrage de la Grande-Dixence, situé en Suisse, retient $400 \times 10^6 \text{ m}^3$ d'eau. Il mesure 285m de haut, 700m de large au sommet, a une épaisseur à la base de 200m et pèse 15×10^6 tonnes. Pour le construire, $6 \times 10^6 \text{ m}^3$ de béton ont été déversés. Le béton est constitué de petits fragments de roche prélevés dans des carrières ou dans des rivières par des outils de chantier et transportés jusqu'au site de production du béton par camions. Ces fragments de roches sont liés par un ciment obtenu par calcination du calcaire (CaCO_3). Le calcaire est extrait des carrières par des outils de chantier, transporté jusqu'aux cimenteries où il est chauffé afin de le débarrasser du CO_2 qu'il contient (1tonne de ciment produit environ 800 kg équivalent CO_2). Le ciment est ensuite transporté jusqu'au site de production du béton.

DOC 1 Beaucoup de béton dans les barrages.

DOC 2 Inondation des terres.

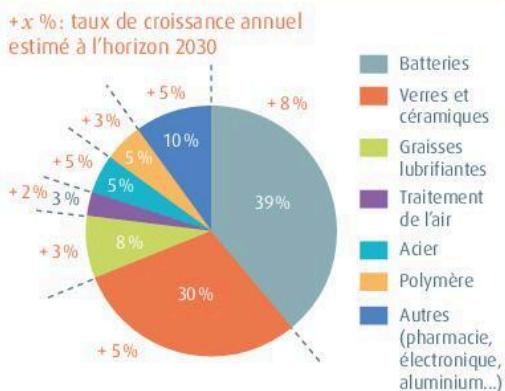
Lors de la mise en eau d'un barrage, de nombreux organismes dont la capacité de déplacement est inférieure à la vitesse de montée des eaux sont détruits. La matière organique végétale immergée est dégradée en libérant d'importantes quantités de CH_4 et de CO_2 . Des mesures effectuées en Argentine montrent que certains barrages émettent autant de GES qu'une usine à charbon.



Modifications	Conséquences environnementales
Diminution du débit en aval	Transformation de l'habitat en aval du barrage. Salinisation des terres agricoles. Augmentation de la concentration en polluants.
Diminution de la vitesse de l'eau en amont et augmentation de la profondeur	Transformation des habitats en amont du barrage. Remplacement des espèces naturelles par d'autres préférant la profondeur et les courants lents.
Modification des processus d'érosion en amont et en aval	Diminution des processus d'érosion latérale en amont.
Piégeage des sédiments dans le réservoir	Accumulation de polluant dans les sédiments (qui peuvent être purgés brutalement vers l'aval et polluer les rivières).
Interruption du cours d'eau	Augmentation de la température. Diminution de la concentration en O_2 . Diminution de l'autoépuration de l'eau. Libération de gaz à effet de serre. Obstacle au déplacement des espèces piscicoles en migration. Fragmentation de l'habitat pour les espèces locales (poissons, mollusques, crustacés, insectes).

DOC 3 Modification des écosystèmes.

Comparaison de l'exploitation du Li filonien ou évaporitique



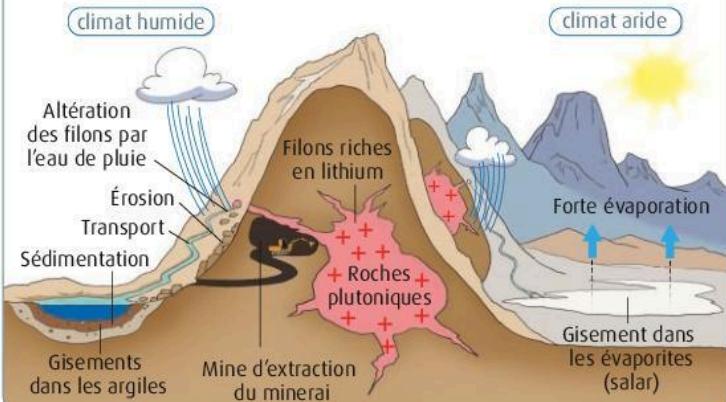
Une batterie de voiture électrique nécessite 2 à 3 kg de lithium. Dans l'industrie, le lithium (Li) est utilisé dans la fonderie de l'aluminium, il permet de produire des pièces plus légères et solides en aéronautique, il absorbe le CO₂ dans les sous-marins... Sous sa forme ionique Li⁺, il est utilisé comme traitement contre les syndromes dépressifs.

DOC 4 Les utilisations du lithium.



DOC 6 Les salars : des mines de lithium à ciel ouvert.

Les minéraux riches en lithium se forment à partir de roche magmatiques après une lente cristallisation (roches platoniques). Ils sont extraits mécaniquement par les humains ou altérés par les eaux de pluie. En climat humide, le lithium transporté par le ruissellement de l'eau précipite dans des argiles. En climat aride, l'évaporation de l'eau laisse le lithium sous forme de roches blanches appelées évaporites, que l'on trouve dans des zones appelées salars.



DOC 5 La formation des gisements de lithium.

ESPRIT CRITIQUE

Localization des ressources et de leur exploitation



Avec l'essor des batteries dans les téléphones portables, les ordinateurs ou les voitures électriques, la demande en lithium a explosé dans les dernières décennies. Si le lithium est une ressource abondante de la croûte terrestre, il n'existe en concentration permettant une exploitation économique qu'en très peu d'endroits sur Terre. 70 % de la production se situent actuellement au carrefour entre la Bolivie, le Chili et l'Argentine. Cette situation explique que la tonne de lithium soit passée de 350 \$ en 2003 à 25 000 \$ en 2018. L'exploitation la moins coûteuse a lieu dans les salars d'Amérique du Sud. Les eaux de ruissellement riches en lithium sont pompées puis évaporées pour récupérer le lithium qui est ensuite purifié. Il en résulte un assèchement de la zone, une contamination des sols et la destruction d'écosystèmes regroupant une biodiversité importante et unique. La raréfaction de l'eau autour des mines de lithium cause également l'exode rural des agriculteurs face à la dégradation de leurs conditions de vie. Face à cet impact environnemental, la recherche se tourne vers le recyclage des batteries au lithium. Une des difficultés actuelles majeures est le risque d'explosion lors du processus de recyclage.

DOC 7 Les batteries au lithium : une énergie verte ?

EXPLOITER LES DOCUMENTS

1. Les ingénieurs disent qu'avec le béton utilisé pour le barrage du **DOC.1**, on pourrait réaliser un mur de 1,5 m de haut, de 10 cm de large, qui ferait le tour de la Terre à l'équateur (40 000 km). Calculez le volume de ce mur puis comparez-le à celui du barrage afin de commenter l'affirmation des ingénieurs.
2. Schématissez les différentes étapes de la mise en place et de la mise en eau d'un barrage qui produisent des GES (**DOCS 1 et 2**).
3. Résumez dans un texte de 5 lignes environ les conséquences d'un barrage sur les espèces piscicoles (**DOC. 3**).
4. Expliquez les causes de la modification du marché du lithium depuis quelques décennies (**DOCS 4 et 7**).
5. À l'aide d'une recherche internet et du lien numérique du **DOC.5**, comparez l'exploitation du lithium dans les filons et dans les salars.

ESPRIT CRITIQUE

Les batteries rechargeables au lithium représentent actuellement les batteries les plus utilisées pour le développement des voitures électriques. On parle souvent de **batteries vertes**.

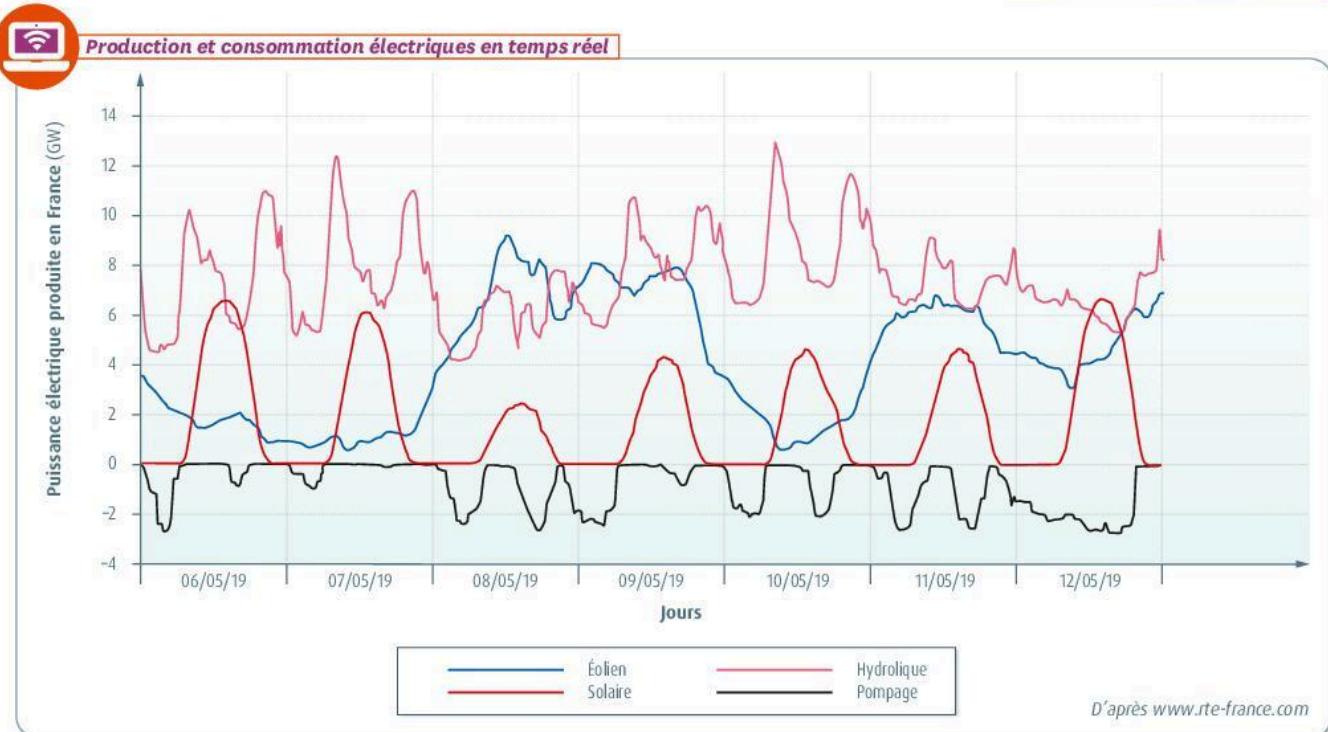
→ Quels sont les problèmes liés à l'exploitation du lithium ? Ces batteries sont-elles si vertes que ça ?

Pistes de travail ► **DOCS 5 à 7**

Stockage de l'énergie électrique

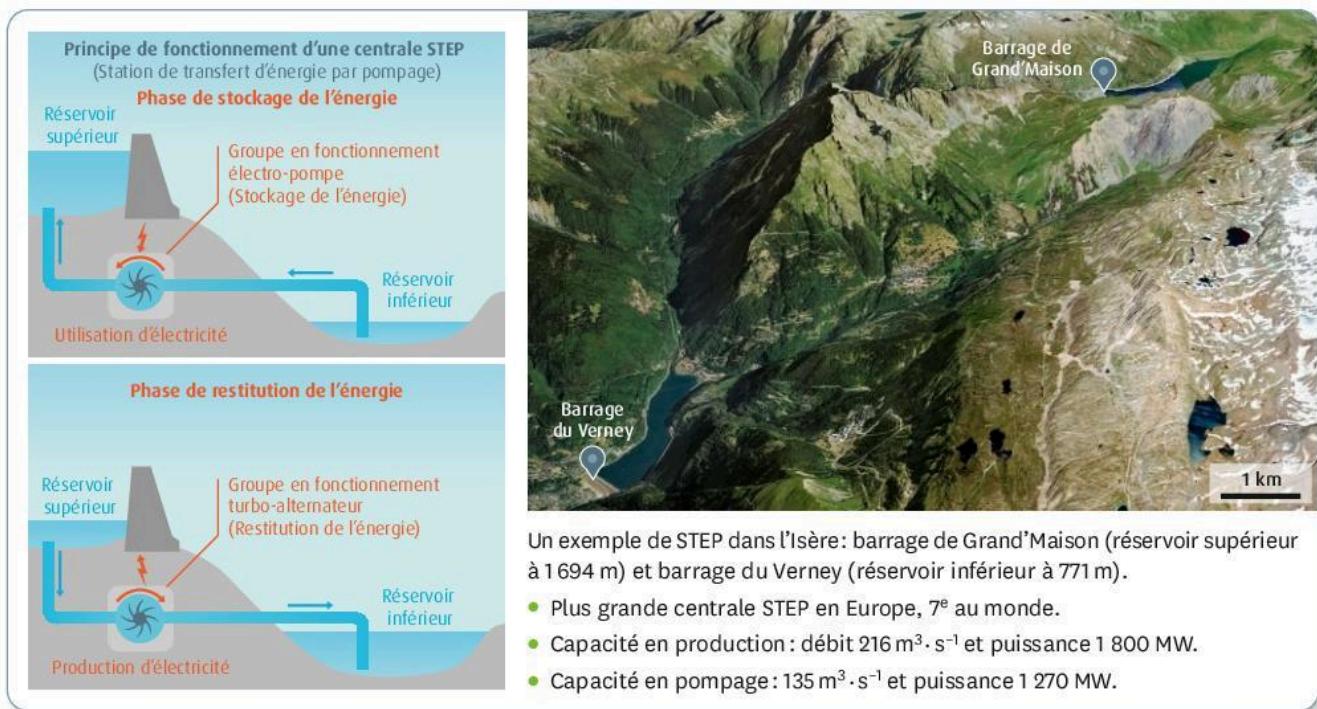
Avec l'essor des énergies renouvelables, le besoin de stocker l'énergie électrique est de plus en plus grand, afin de continuer à répondre à la demande qui ne coïncide pas avec la production.

Comment stocker l'énergie électrique ?



DOC 1 Exemple de production en énergies renouvelables (hors biomasse) du 6 au 12 mai 2019 en France.

En dehors des biocarburants, les énergies renouvelables ne permettent pas d'avoir une production électrique stable sur l'échelle de la journée, de la semaine ou de l'année. La production hydroélectrique peut lisser en partie cette production pour l'adapter à la demande par du « pompage », représenté par les valeurs négatives sur le graphe.



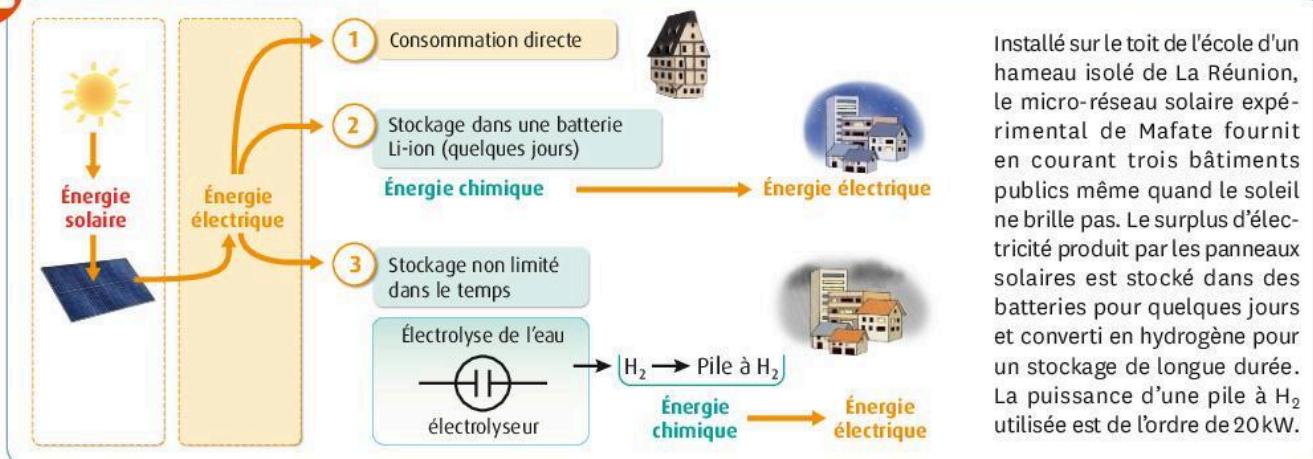
Un exemple de STEP dans l'Isère: barrage de Grand'Maison (réservoir supérieur à 1 694 m) et barrage du Verney (réservoir inférieur à 771 m).

- Plus grande centrale STEP en Europe, 7^e au monde.
- Capacité en production : débit $216 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ et puissance 1 800 MW.
- Capacité en pompage : $135 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ et puissance 1 270 MW.

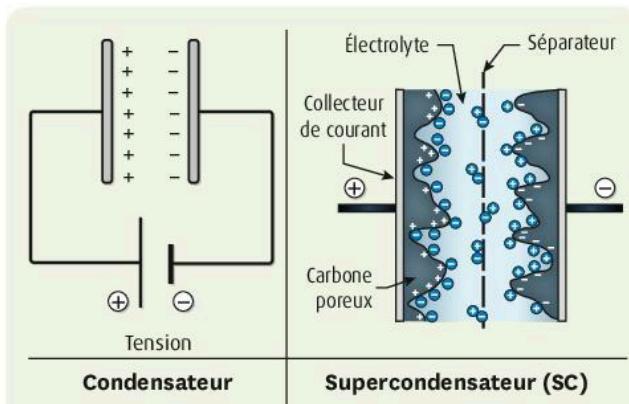
DOC 2 Une Station de Transfert d'Energie par Pompage (STEP).



Le réseau de Mafate en vidéo



DOC 3 À La Réunion, stockage de l'énergie électrique solaire.



Dans un condensateur (deux électrodes séparées par un isolant), l'application d'une tension permet l'accumulation de charges, positives d'un côté, négatives de l'autre. Pour un supercondensateur (SC), le principe est le même, mais on peut accumuler beaucoup plus de charges, grâce à la surface plus grande du carbone poreux et aux ions présents dans l'électrolyte. On utilise par exemple les SC dans les grues de levage des ports: l'énergie accumulée lors de la descente est rapidement restituée par le SC pour la remontée de la grue. Si la puissance est supérieure dans un SC, l'énergie accumulable est moins importante que dans une batterie Li-ion (100 à 150 Wh · kg⁻¹, contre 5 Wh · kg⁻¹ pour le SC). Une batterie peut subir en moyenne 5 000 cycles de charges contre 1×10^6 pour un SC.

DOC 4 Condensateur, supercondensateur et batterie.



Dans certains véhicules (métro de Rennes, trains, Formule 1), l'énergie de freinage est utilisée pour mettre en rotation une lourde masse, qu'on appelle un volant d'inertie. Puis, lorsque de l'énergie est nécessaire, la rotation de ce volant entraîne un alternateur qui produit de l'électricité. Ce dispositif permet une restitution très rapide, un rendement élevé, ne pollue pas et nécessite peu d'entretien. La masse est variable (entre 40 et 250 kg) selon les matériaux utilisés. La capacité est généralement inférieure à 130 kWh et l'autonomie est limitée à environ 15 min. Il ne peut donc servir que pour une régulation rapide d'un système sur courtes durées.

DOC 5 Le volant d'inertie.

EXPLOITER LES DOCUMENTS

- Indiquez combien de pics d'énergie hydraulique sont observés par jour. Formulez une hypothèse pour expliquer ces pics (DOC. 1).
- Expliquez pourquoi un stockage d'énergie est nécessaire (DOC. 1).
- Sous forme de tableau, comparez l'ordre de grandeur des masses et de l'énergie délivrée sur une heure pour chaque dispositif de stockage présenté dans la double page (DOC. 2 à 5).
- Donnez les avantages d'un supercondensateur par rapport à une batterie Li-ion (DOC. 4).

ESPRIT CRITIQUE

Si les barrages et les batteries constituent des dispositifs de stockage de l'électricité, leur échelle de stockage est différente puisque les batteries permettent une mobilité de l'approvisionnement électrique.
→ À votre avis, quel est l'impact écologique des barrages et des batteries ? Citez un exemple pour chaque dispositif.

Pistes de travail ► UNITÉ 4

Femmes et sciences

1. Quelques grandes scientifiques dans l'histoire de l'énergie nucléaire.

Marie Curie (1867-1934)

La femme aux deux Nobels

Née en Pologne, Marie Curie rejoint la France en 1891 pour poursuivre ses études dans des universités ouvertes aux femmes. La découverte du rayonnement naturel de l'uranium par Henri Becquerel en 1896 devient le sujet de thèse de la scientifique, qui introduit le terme de « radioactivité ». Avec son mari Pierre Curie, elle découvre deux nouveaux éléments radioactifs : le polonium et le radium. Leur découverte leur vaut le Prix Nobel de physique en 1903, qu'ils partagent avec Henri Becquerel. Après la mort de son mari, Marie Curie devient en 1908 la première femme professeure des universités de France. Ses recherches sur le radium lui valent le Prix Nobel de Chimie en 1911. Lors de la Première Guerre mondiale, elle développe des appareils de radiographie mobiles pour aider la chirurgie des blessés sur le front. Elle déclare avoir fait de la science sa profession « parce que j'en avais envie, parce que j'aimais la recherche ». Elle meurt en 1934 des suites d'une leucémie pour laquelle son exposition régulière à des substances radioactives a très probablement contribué.

Maria Goeppert-Mayer (1906-1972)

Mère du modèle du noyau atomique

Née dans l'Empire allemand en 1906, Maria Goeppert-Mayer poursuit ses études de physique théorique jusqu'à l'obtention de son doctorat. En 1930, elle suit son mari, physicien lui aussi, ayant obtenu un poste à Baltimore aux États-Unis. Bien que travaillant aux côtés de son mari, publiant des articles de recherche et enseignant à l'université, elle n'obtient pas de poste car l'université refuse d'embaucher les femmes de chercheurs déjà établis. Lors de la Seconde Guerre mondiale, en 1942, elle rejoint le projet Manhattan, qui vise au développement de la bombe atomique. En 1946, son mari étant nommé professeur à l'université de Chicago, elle obtient finalement un poste de chercheuse à mi-temps dans cette université. C'est là qu'elle développe une théorie fondamentale en physique nucléaire : le modèle en « couches » du noyau atomique. En 1963, elle partage avec deux autres physiciens allemands le prix Nobel pour ce modèle atomique. Elle devient ainsi, après Marie Curie, la deuxième femme de l'Histoire à obtenir cette récompense scientifique.

Les faits : En 2018, l'assemblée nationale publie un rapport montrant que les femmes restent sous-représentées dans les domaines scientifiques.

VOTRE MISSION À l'oral, après avoir présenté les documents, proposez des actions pouvant être mises en œuvre pour favoriser l'égalité entre femmes et hommes dans les carrières scientifiques.

Lise Meitner (1878-1968)

L'oubliée du Nobel

Après un doctorat de physique à l'université de Vienne, Lise Meitner part à Berlin en 1907 pour suivre les cours du physicien Max Planck, avec l'accord exceptionnel de celui-ci (les universités allemandes n'étant pas ouvertes aux femmes). Elle accepte là-bas une collaboration avec le chimiste Otto Hahn qui travaille sur la radioactivité. Elle s'engage comme technicienne de radiologie sur le front allemand lors de la Première Guerre mondiale, mais, étant juive, est contrainte de quitter l'Allemagne pour rejoindre la Suède lors de la Seconde Guerre mondiale. Correspondant régulièrement avec Otto Hahn, elle participe à la découverte de l'effet du bombardement de l'uranium par des neutrons, c'est-à-dire la fission nucléaire. La situation politique ne lui permet cependant pas d'être coauteur de la publication. Pressentie trois fois pour le Prix Nobel, Lise Meitner ne l'obtiendra jamais, même quand Otto Hahn le reçoit en 1944 pour des travaux auxquels elle a largement contribué. Si ses travaux pionniers sont récompensés par de nombreuses autres distinctions, Lise Meitner est souvent citée comme une figure scientifique injustement oubliée du Nobel.

Chien-Shiung Wu (1912-1997)

« La Première Dame de la physique »

Née en Chine, Chien-Shiung Wu étudie les mathématiques et la physique avant d'émigrer aux États-Unis en 1936. Elle obtient son doctorat de physique quatre ans plus tard. Ses recherches constituent des avancées importantes en physique nucléaire. Elle participe ainsi en 1942 au projet Manhattan, projet qui conduit à la construction de la première bombe atomique. Elle y développe notamment un processus pour séparer l'uranium 235 et 238, ce qui permet l'enrichissement de l'uranium utilisé pour l'énergie nucléaire. Elle est également connue pour avoir démontré expérimentalement une théorie importante de physique nucléaire proposée par deux chercheurs, Lee et Yang. Ces deux derniers recevront le Prix Nobel en 1957 pour leur théorie, mais Mme Wu n'y sera pas associée. Elle est la première femme président de l'American Physical Society, élue en 1975, et la première lauréate du prix Wolf en physique en 1978. Durant sa carrière, elle déclarera : « Il est honteux qu'il y ait si peu de femmes dans les sciences ».

«Une mère de famille de San Diego gagne le prix Nobel de physique.» *The San Diego Tribune, 5 Novembre 1963.*

2. Un écart qui se creuse dans le supérieur.



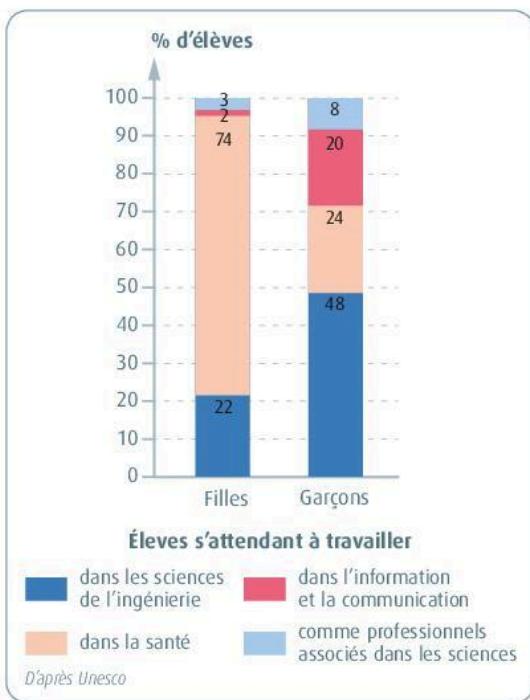
Les effectifs en CPGE

es sciences. En parallèle, dans les écoles d'ingénieurs les effectifs féminins stagnent autour de 15 %. Il y a donc une question de choix des filles qui explique la sous-représentation féminine dans les métiers scientifiques.



3. Attente des élèves concernant les carrières en science.

La plupart des filles âgées de 15 ans ayant l'intention d'entrer dans des carrières scientifiques s'attendent à travailler comme des professionnelles de la santé.



4. Comment expliquer ces écarts ?

Les études sur le cerveau montrent que filles et les garçons ont potentiellement les mêmes capacités de raisonnement, de mémoire et d'attention. La sous-représentation des femmes dans les carrières scientifiques ne peut donc pas s'expliquer par un argument neurobiologique. Selon Elyes Jouini, professeur à Paris-Dauphine, une explication repose sur les stéréotypes de genre, c'est-à-dire sur les affirmations entendues et intégrées par les enfants dès leur plus jeune âge comme quoi « les femmes n'aiment pas ou sont naturellement moins douées pour les mathématiques que les hommes ». Cette opinion exprimée par des adultes est intégrée par l'enfant et devient une vérité à laquelle il cherche à se conformer, ce qui aboutit à une forme d'autocensure. Différentes études illustrent ce mécanisme. Ainsi, un travail a été proposé à des élèves de 10 à 12 ans, présenté soit comme un exercice de géométrie, soit comme un jeu de mémorisation. Les filles ont mieux réussi le test quand il leur a été présenté comme un jeu de mémorisation mais ont obtenu un résultat inférieur à la moyenne quand il leur a été annoncé comme un exercice de géométrie. Ce conditionnement précoce mène garçons et filles à juger normale la compartmentation des métiers selon le sexe (inégalité dans le choix) et la différence de niveau dans les matières scientifiques (inégalité dans la performance), quitte à associer les deux et à les corrélérer.

AIDE POUR RÉUSSIR LA MISSION

- À quelles difficultés se sont heurtées ces grandes femmes scientifiques du xix^e et xx^e siècle? (doc. 1)
- À quel moment des études se creusent les écarts entre la proportion d'hommes et de femmes en sciences? (docs 2 et 3)
- Comment les chercheurs expliquent-ils cette situation? (doc. 4)
- Quelles solutions peuvent être envisagées pour changer la représentation que les petites filles peuvent se faire des métiers scientifiques?

1. Convertir l'énergie mécanique en électricité

► À l'exception des centrales photovoltaïques (voir chapitre 5), le principe des **centrales électriques** sans combustion repose sur la conversion d'énergie mécanique en énergie électrique. La mise en mouvement d'une turbine par un fluide entraîne un alternateur qui produit de l'électricité. Dans les barrages hydroélectriques, les éoliennes et les hydroliennes, les pales de la turbine sont entraînées directement par l'eau ou le vent. Dans les centrales nucléaires, géothermiques ou solaires thermiques, la turbine est entraînée par le refroidissement de la vapeur d'eau chaude. Le rendement global dépend du rendement de production de l'énergie mécanique de rotation (qui dépend de la source d'**énergie primaire**) et du rendement de l'alternateur utilisé. > **Unités 1 et 2**

2. La conversion electrochimique

► Une pile électrochimique est constituée de deux électrodes de nature différente plongeant dans une solution conductrice. Une transformation chimique spontanée entraîne un mouvement d'électrons dans les électrodes reliées par un fil conducteur, à l'origine de la tension aux bornes de la pile. La consommation des réactifs entraîne l'usure de la pile. Une **batterie ou accumulateur** est une pile dont le fonctionnement est réversible. Les piles à H₂ sont à l'étude pour les voitures électriques car elles ont l'avantage de ne rejeter que de l'eau. > **Unité 3**

3. Les conséquences environnementales

► La fabrication des centrales sans combustion présente des bilans carbone non nuls. Un barrage nécessite plusieurs tonnes de ciment, dont la fabrication est productrice de CO₂. La dégradation de la matière organique inondée rejette des GES et les habitats des espèces piscicoles sont drastiquement perturbés. Par ailleurs, la demande en **lithium** a fortement augmenté avec l'essor des batteries pour téléphones portables et ordinateurs. Son extraction requiert des quantités d'eau très importantes et engendre une pollution chimique, conduisant à la destruction de la biodiversité locale. > **Unité 4**

4. Stockage de l'énergie

► La majorité des **énergies renouvelables** ne permet pas une production électrique continue. Afin de répondre à des besoins variables en fonction de la journée ou de la saison, il est nécessaire de stocker l'énergie électrique. Pour être stockée, l'énergie électrique doit être convertie, ce qui s'accompagne nécessairement de pertes. Les centrales hydroélectriques jouent un rôle clef dans le stockage : l'énergie électrique excédentaire permet de remonter l'eau par pompage. L'énergie potentielle ainsi stockée peut à nouveau être convertie en électricité lorsque la demande est plus forte.

► D'autres formes de stockage voient aussi le jour. Ainsi, des piles à H₂ connectées à des panneaux solaires stockent le surplus d'énergie et fournissent de l'énergie électrique pendant les jours de faible ensoleillement. Par stockage d'énergie électrostatique, les **super-condensateurs** permettent beaucoup plus de cycles de charge qu'une batterie classique et la collecte/restitution des charges est plus rapide. Enfin le volant d'inertie permet de stocker l'énergie électrique en énergie cinétique et de la restituer selon les besoins. > **Unité 5**

Les mots-clés du chapitre

- **Centrale électrique**: Site industriel destiné à la production d'électricité.
- **Énergie primaire**: Énergie disponible dans l'environnement et directement exploitable sans transformation.
- **Batterie (ou accumulateur)**: Appareil qui stocke l'énergie électrique en énergie chimique lors de la charge et la restitue lors de la décharge.
- **Lithium**: Métal alcalin situé dans la première colonne du tableau périodique. Composant essentiel des batteries de type Lithium-ion utilisées dans les appareils mobiles (téléphones portables, ordinateurs...).
- **Énergie renouvelable**: Énergie qui, à l'échelle humaine, se renouvelle et est disponible en grande quantité. Cela correspond à l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, la biomasse et la géothermie.
- **Super-condensateur**: Condensateur (deux électrodes séparées par un isolant) particulier dont les électrodes en carbone poreux permettent un stockage plus important de charges électriques.

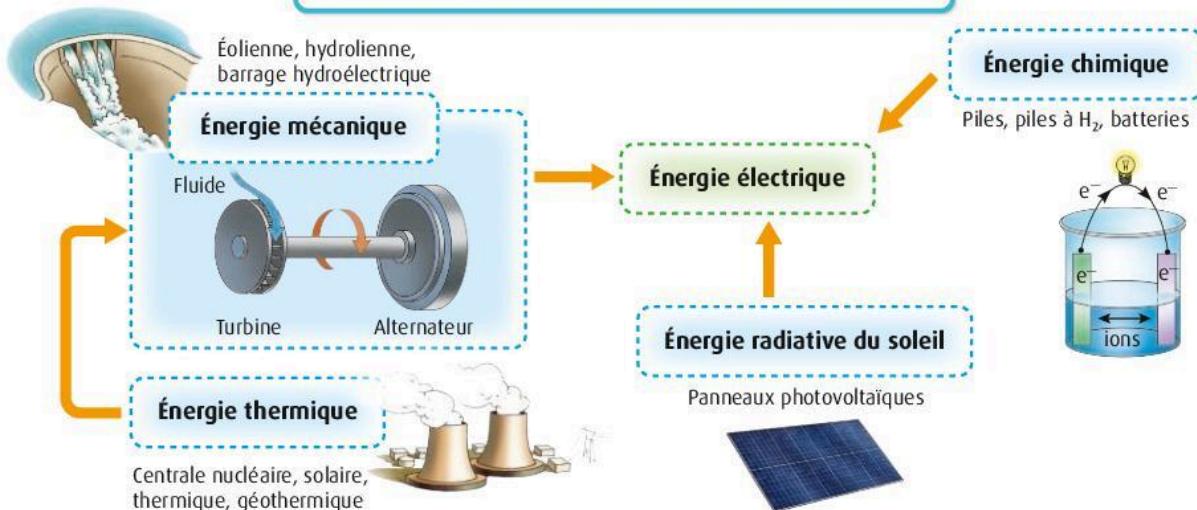
À noter

- Produire de l'énergie sans combustion n'est pas synonyme de bilan carbone nul !
- Une « tranche » de centrale nucléaire correspond à un réacteur de cette centrale.

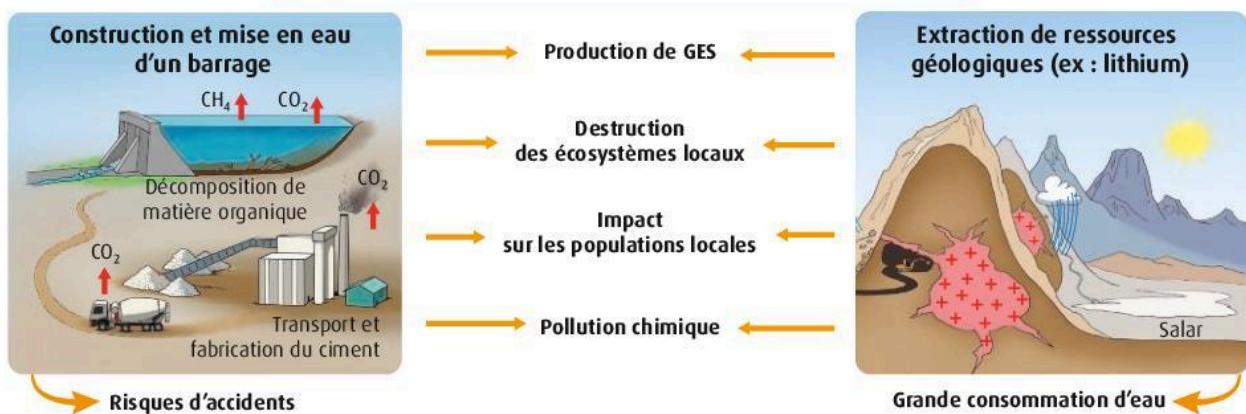
l'essentiel par l'image

Schéma interactif 

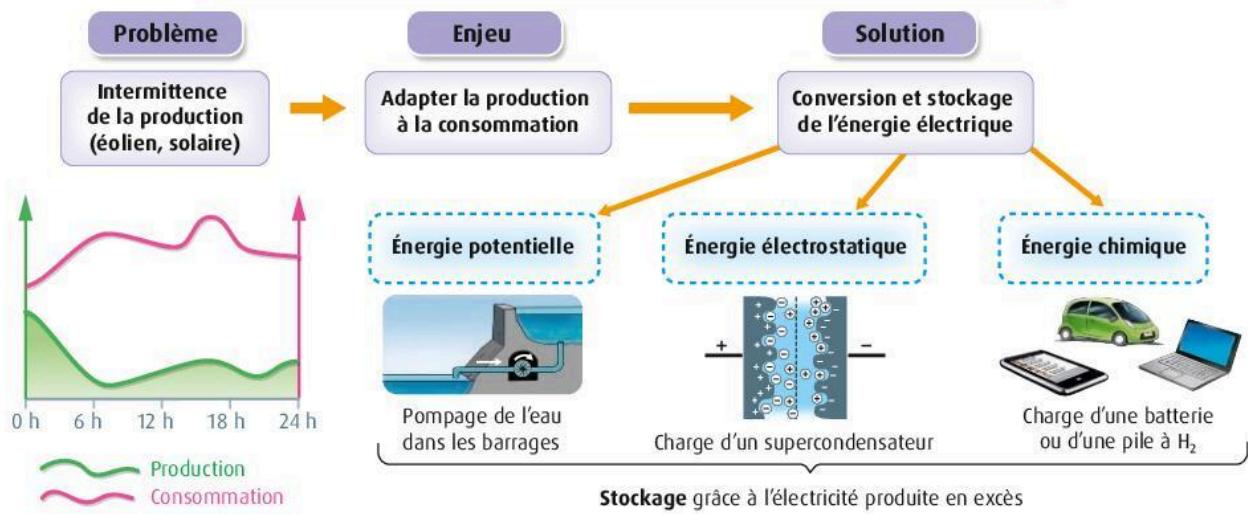
Produire de l'électricité sans combustion...



... avec des conséquences sur l'environnement



Intermittence de la production et stockage de l'électricité



Mémoriser son cours

Exercices corrigés



Pour mémoriser l'essentiel du cours, posez-vous régulièrement ces questions et vérifiez vos réponses.

1. Quel élément commun aux centrales à charbon, aux centrales nucléaires, aux barrages hydroélectriques ou aux éoliennes produit l'électricité?
2. Quel est l'ordre de grandeur du rendement d'un barrage hydroélectrique?
Même question pour une éolienne.
3. Quelle est la condition nécessaire pour obtenir de l'énergie à partir d'une machine thermique?
4. Dans une centrale nucléaire à eau pressurisée, quelle est la fonction principale des circuits primaire, secondaire, tertiaire?
5. Quelles sont les deux modes d'exploitation de l'énergie solaire pour produire de l'électricité?
6. Pourquoi le lithium est-il un métal stratégique aujourd'hui?
7. Citez deux impacts sur l'environnement des barrages hydroélectriques.
8. Quel est le principe d'une pile électrochimique et d'une pile à hydrogène?
9. Citez trois dispositifs de stockage de l'énergie électrique.

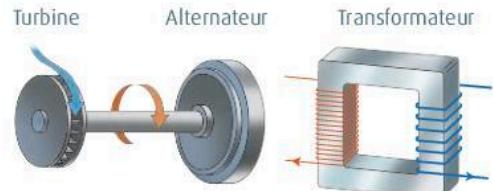
Exercices interactifs corrigés



Pour s'échauffer

1 QCM

Pour chaque proposition, identifiez la (ou les) bonne(s) réponse(s).

1. Un réacteur de centrale nucléaire possède une puissance de l'ordre de:
a. 1 kW. b. 1 MW. c. 1 GW. d. 1 TW.
2. Une éolienne industrielle peut produire une puissance de l'ordre de:
a. 1 kW. b. 1 MW. c. 1 GW. d. 1 TW.
3. Les piles à combustibles développées pour les transports sont les piles à:
a. N₂. b. H₂. c. CH₄. d. O₂.
4. L'énergie d'une centrale nucléaire est obtenue grâce à:
a. la fusion nucléaire.
b. l'oxydation de l'uranium.
c. une machine thermique.
d. la désintégration de l'uranium 235.
5. Une centrale nucléaire a besoin d'un circuit de refroidissement:
a. pour éviter la fusion du cœur.
b. pour ralentir la turbine.
c. pour refroidir l'alternateur.
d. pour que la machine thermique puisse fonctionner.
6. Dans une centrale électrique thermique, nucléaire ou dans une éolienne, l'électricité est produite grâce à:
a. l'induction électromagnétique.
b. l'effet Joule.
c. l'effet photovoltaïque.
d. la conversion d'énergie chimique.
7. Laquelle de ces centrales électriques n'implique pas d'énergie mécanique pour produire de l'électricité?
a. éolienne.
b. photovoltaïque.
c. nucléaire.
d. au charbon.
8. Le rendement du barrage hydroélectrique ci-dessous est:

Turbine Alternateur Transformateur
Rendement 65 % 97 % 99 %
a. environ 62 %.
b. 65 %.
c. 99 %.
d. environ 35 %.
9. Les modes de production d'énergie électrique sans combustion:
a. n'ont aucun impact sur l'environnement.
b. sont à l'origine d'émissions de CO₂.
c. affectent le paysage mais pas la biodiversité.
d. affectent la biodiversité et le paysage.

► CORRECTION p. 319

2 Vrai/Faux

1. Quelque soit la ressource d'énergie, le rendement de la production d'énergie est supérieur à 90 % grâce à la performance des alternateurs que l'on utilise.
2. Le rendement global d'une chaîne de transformation d'énergie est égal au produit des rendements de chaque transformation.
3. Les cheminées des centrales nucléaires ne rejettent pas de CO₂.
4. Il n'existe pas de stockage de l'énergie sous forme électrostatique.
5. L'usure d'une pile non rechargeable provient de la consommation des réactifs.

3 Associations

Associez chaque source à un ou plusieurs effets.

- | | |
|---------------------------------|--|
| Centrale nucléaire • | • Risques chimiques |
| Éolienne • | • Déchets radioactifs |
| Centrale thermique au charbon • | • Production CO ₂ à la construction |
| Photovoltaïque • | • Production CO ₂ à l'exploitation |
| Pile électrochimique • | • Ressource locale |
| Combustion de biomasse • | • Ressource intermittente |

4 Unités et ordre de grandeurs

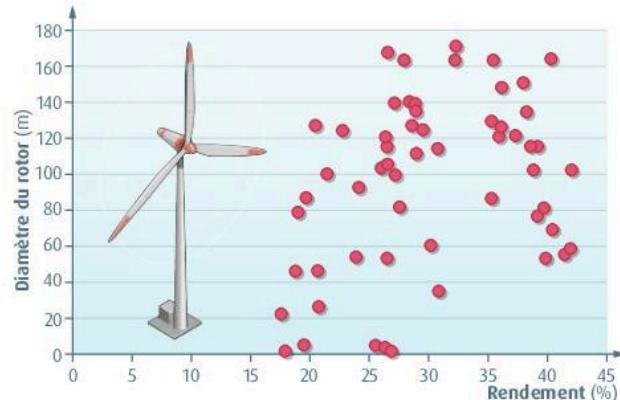


Une centrale nucléaire exploite l'uranium 235 qui libère environ 193 MeV d'énergie exploitable par noyau ($1\text{eV} = 1,60 \times 10^{-19}$ joule). L'uranium naturel possède moins de 1 % d'uranium 235, le reste étant de l'uranium 238. L'uranium exploité pour l'industrie civile est dit enrichi et possède environ 4 % en masse d'uranium 235.

1. Dans 1 kg d'uranium enrichi, calculez le nombre d'atomes d'uranium 235. On rappelle qu'il y a $6,02 \cdot 10^{23}$ atomes dans une mole.
2. Quelle énergie peut-on exploiter de ce kilogramme de combustible nucléaire? Convertissez le résultat en J et en Wh.
3. Sachant que la combustion du charbon produit $36\text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, (rappel: $1\text{Wh} = 3600\text{ J}$) calculez la masse de charbon qu'il faudrait utiliser pour obtenir la même quantité d'énergie.
4. Sachant que la combustion d'1 t de charbon produit 2,6 t de CO₂, calculez la masse de CO₂ qui aurait été produite.

5 Lecture de graphique

On a représenté ci-dessous le rendement de 58 éoliennes en fonction du diamètre de leurs pales.



D'après le document, indiquez:

1. le diamètre minimal des pales pour avoir un rendement supérieur à 30 %;
2. le diamètre minimal des pales pour avoir un rendement supérieur à 35 %;
3. le rendement maximal que l'on peut obtenir avec des pales dont le diamètre est compris entre 20 et 40 mètres environ;
4. la différence de rendement entre l'éolienne la plus performante et celle la moins performante pour des pales dont le diamètre est compris entre 80 et 100 mètres environ.

6 Calculs et ordres de grandeur



La Nissan Leaf est la première voiture électrique à recharge réversible : le véhicule peut stocker mais aussi restituer de l'énergie électrique au réseau. La première version de la batterie est affichée à 40 kWh.

1. Sachant que l'essence possède un pouvoir calorifique d'environ $40\text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, à quelle quantité d'essence cela correspond-il? (Rappel: $1\text{Wh} = 3600\text{ J}$)
2. En fonction de vos connaissances sur les autonomies des automobiles, ce résultat correspond-il à ce que vous imaginiez?
3. Avec un abonnement ordinaire à 6 kW (le fournisseur ne fournit pas plus que 6 kW à chaque instant à l'abonné), en combien d'heures la batterie est-elle rechargée si celle-ci était complètement déchargée?
4. Les «superchargeurs» de véhicules peuvent recharger une batterie complète en 1h30. Quelle puissance moyenne doivent-ils fournir?

7 Calculer des ordres de grandeur, exercer son esprit critique

Émission de CO₂ des centrales sans combustion

On s'intéresse à la production de CO₂ lors de l'installation de centrales électriques sans combustion. Pour simplifier, on ne considère que le béton de construction. En effet, la production d'une tonne de béton émet environ 600 kg de CO₂, ce qui n'est pas neutre dans un bilan carbone.

QUESTIONS

- Calculez la production d'énergie maximale en kWh d'une éolienne de 2,5 MW sur un an. Sachant que l'intermittence des vents entraîne une production moyenne 5 fois inférieure, calculez la production d'énergie moyenne pour cette éolienne sur un an.
- Calculez en kWh la production électrique de l'EPR de Flamanville sur un an.
- Quelle est la masse de béton utilisée dans le barrage de Vouglans ?
- Sur 20 ans de fonctionnement, quelle est la contribution CO₂ en gCO₂·kWh⁻¹ de ces équipements en prenant en compte seulement le béton utilisé lors de l'installation ?
- Ces données sont-elles suffisantes pour conclure que les éoliennes ou les centrales nucléaires émettent significativement moins de CO₂ sur leur durée de vie ?

RÉSOLUTION

1. Production d'énergie maximale sur un an :

$$E_{\text{max}} = 2,5 \times 10^3 \times 24 \times 365 = 22 \times 10^6 \text{ kWh.}$$

Pour obtenir l'énergie en MWh, il suffit de multiplier la puissance en MW par la durée (=1 an) en heures.

Production d'énergie moyenne sur un an :

$$E_{\text{éolienne}} = \frac{2,5 \times 10^3 \times 24 \times 365}{5} = 4,4 \times 10^6 \text{ kWh.}$$

2. La production électrique correspond à 75 % de la production théorique :

$$E_{\text{EPR}} = 1,65 \times 10^6 \times 24 \times 365 \times 0,75 = 1,1 \times 10^{10} \text{ kWh.}$$

1 GW = 10⁶ kW

3. Masse de béton :

$m = \mu \times V$ avec μ la masse volumique du béton.

$$\text{AN : } m = 2,2 \times 10^3 \times 560 \times 10^3 = 1,2 \times 10^9 \text{ kg} = 1,2 \times 10^6 \text{ t.}$$

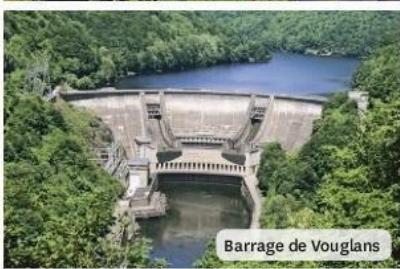
4. On calcule la quantité de CO₂ émise par la fabrication du béton de chaque installation, qu'on divise par la quantité d'énergie électrique produite sur 20 ans.

5. Non, il faut tenir compte de la durée de vie de l'ouvrage (plus long pour un barrage, plus court pour une éolienne), de l'entretien, de la déconstruction... Par exemple, l'agence nationale de gestion des déchets radioactifs estime à 15 Mt la masse de béton requise pour la construction d'un centre de stockage géologique de confinement des déchets nucléaires français...

Le calcul global reste complexe, il ne faut pas se fier aux analyses rapides.

- Une éolienne de 2,5 MW nécessite un socle d'environ 1500 t de béton.
- Le nouvel EPR de Flamanville nécessitera environ 1 Mt de béton par cœur de 1,65 GW. Le rendement électrique de l'EPR est proche de 75 %.
- Le barrage de Vouglans a nécessité 560 000 m³ de béton pour 300 GWh de production annuelle.
- La masse volumique du béton peut être approximée à 2 200 kg · m⁻³.

DOC 1 Quelques données chiffrées.



Attention aux unités !

Éolienne :

$$\frac{1500 \times 600 \times 10^3}{20 \times E_{\text{moy}}} = 10 \text{ gCO}_2 \cdot \text{kWh}^{-1}.$$

EPR :

$$\frac{10^6 \times 600 \times 10^3}{20 \times E_{\text{moy}}} = 2,8 \text{ gCO}_2 \cdot \text{kWh}^{-1}.$$

Barrage :

$$\frac{2,2 \times 560 \times 10^3 \times 600 \times 10^3}{20 \times 300 \times 10^6} = 123 \text{ gCO}_2 \cdot \text{kWh}^{-1}.$$

Exercices d'application

Méthode

8 Calculer des ordres de grandeur, exercer son esprit critique

Bilans carbone de la production électrique

On s'intéresse au bilan CO₂ de la production d'électricité sur la base des bilans 2019 de RTE (le réseau de transport d'électricité) et du producteur principal en France EDF (Électricité de France). Nous souhaitons comprendre et interpréter au mieux ces bilans.

Centrale énergétique	Émissions nettes de CO ₂ ($\times 10^6$ t)	2019	2020
Production totale nette	19,2	20,4	
Nucléaire	-	-	
Thermique à combustible fossile	17,5	18,7	
→ dont charbon	1,5	5,6	
→ dont fioul	1,2	1,1	
→ dont gaz	14,8	12	
Hydraulique	-	-	
Éolien	-	-	
Solaire	-	-	
Déchets ménagers (UIOM)	1,7	1,7	

D'après www.rte-france.com/

DOC 1 Bilan net des émissions de CO₂

de l'année 2019. Le bilan net des émissions de CO₂ de la production d'électricité en 2019 se trouve sur le site du réseau de transport d'électricité (RTE).

EDF, principal contributeur à l'énergie délivrée en France estime :

- 14 à 80 gCO₂ · kWh⁻¹ pour le photovoltaïque
- 8 à 20 gCO₂ · kWh⁻¹ pour l'éolien
- 4 gCO₂ · kWh⁻¹ pour le nucléaire

DOC 3 Bilan global de CO₂ par filière énergétique.

AIDE

- Qu'est-ce qui n'est pas pris en compte dans le bilan net qui est pris en compte dans le bilan global ? (Ne pas penser uniquement au fonctionnement de la centrale).
- Faire attention aux unités.
1 TWh = 10¹² Wh.



Centrale énergétique	Énergie produite (TWh)	2019
Production nette	537,7	
Nucléaire	379,5	
Thermique à combustible fossile	42,6	
→ dont charbon	1,6	
→ dont fioul	2,3	
→ dont gaz	38,6	
Hydraulique	60,0	
Éolien	34,1	
Solaire	11,6	
Bioénergies (biomasses, déchets ménagers...)	9,9	

D'après www.edf.fr

DOC 2 Bilan énergétique de la production d'électricité.

QUESTIONS

- Dans le bilan net en CO₂, certaines productions ne semblent rien émettre. Pour quelle raison ? Comment expliquez-vous la différence entre bilan de CO₂ net et global (DOCS 1 ET 3) ?
- Pour le photovoltaïque, l'éolien et le nucléaire, quelle est la production équivalente globale de CO₂ ? À quelle(s) valeur(s) se comparent-elles (DOCS 1 ET 3) ?
- Pouvez-vous donner une estimation de la production de CO₂ en gCO₂ · kWh⁻¹ pour le thermique à combustible fossile ? Sachant que l'ADEME* estime à 418 gCO₂ · kWh⁻¹ l'émission globale d'une centrale à gaz, cette estimation est-elle cohérente ?

*Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

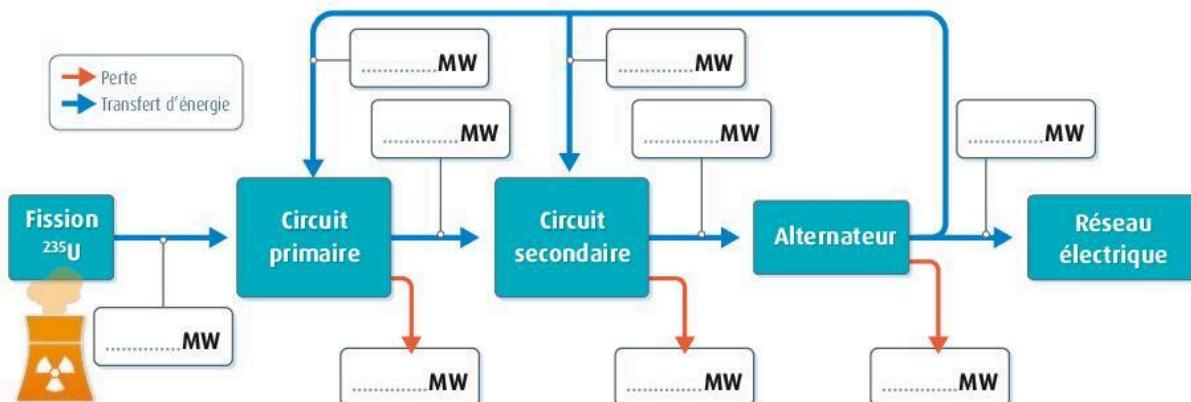
Tester ses compétences

9 Calculer, raisonner

Le rendement d'une centrale nucléaire à eau pressurisée

On considère une tranche (c'est-à-dire un réacteur) d'une centrale nucléaire à eau pressurisée (voir p. 134). Pour la dernière génération de ces centrales, le réacteur extrait du cœur une puissance thermique de 4 250 MW transférée au circuit secondaire par le générateur de vapeur. Au sein

du circuit secondaire, la vapeur fait tourner les turbines mettant en rotation l'alternateur. Ce dernier produit 1 450 MW pour le réseau. On s'intéresse aux puissances en jeu au sein de cette tranche et l'on souhaite compléter le schéma suivant.



QUESTIONS

- Sachant que le rendement de l'alternateur est de 98 % et que 40 MW produits sont utilisés pour le fonctionnement de la centrale, calculez la puissance mécanique reçue.
- Sur les 40 MW utilisés pour le fonctionnement de la centrale, une moitié l'est pour le circuit primaire, l'autre pour le circuit secondaire. Calculez la puissance totale reçue par l'installation du circuit primaire.
- Sachant que les pertes sont de l'ordre de 50 % entre le circuit primaire et le circuit secondaire, calculez la puissance thermique fournie au circuit secondaire puis la puissance totale reçue par le circuit secondaire.
- Calculez les puissances perdues par le circuit primaire, le circuit secondaire et l'alternateur.
- Calculez le rendement global de cette centrale.
- Complétez le schéma.

10 Argumenter

Les risques de l'hydroélectricité

Le 12 mai 2008, un séisme très meurtrier a frappé le Sichuan en Chine. Il a été déclenché par le jeu d'un système de failles complexes qui se rencontrent sous le réservoir du barrage hydroélectrique de Zipingpu, situé à quelques kilomètres de l'épicentre du séisme. Outre la charge additionnelle liée à l'eau, les infiltrations en profondeur semblent avoir facilité la friction des roches au niveau des failles et accéléré ainsi le déclenchement du séisme.

QUESTION

À l'aide vos connaissances, du document et d'une recherche internet, discutez des impacts des barrages hydroélectriques sur les populations et l'environnement.



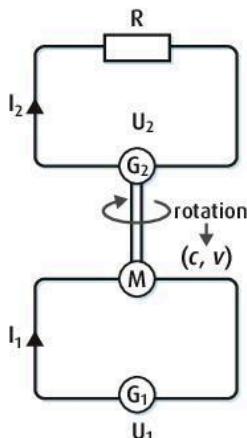
DOC1 Le barrage de Zipingpu.

11 Calculer, raisonner

Une chaîne de transformation

Un moteur est branché sur un générateur 1. Il entraîne un générateur 2 relié à une résistance.

Dans le tableau ci-dessous, on a relevé la tension et le courant que le générateur 1 fournit au moteur (U_1, I_1), la vitesse de rotation de l'arbre et le couple généré (v, c), ainsi que la tension et le courant que fournit le générateur 2 à la résistance (U_2, I_2).



DOC 1 Schéma du circuit (gauche) et photo du moteur et générateur 2 (droite).



DOC 2 Chaîne de conversion énergétique correspondant au dispositif du **DOC. 1** en fonctionnement.

U_1 (V)	0	1,9	2,6	3,5	4,4	5,6	6,6	7,4	8,5	9,4	10,4	11,9
I_1 (A)	0	1,07	1,16	1,29	1,46	1,62	1,78	1,93	2,06	2,20	2,26	2,47
U_2 (V)	0	0,6	1,02	1,55	2,42	3,40	4,38	5,13	6,08	6,90	7,97	9,49
I_2 (A)	0	0,060	0,100	0,155	0,239	0,345	0,438	0,516	0,611	0,691	0,803	0,960
v (tours·sec ⁻¹)	0	19	30	35	35	36	43	50	59	66	74	88
c (10 ⁻³ N·m)	0	5,0	5,0	7,0	8,0	10	12	14	16	17,5	18,5	22

DOC 3 Données relevées.

QUESTIONS

- Pour chaque valeur de U_1 :
 - Calculez la puissance électrique fournie par le générateur 1.
 - Calculez la puissance mécanique fournie par le moteur.
 - Calculez la puissance électrique fournie par le générateur 2.
 - Calculez le rendement de la conversion énergie électrique → énergie mécanique effectuée par le moteur.
- Calculez le rendement de la conversion énergie mécanique → énergie électrique effectuée par le générateur 2.
- Calculez le rendement global de l'ensemble moteur-générateur 2. Le tracer en fonction de la vitesse de rotation de l'arbre.
- Pour aller plus loin. Si la résistance est un fil de cuivre dont on connaît les valeurs de R , m , ρ (résistivité) et μ (masse volumique), réalisez un calcul littéral pour trouver L et S , les longueur et section de ce fil.

12 Exploiter un document, calculer, raisonner**L'intermittence des sources renouvelables d'électricité**

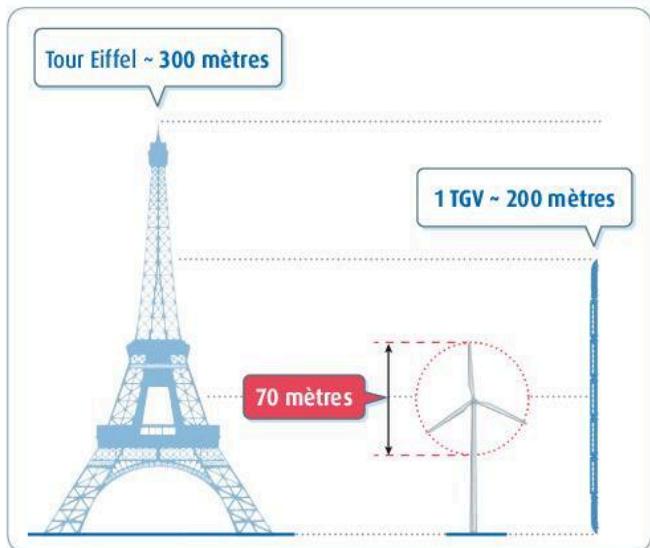
Chaque année, RTE (Réseau et transport d'électricité) fait le bilan de la production électrique en France. On s'intéresse ici à l'électricité produite par des sources renouvelables en 2018.



DOC 1 Extrait du bilan énergétique français pour l'année 2018.

QUESTIONS

- En moyenne, pour 1 MW de puissance installée en éolien, calculez combien d'énergie électrique éolienne a été produite en 2018. Effectuez le même calcul pour 1 MW en solaire et 1 MW en hydraulique.
- Comparez les résultats obtenus et proposez une explication qualitative.



DOC 2 Quelques repères de taille.

La quantité d'énergie solaire reçue au sol en France est en moyenne de $1300 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$. On considère des panneaux solaires ayant un rendement de 11 % et qui sont disposés parallèlement à la surface du sol.

QUESTIONS

- Calculez quelle surface de panneaux solaires il faudrait installer pour produire autant que le parc nucléaire français en 2018.
- Commentez les résultats des questions 6 et 7.

On considère des éoliennes de 2 MW, avec un rotor de 70 mètres de diamètre. Ces éoliennes doivent être éloignées les unes des autres d'au moins 6 fois le diamètre du rotor.

QUESTIONS

- Calculez la densité maximale d'éoliennes que l'on peut installer, en éolienne par km^2 .
- En déduire la densité maximale d'énergie par unité de surface et par an que l'on peut obtenir en $\text{GWh/m}^2/\text{an}$.
- En prenant en compte la production effective pour 1 MW d'éolien installé (résultat de la question 1), calculez la densité effective par unité de surface et par an pour un parc éolien, en $\text{GWh/km}^2/\text{an}$.
- Calculez la surface d'un parc éolien qui permettrait de produire autant que le parc nucléaire français complet en 2018, soit 393 TWh. À quel pourcentage du territoire métropolitain cela correspond-il ? (Superficie de la France métropolitaine : $643\,801 \text{ km}^2$.)

AIDE

- En une heure, une installation d'une puissance de 1 MW produit 1 MWh d'énergie.
- $1 \text{ MWh} = 10^3 \text{ kWh}$.
- $1 \text{ km}^2 = 10^6 \text{ m}^2$.

13 Exploiter un document, calculer, raisonner

L'électricité hydraulique

Les barrages hydroélectriques exploitent l'énergie potentielle de l'eau au niveau d'une chute. La puissance P (en W) mise en jeu par une chute d'eau (de masse volumique $\rho = 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$) de hauteur h (en m) et de débit q (en $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) est égale à :

$$P = \rho \cdot g \cdot h \cdot q$$

avec $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Il existe deux principaux types de barrages hydroélectriques. Les barrages de type voûte ou barrage en terre impliquent la construction d'une retenue d'eau artificielle. Les barrages au fil de l'eau sont installés au niveau d'un fleuve dont ils exploitent le débit. On se propose de comparer ces deux types de barrages.



DOC 1 Le barrage de Lavey (Suisse). Ce barrage au fil de l'eau installé sur le Rhône produit 400 GWh/an, ce qui correspond au tiers des besoins en électricité de la ville de Lausanne. Le Rhône transporte de grandes quantités d'alluvions. Ainsi, lors de la fonte des neiges, jusqu'à 120 tonnes de sable peuvent traverser les turbines en une heure, à l'origine d'une forte usure. Les pales doivent être changées tous les 10 ans.



DOC 2 Le barrage de Serre-Ponçon (Hautes-Alpes). Plus grand barrage en terre d'Europe, il est associé à un lac artificiel d'un volume de 1270 millions de m^3 . Il produit 720 GWh/an et répond aux besoins en électricité d'environ 300 000 habitants.

QUESTIONS

- Comparez les caractéristiques de ces deux types de barrages. En utilisant vos connaissances et les documents, citez des avantages et des inconvénients pour chacun des deux types de barrages.
- Calculez la puissance fournie par la turbine au niveau des deux barrages.

Sur le barrage de Serre-Ponçon, chaque ensemble turbine-alternateur a un rendement 75 %. Sur le barrage de Lavey, chaque alternateur a une puissance de 31 MW.

QUESTIONS

- Calculez la puissance électrique maximale que le barrage de Serre-Ponçon peut fournir au réseau.
- Estimez le rendement de l'ensemble turbine-alternateur du barrage de Lavey.