



Objectif : comparer différents dispositifs de stockage d'énergie selon différents critères (masses mises en jeu, capacité et durée de stockage, impact écologique).

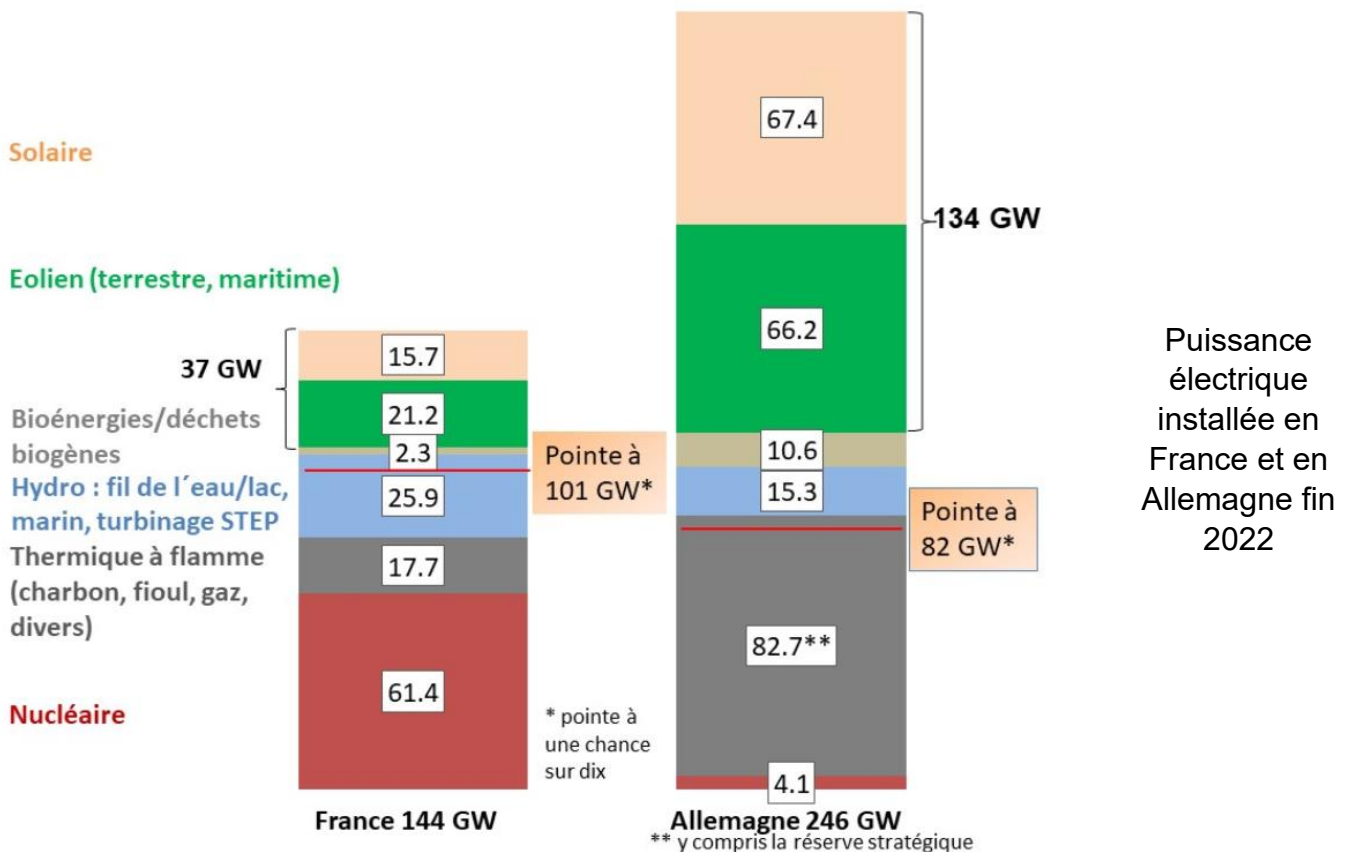
Document 1 :



Centrale électrique allemande à charbon

Les Allemands ont investi des milliards dans les éoliennes et les panneaux solaires sans pour autant pouvoir se passer de leurs centrales à charbon car ils n'ont pas réussi à stocker l'électricité produite par ces installations. Lorsque le ciel est parfaitement bleu et que le vent souffle ils sont obligés d'exporter leur surplus d'électricité.

Document 2 :



En France :

- en été, le maximum de puissance consommée est d'environ 40 GW.
- en hiver, le maximum de puissance consommée est d'environ 70 GW.

En Allemagne :

- en été, le maximum de puissance consommée est d'environ 55 GW.
- en hiver, le maximum de puissance consommée est d'environ 90 GW.

**Document 3 : le facteur de charge**

Le facteur de charge est le rapport entre l'énergie électrique produite pendant une période donnée et l'énergie qui aurait été produite si cette installation avait été exploitée pendant la même période, en continu.

Exemple :

Une éolienne de 100MW fonctionne 5 h durant la journée du 6 août 2023.
Quelle est le facteur de charge de cette éolienne pour cette journée ?

Calcul de l'énergie réellement produite par cette éolienne :

$$E_{5h} = P \times t = 100 \text{ MW} \times 5 \text{ h} = 500 \text{ MWh}$$

Calcul de l'énergie qu'aurait produit cette éolienne si elle avait fonctionné en continu :

$$E_{24h} = P \times t = 100 \text{ MW} \times 24 \text{ h} = 2400 \text{ MWh}$$

$$\text{Calcul du facteur de charge : } f = \frac{E_{5h}}{E_{24h}} = \frac{100 \text{ MW} \times 5h}{100 \text{ MW} \times 24h} = \frac{5}{24} = 0,21$$

En multipliant ce résultat par 100 on exprime ce facteur de charge en % .

Ce 6 août 2023, le facteur de charge de l'éolienne est de 21 %.

Question 1 :

Calculer le facteur de charge d'un ensemble de panneaux solaires de 10 MW qui fonctionne en moyenne 2,5 h par jour.

Question 2 :

L'hydraulique français représente 21 % du total de la puissance installée toutes sources confondues, mais produit seulement environ 12 % de l'énergie. Si cet écart est la résultante d'un facteur de charge de 37 % apparemment défavorable, il cache en fait un atout considérable : la flexibilité de production et la capacité d'adaptation aux besoins du réseau électrique.

En moyenne, combien d'heures par jour les centrales hydrauliques françaises fonctionnent-elles ?



Document 4 :

Concernant l'Allemagne :

Facteur de charge moyen pour l'année 2021 :

- pour le solaire : 11 % (cela descend à 4 % en hiver)
- pour l'éolien : 21 %

Puissance électrique moyenne consommée en hiver : 60 GW

Puissance électrique moyenne consommée en été : 40 GW

Puissance électrique moyenne consommée en automne : 50 GW

Question 3 :

- En France, la puissance électrique installée en éolienne et en panneaux solaires est-elle suffisante pour fournir l'électricité nécessaire lors des pics hivernaux ? Justifiez votre réponse avec des données chiffrées.
- En Allemagne, la puissance électrique installée en éolienne et en panneaux solaires est-elle suffisante pour fournir l'électricité nécessaire lors des pics hivernaux ? Justifiez votre réponse avec des données chiffrées.

Question 4 :

En Allemagne, les éoliennes et les panneaux solaires sont-ils capables, à eux seuls, de fournir l'électricité nécessaire au fonctionnement du pays ?

Document 5 :

En Allemagne, dans le mix électrique, la part des énergies renouvelables a atteint 46,3 % en 2022. Le gouvernement prévoit que les éoliennes terrestres devront passer de 58 GW en 2022 à 115 GW en 2030 et le parc solaire de 67 GWc à 215 GWc.

En 2030, la puissance des installations d'énergie renouvelable aura donc certainement plus que doubler par rapport à 2022.

**Question 5 :**

Si en 2030, la puissance des énergies renouvelables double comme prévu, la part des énergies renouvelables dans le mix électrique allemand passera-t-elle à $2 \times 46,3 \% = 92,6 \%$? Justifiez clairement votre réponse.

Document 6 :

L'électricité est un vecteur très pratique pour le transport de l'énergie, mais difficile à stocker. En effet, le courant électrique dans un métal est un déplacement d'ensemble des électrons à l'intérieur de ce métal. Malheureusement, il n'est pas possible de stocker ce mouvement d'électrons.

L'énergie électrique est donc transformée pour être stockée sous une autre forme : énergie mécanique, thermique ou chimique par exemple.

Exemples de systèmes de stockage pour l'énergie électrique :

- stockage gravitaire de masse d'eau avec les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP) ;
- stockage thermodynamique avec les systèmes de stockage par air comprimé (CAES) ;
- stockage d'énergie cinétique avec les volants d'inertie ;
- stockage électrochimique avec les batteries
- stockage avec des super condensateurs.

Les moyens de stockage de l'énergie électrique existent mais il est impératif de bien considérer les ordres de grandeurs mis en jeu pour véritablement comprendre le problème.

Document 7 : principe de fonctionnement d'une STEP

STEP : Station de Transfert d'Energie par Pompage



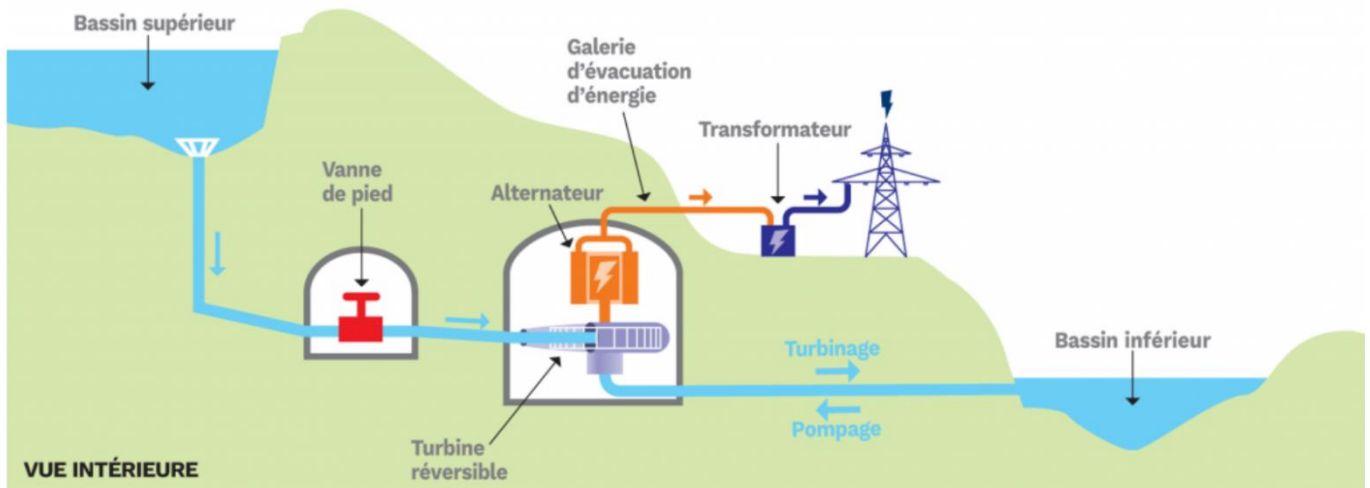
Bassin supérieur : barrage de Grand'Maison



Bassin inférieur : barrage du Verney



En service depuis 1988, le barrage de Grand'Maison est installé en Isère (dans les Alpes) à près de 1 700 mètres d'altitude. Avec une installation de 1 800 MW, cette centrale hydro-électrique est la plus puissante de France.



Le principe de la STEP est le suivant : lorsque le réseau a besoin d'électricité, la STEP utilise l'eau qui se trouve dans le bassin supérieur pour produire de l'électricité (mode turbine). C'est la force de l'eau qui fait tourner la turbine.

Aux heures de faible consommation, lorsque l'électricité est disponible sur le réseau, l'eau est pompée (mode pompe) de la retenue inférieure vers la retenue supérieure. C'est alors le réseau qui alimente l'alternateur comme un moteur électrique. Il fait tourner la turbine en sens inverse dans le sens pompe pour remonter l'eau vers la retenue supérieure. Le stock d'énergie potentielle est ainsi reconstitué pour un nouveau cycle de production et ce, indépendamment de l'eau venant du ciel et/ou des autres cours d'eau naturels.

Vidéo de présentation d'une STEP d'EDF par EDF : <https://youtu.be/Rjal0pv9llk>

Document 8 : l'intérêt d'une STEP

Les STEP ont un rôle essentiel dans le mix énergétique français : elles permettent de consommer via le mode pompe l'énergie dite excédentaire ou non utilisée produites par les nouvelles énergies renouvelables comme l'éolien et le photovoltaïque.

Document 9 : rendement énergétique d'une STEP



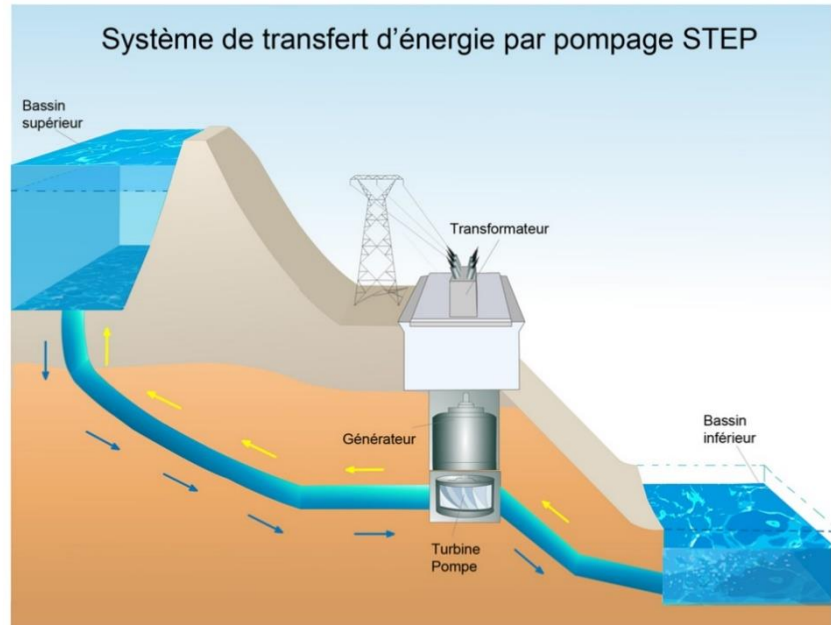
C O N N A I S S A N C E
d e s E N E R G I E S

Les STEP bénéficient d'un bon rendement (rapport entre électricité produite et l'électricité consommée) qui est situé entre 70% (vieille installation) et 85% (installation récente). Cela signifie que pour produire 1 MWh, il a fallu préalablement consommer près de 1,25 MWh en moyenne pour pomper l'eau jusqu'au bassin supérieur.



Question 6 :

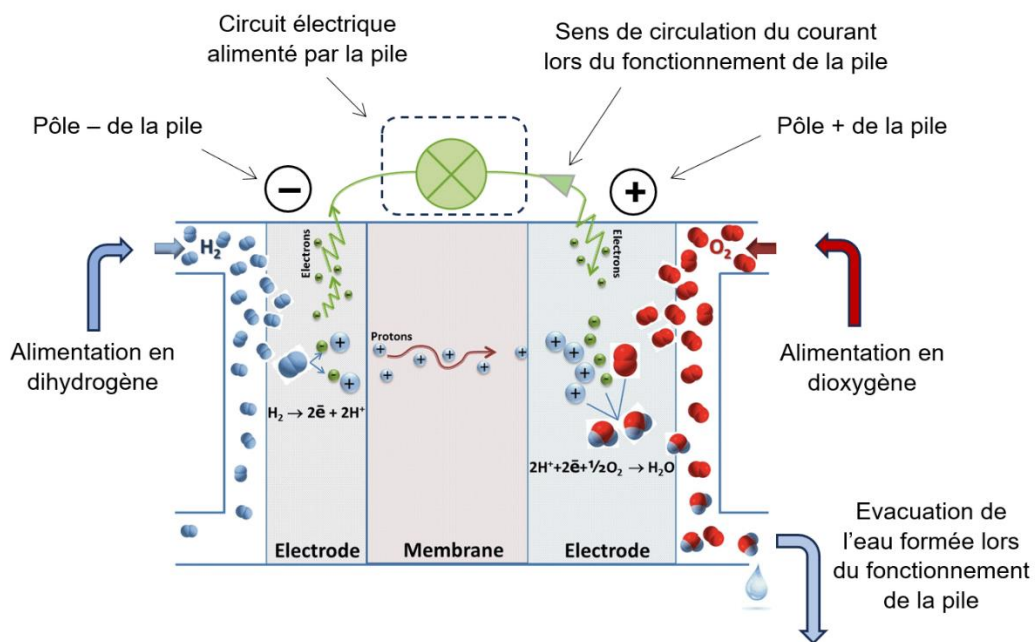
Sur le schéma ci-contre d'une STEP, les flèches jaunes indiquent-elles un fonctionnement en mode production d'électricité ou en mode stockage d'énergie ? Justifiez clairement votre réponse.



Question 7 :

Retrouvez par le calcul le 1,25 MWh dont parle l'article du site *Connaissance des énergies*.

Document 10 : principe de la pile à combustible



Comme son nom l'indique, la pile à combustible est une pile qui fonctionne avec un combustible, en l'occurrence, le dihydrogène $H_2(g)$.



Avec du dihydrogène et le dioxygène présent dans l'air, cette pile est capable de fournir du courant électrique avec l'eau comme seul sous-produit (ce qui constitue un atout de taille pour la qualité de l'air). Mais en terme de pollution, le bilan de la pile à combustible doit tenir compte du moyen de production du dihydrogène utilisé.

Document 11 : la production de dihydrogène

Aujourd'hui, 95 % du dihydrogène est produit à partir des combustibles fossiles (on casse les molécules d'hydrocarbure pour en libérer le dihydrogène). Ce procédé est très compétitif, il offre un bon rendement mais est aussi très polluant.

De nouvelles voies de production sont en cours d'élaboration.

Parmi les procédés envisageables, l'électrolyse de l'eau est une solution prometteuse. L'électrolyse permet de décomposer chimiquement l'eau en dioxygène et dihydrogène sous l'action d'un courant électrique. La production de dihydrogène par électrolyse peut se faire dans de petites unités réparties sur le territoire national. Pour être rentable, ce procédé exige de pouvoir disposer de courant électrique à très faible coût. Actuellement, la production de dihydrogène par électrolyse coûte 3 à 4 fois plus cher que la production à partir du pétrole.

Actuellement, on cherche aussi à faire produire du dihydrogène par des microalgues ou des bactéries qui utilisent la lumière et des enzymes (les hydrogénases).

Document 12 : le rendement d'un système basé sur le dihydrogène

Il faut autour de 60 kWh d'électricité pour produire 1 kg de dihydrogène qui in fine permettra de produire autour de 14 kWh d'électricité finale utile par la pile à combustible.

La perte d'énergie est conséquente car le stockage et le transport du dihydrogène sont très énergivores (le dihydrogène est très explosif et a une très faible densité).

Le rendement global de ce système est donc autour de 25 %.

Question 8 :

Retrouvez par le calcul le rendement de 25 % mentionné dans le document précédent.

Document 13 : une mobilité basée sur le dihydrogène

Pour faire fonctionner au dihydrogène tous les moyens de transport routier français, il faudrait approximativement doubler la production actuelle d'électricité sur le sol français. Ce qui économiquement, techniquement et matériellement est totalement irréaliste.



Question 9 :

Mieux vaut-il utiliser une STEP ou fabriquer du dihydrogène pour stocker de l'énergie électrique ? Justifiez clairement votre réponse.

Question 10 :

Les STEP permettront-ils aux Allemands de stocker l'énergie électrique fournie par leurs panneaux photovoltaïques et leurs éoliennes ? Justifiez clairement votre réponse.

Question 11 :

La fabrication de dihydrogène permettra-t-elle aux Allemands de stocker l'énergie électrique fournie par leurs panneaux photovoltaïques et leurs éoliennes ? Justifiez clairement votre réponse.

Question 12 :

Les Allemands pourront-ils prochainement réduire leurs émissions de GES ? Justifiez clairement votre réponse.