

# DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE SANS COMBUSTION

L'énergie électrique est depuis longtemps principalement obtenue grâce aux centrales thermiques à flamme. Mais les impacts sur l'environnement de ces dernières nécessitent de concevoir d'autres modes de production, sans combustion.

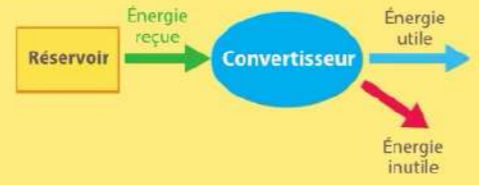
**OBJECTIF**  
Comprendre le principe des conversions d'énergie

## Quelles transformations énergétiques sont réalisées dans les centrales électriques fonctionnant sans combustion ?

### JE DÉCOUVRE EN AUTONOMIE



**Vidéo**  
hatier-clic.fr/est128a



- Un **diagramme de conversion** énergétique permet de représenter les conversions d'énergie sous une forme codée :
  - un rectangle représente un **réservoir** d'énergie ;
  - un ovale représente un **convertisseur** d'énergie ;
  - une flèche représente une **forme** d'énergie.

■ Lorsque plusieurs conversions d'énergie sont représentées les unes à la suite des autres, on parle de **chaîne** de conversion énergétique.

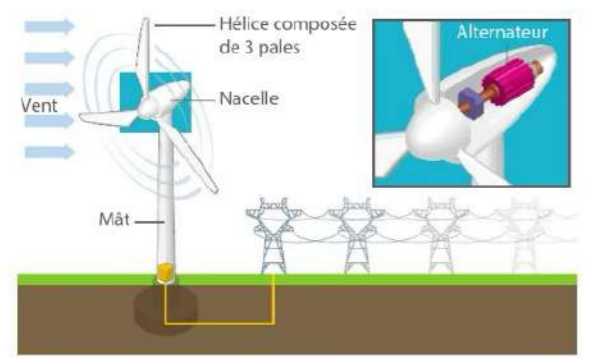
### JE VÉRIFIE QUE J'AI COMPRIS

Pour les deux centrales ci-dessous :

- identifier la forme d'énergie reçue et la (les) forme(s) d'énergie obtenue(s) ;
- représenter son diagramme de conversion énergétique.

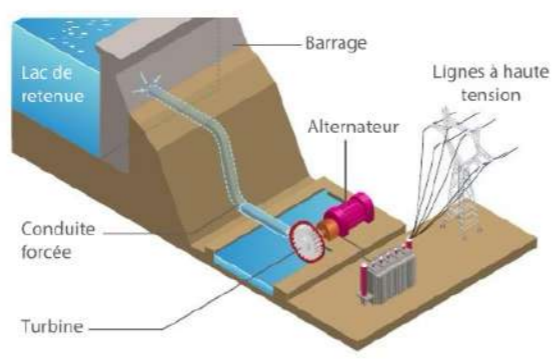
### 1 La conversion directe de l'énergie mécanique

Dans une éolienne et dans une centrale hydroélectrique, l'énergie mécanique du vent ou de l'eau est convertie en énergie électrique par l'alternateur. De l'énergie thermique est dissipée par frottements.



La centrale éolienne

**Le saviez-vous ? Un pays dans le vent**  
Avec près de 6 000 éoliennes, le Danemark couvre plus de 43 % de ses besoins en énergie électrique. Ce pays a été l'un des pionniers dans l'implantation des éoliennes en mer.



La centrale hydroélectrique

**Le saviez-vous ? Au pays des fjords**  
Plus de 95 % de l'énergie électrique norvégienne provient des centrales hydroélectriques. La Norvège bénéficie d'une géographie adaptée et d'un climat avec de fortes précipitations qui lui ont permis d'installer plus de 800 centrales hydroélectriques.

**Vidéos**  
Fonctionnement d'une éolienne  
Fonctionnement d'un barrage  
hatier-clic.fr/est128b  
hatier-clic.fr/est128c

### JE M'ENTRAÎNE À...

Pour approfondir : ex. 5 et 12 p. 140-142

Représenter la chaîne de conversion énergétique associée à chacune des trois centrales suivantes en identifiant les différents convertisseurs.

**Vidéos**  
Centrale solaire thermique à concentration  
Fonctionnement d'une centrale nucléaire  
hatier-clic.fr/est129a  
hatier-clic.fr/est129b

### 2 La conversion indirecte de l'énergie mécanique

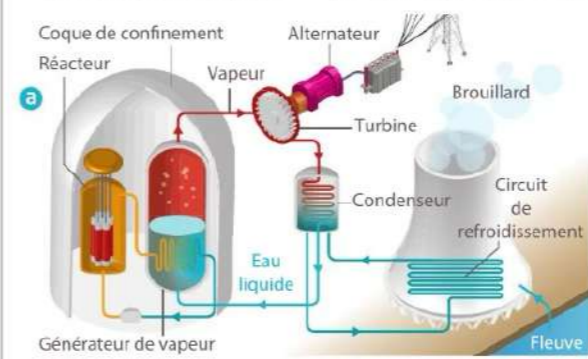
#### a La centrale thermique nucléaire

Dans le réacteur d'une centrale thermique nucléaire, on réalise la fission des noyaux des atomes d'uranium. L'énergie nucléaire est alors convertie en énergie thermique.

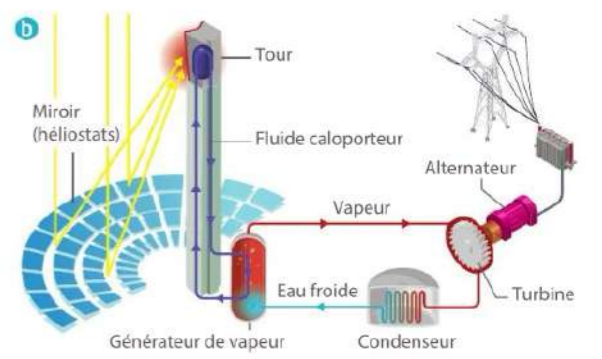
#### b La centrale solaire thermique

Des milliers de miroirs, appelés héliostats, réfléchissent les rayonnements solaires pour les concentrer en haut d'une tour. L'énergie radiative est alors absorbée par un fluide caloporteur\* et convertie en énergie thermique.

Dans les deux cas, l'énergie thermique obtenue est utilisée pour chauffer de l'eau qui va être vaporisée dans un générateur de vapeur. La vapeur d'eau sous pression est utilisée pour faire tourner une turbine, qui entraîne un alternateur. Lors de chaque conversion, de l'énergie thermique est dissipée dans l'environnement.



**Le saviez-vous ? L'exception française**  
Si environ 10 % de l'énergie électrique mondiale provient des centrales nucléaires, en France ce pourcentage dépasse 75 %. Le taux d'émission de CO<sub>2</sub> par kilowattheure d'énergie électrique obtenue reste ainsi l'un des plus bas d'Europe.



**Le saviez-vous ? Noor, un projet lumineux**  
Bénéficiant d'une exposition solaire remarquable, le Maroc a investi dans des centrales solaires thermiques composées de centaines de milliers de miroirs à base d'argent. En 2030, 50 % des besoins du pays en énergie électrique devraient être obtenus grâce aux sources d'énergie renouvelables.

### 3 La conversion de l'énergie radiative

Les panneaux solaires sont constitués de cellules photovoltaïques, composées principalement de silicium, parfois d'indium, de gallium et de germanium. Elles convertissent l'énergie radiative du Soleil en énergie électrique « utile » mais aussi en énergie thermique « inutile ».



**Vidéo**  
Centrale photovoltaïque  
hatier-clic.fr/est129c

**VOCABULAIRE**  
**Fluide caloporteur** : gaz ou liquide utilisé pour transférer l'énergie thermique d'un lieu à un autre.

### Penser la science

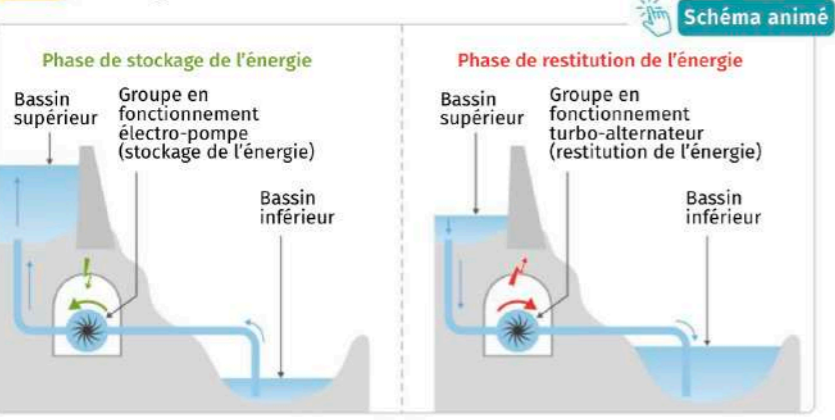
#### Exercer son esprit critique

Avec la première fermeture d'une centrale nucléaire en 2011, l'Allemagne engage sa révolution énergétique, « Energiewende », qui a pour objectifs de sortir du nucléaire d'une part et de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> en misant sur les sources d'énergie renouvelables d'autre part. Mais le bilan est sujet à discussion. Le mix énergétique allemand est avant tout fossile, puisque plus de 50 % de l'électricité est aujourd'hui produite à partir du charbon.

- Pourquoi l'abandon du nucléaire allemand est-il sujet à polémique ?

➔ Développer son esprit critique p. 24

**Doc. 1** Principe de fonctionnement d'une STEP



Le barrage de Grand'Maison en Isère a été mis en service en 1988. La centrale liée à ce barrage est une STEP (station de transfert d'énergie par pompage). Elle permet de remonter l'eau dans le barrage lorsque la production est supérieure à la consommation. Lorsque la demande d'électricité devient plus importante, la centrale fonctionne comme une centrale hydroélectrique normale.



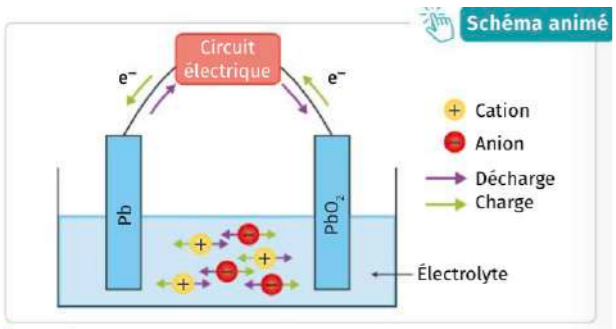
Le bassin supérieur peut contenir une masse d'eau de  $132 \times 10^6$  t et chaque tonne d'eau permet de produire 272 W·h d'énergie électrique. Néanmoins, pour produire 100 kW·h d'énergie électrique lors de la phase de restitution, il faut consommer 125 kW·h d'énergie électrique lors du pompage de la phase de stockage.

**Doc. 2** Stockage à l'aide d'un accumulateur

Ce que l'on appelle « batteries » correspond en réalité à des accumulateurs. Ils fonctionnent comme une pile lors de la décharge. Mais sous l'action d'un courant électrique, le sens de la transformation chimique s'inverse. Les produits formés lors de la décharge reforment alors les réactifs de départ : l'accumulateur est de nouveau chargé.



Aujourd'hui, les accumulateurs lithium-ion sont les plus utilisés (smartphones, tablettes, etc.). Ces accumulateurs peuvent atteindre une densité énergétique de 200 W·h par kilogramme de matière et peuvent supporter plusieurs centaines de cycles de charge. Ils ont en moyenne un rendement d'environ 90 %.

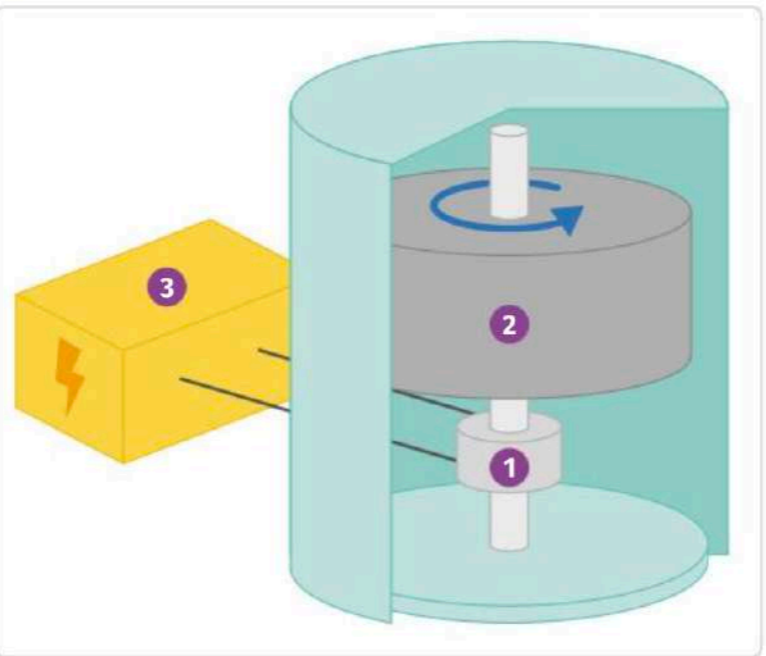


Fonctionnement d'un accumulateur au plomb

**Vocabulaire**

**Densité énergétique** : quantité d'énergie stockée en watt-heure (W·h) pour 1 kg du matériau de stockage.  
**Rendement** : dans le cadre du stockage, rapport entre l'énergie électrique restituée après stockage et l'énergie électrique consommée pour le stockage.

**Doc. 3** Volant d'inertie

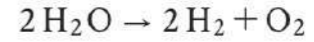


Un volant d'inertie permet de stocker de l'énergie sous forme cinétique avec un rendement de 80 % et une densité énergétique de plusieurs centaines de watts-heures par kilogramme. Durant le stockage, un moteur 1 convertit l'énergie électrique en énergie cinétique faisant tourner la roue 2. En phase de restitution, le moteur 1 devient générateur et convertit l'énergie cinétique en électricité faisant ralentir la roue 2 et alimentant le circuit 3.

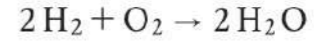
Ce système est employé dans le métro de Rennes où une roue de 2,5 tonnes est installée au centre d'une ligne. Lors du freinage de la rame, une partie de l'énergie sert à accélérer la roue et cette énergie est restituée au redémarrage de la rame. Cela permet au métro d'économiser l'équivalent d'une dizaine de jours de consommation électrique par an.

**Doc. 4** Dihydrogène, futur du stockage ?

Il est possible de former du dihydrogène H<sub>2</sub> par décomposition de l'eau H<sub>2</sub>O en utilisant de l'énergie électrique (électrolyse).



Ensuite, la transformation inverse peut être réalisée dans une pile à combustible. Elle produit de l'eau et de l'électricité.



- Cette méthode de stockage présente deux inconvénients :
- la molécule de dihydrogène H<sub>2</sub> est si petite qu'elle passe à travers la plupart des matériaux ; étant gazeux, le dihydrogène occupe un très grand volume. Ainsi, il faut le conserver à des pressions très élevées et des températures très faibles, ce qui implique de gros enjeux technologiques ;
  - pour restituer 100 kW·h, il faut consommer 440 kW·h, ce qui engendre un rendement médiocre.

Mais, avec une densité énergétique de 33 kW·h par kilogramme, l'intérêt pour ce mode de stockage est croissant.



**Questions ?**

1. **Doc. 1 à 4** Pour chaque système décrit, nommer la forme d'énergie stockée.
2. **Doc. 1** Schématiser les chaînes énergétiques liées aux deux phases de fonctionnement de la STEP.
3. **Doc. 1** Calculer le rendement et la densité énergétique d'une STEP.
4. **Doc. 4** Calculer le rendement du stockage par dihydrogène H<sub>2</sub>.
5. **Bilan** Comparer les différents modes de stockage vis-à-vis des critères suivants :
  - contraintes sur l'environnement ;
  - densité d'énergie ;
  - rendement.

**10** Des panneaux photovoltaïques, qui ont un rendement d'environ 20 %, alimentent une lampe à incandescence qui convertit 5 % de l'électricité en lumière (le reste est dissipé sous forme d'énergie thermique).

1. Faire la chaîne énergétique globale des conversions d'énergies depuis les rayons du soleil jusqu'à une pièce éclairée par cette lampe.
2. Calculer le rendement global des conversions d'énergies.



**11** Un volume de 1 L d'eau est chauffé à l'aide d'une bouilloire électrique. On considère que l'énergie électrique utilisée par la bouilloire est fournie par la centrale nucléaire la plus proche.

Calculer le rendement global des conversions d'énergie depuis l'uranium jusqu'à l'eau.

#### Rendements de conversion

- › Le rendement de conversion des centrales nucléaires françaises est compris entre 31 % et 37 %.
- › Le rendement d'acheminement de l'électricité par le réseau électrique est d'environ 94 %.
- › Le rendement de conversion de l'énergie reçue par la bouilloire en énergie thermique de l'eau est d'environ 82 % (il dépend du taux de remplissage de la bouilloire et de l'isolation thermique).

**16** Calculer la puissance perdue par effet Joule dans un conducteur de résistance  $R = 20 \Omega$  parcouru par un courant d'intensité  $I = 2,5 \text{ A}$ .

**17** Calculer l'énergie dissipée par effet Joule dans un fil électrique de résistance  $R = 2,0 \Omega$  traversé par un courant  $I = 200 \text{ mA}$  pendant une journée. Exprimer le résultat en watt-heure (W·h).

**18** Une bouilloire permet de chauffer de l'eau avec une puissance thermique de 2 000 W pour une tension de 220 V et a une résistance de 20  $\Omega$ .

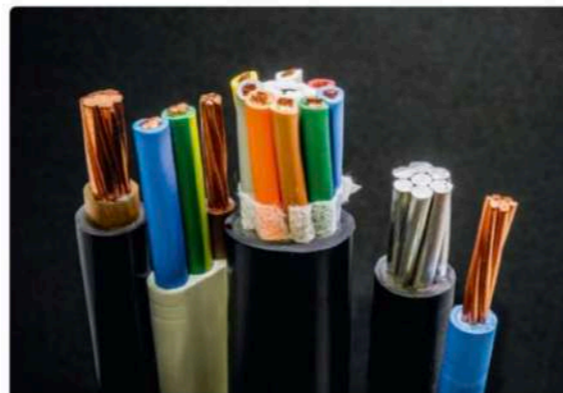
1. Calculer l'intensité du courant circulant dans la bouilloire.
2. En déduire la puissance électrique alimentant la bouilloire.
3. Retrouver le rendement de 82 % donné dans l'exercice 11.



#### 23 Divers métaux pour conduire l'électricité

✓ Calculer une puissance dissipée par effet Joule

La grande majorité des fils électriques est fabriquée en cuivre. Pourtant, certains câbles sont en aluminium, en argent, en or ou même en acier. On étudie des fils de 2,1 mm de diamètre.



#### 25 Rendement d'une pile

✓ Calculer le rendement global d'un système de conversion d'énergie

Dans une pile, la puissance chimique est convertie en puissance électrique et en puissance thermique due à l'effet Joule.

Une pile de 4,5 V débite un courant d'intensité de 0,20 A. Or, comme tout conducteur, la pile possède une résistance interne valant 2,0  $\Omega$ . Cette pile alimente un ventilateur équipé d'un moteur dont le rendement vaut 80 %.



#### Questions

1. Calculer la puissance dissipée par effet Joule et la puissance électrique de cette pile.
2. En déduire le rendement de conversion de la pile.
3. Calculer le rendement global du système pile-ventilateur.
4. Calculer la puissance mécanique fournie par le moteur.

#### Données

Matériau	Cuivre	Aluminium	Argent
Résistivité $\rho$ ( $\Omega \cdot \text{m}$ )	$1,7 \times 10^{-8}$	$2,8 \times 10^{-8}$	$1,6 \times 10^{-8}$
Masse volumique $\mu$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	8 960	2 700	10 500
Coût indicatif au kilogramme (€)	8	1	900

#### Questions

1. Calculer la résistance électrique d'un fil de cuivre, d'un fil d'aluminium, puis d'un fil d'argent de longueur  $L = 100 \text{ m}$  et de section de surface  $S = 3,5 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ , sachant que  $R = \rho \cdot \frac{L}{S}$ .
2. Calculer la masse de ces trois fils.
3. Expliquer pour quelles raisons les fils électriques sont généralement fabriqués avec du cuivre.

## 28 Minimisation des pertes

✓ Calculer une puissance dissipée par effet Joule

Pour limiter les pertes par effet Joule, l'électricité peut être transportée dans deux câbles identiques. Chacun des câbles transporte alors la moitié de l'intensité du courant  $I$  qui traverserait un seul câble, tout en ayant la même section que ce câble seul. L'intensité maximale du courant qui peut parcourir les lignes aériennes à haute tension est d'environ  $0,7 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$ . Au-delà, le câble s'échauffe trop et risque de se déformer.

### Questions

1. Calculer l'intensité maximale du courant qui peut traverser un câble haute tension de section  $500 \text{ mm}^2$ .
2. Calculer la résistance  $R$  d'un câble de longueur  $L = 100 \text{ km}$  composé de cuivre.
3. En déduire le pourcentage de pertes par effet Joule si ce câble transporte de l'énergie électrique à une tension de  $400 \text{ kV}$ .
4. Reprendre la **question 3** pour un câble dédoublé et conclure quant à l'intérêt d'une telle solution.

$$P_J = R \cdot I^2$$

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S}$$

$P_J$  : puissance dissipée par effet Joule (W)

$R$  : résistance électrique ( $\Omega$ )

$I$  : intensité du courant électrique (A)

$\rho$  : résistivité du matériau ( $\Omega\cdot\text{m}$ )

$L$  : longueur (m)

$S$  : section ( $\text{m}^2$ )

### Donnée

Résistivité du cuivre :  $\rho_{\text{cuivre}} = 1,7 \times 10^{-8} \Omega\cdot\text{m}$



# Fiche Révision Chapitre 2

- Savoir établir une chaîne de conversion d'énergie (réservoirs en rectangles et convertisseurs entourés)

- Rendement :  $\eta = \frac{\text{Energie Utile}}{\text{Energie absorbée}}$

- Rendement global :  $\eta_{global} = \prod \eta_{etape} = \eta_1 \times \eta_2 \times \eta_3 \times \dots$

- Savoir expliquer l'effet joule : échauffement provoqué par le passage d'un courant dans un conducteur.

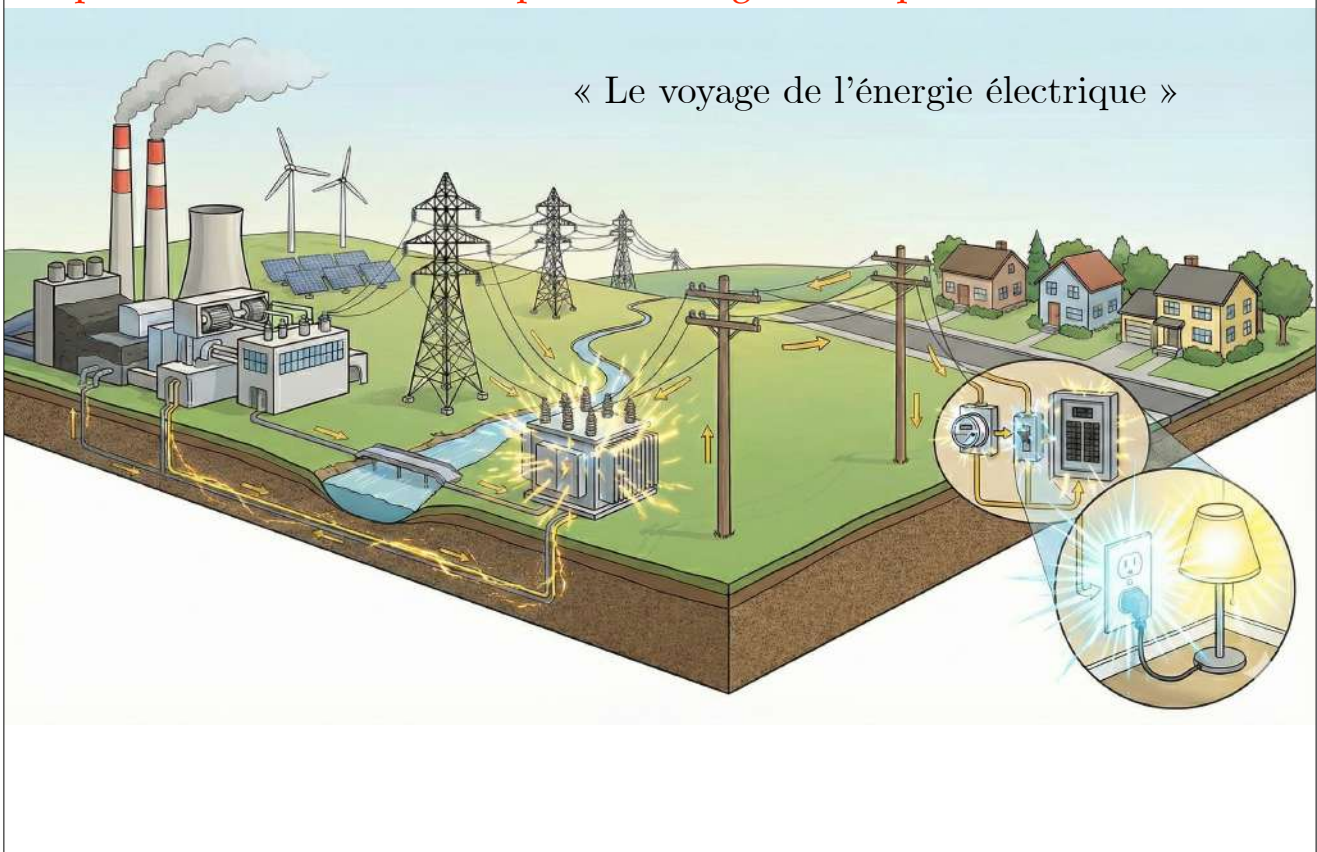
- Expression de la puissance perdue par effet joule :  $P_{perdue} = P_{Joule} = R \times I^2$

- Calculer une puissance électrique :  $P = U \times I$

- Pour transporter le courant on utilise donc la très haute tension (augmenter U pour diminuer I afin de minimiser les pertes par effets joules)
- Pour faire face à la demande et la production intermittente on doit stocker l'énergie : énergie chimique (pile), énergie mécanique (STEP, barrages).
- Quelque soit le moyen de produire du courant où de le stocker, il existe un impact sur l'environnement

## Thème 2 : Le futur des énergies

### Chapitre 2 : Conversion et transport de l'énergie électrique



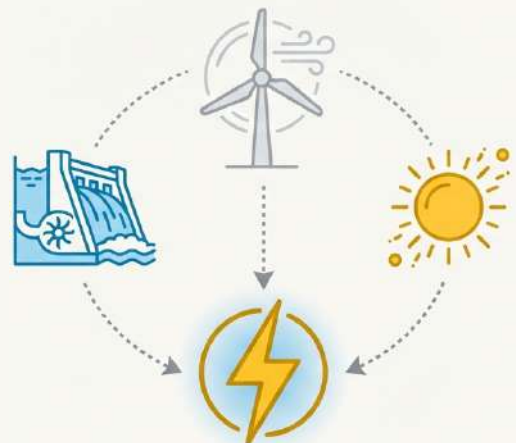
**Constat** : L'électricité est devenu indispensable à notre vie.

Dans les centrales à flamme (charbon, gaz ou pétrole), on brûle un combustible carboné (qui contient du carbone).

C'est efficace mais malheureusement cela émet du dioxyde de carbone, gaz à effet de serre (GES), et donc participe au dérèglement climatique.

**Problématique** : Comment produire de l'électricité sans brûler ?

**L'enjeu** : convertir une forme d'énergie primaire (eau, soleil, vent...) en énergie électrique.



# Trois chemins pour une même destination



## Conversion Mécanique

Transformer un mouvement en électricité.

Soit directement (dynamos, éoliennes, barrages hydroélectriques), soit indirectement à partir de chaleur (centrales nucléaires, géothermie).



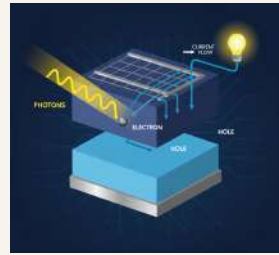
Induction électromagnétique



## Conversion Radiative

Capter l'énergie du Soleil.

Les panneaux photovoltaïques transforment directement l'énergie lumineuse en courant électrique.



Effet photoélectrique



## Conversion Electrochimique

L'énergie au cœur de la matière.

Des réactions chimiques libèrent de l'électricité (piles, accumulateurs, piles à hydrogène).



Energie chimique

- L'énergie ne se crée pas, elle se transforme. Une « chaîne de transformations » décrit le parcours de l'énergie, d'une forme à une autre.
- Chaque conversion entraîne des pertes d'énergie.
- Rendement global d'une chaîne de transformations :

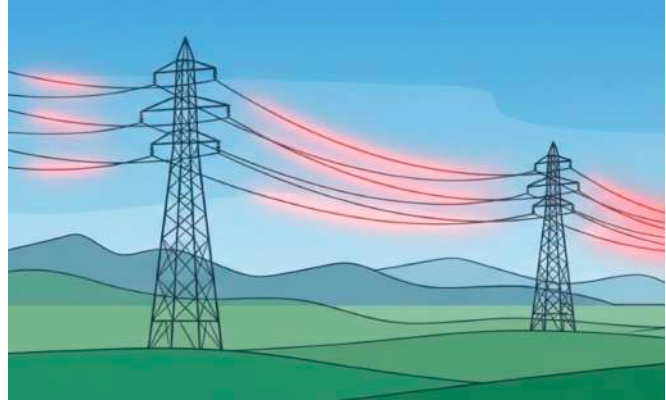
$$\eta_{global} = \prod \eta_{etape} = \eta_1 \times \eta_2 \times \eta_3 \times \dots$$

$$\eta = \frac{\text{Puissance Utile}}{\text{Puissance absorbée}}$$

## II. L'autoroute électrique

Une fois produite, l'énergie doit voyager sur plusieurs centaines de kilomètres jusqu'aux villes.

Ce transport se fait par des câbles électriques. Mais que se passe-t-il lorsque du courant passe dans un câble ?



Le câble s'échauffe ! La **perte d'énergie** en chemin, dissipée sous forme de **chaleur** est nommé « **Effet Joule** ».

Parfois cette perte est « utile »

Focus: L'Effet Joule, l'ennemi public n°1



Tout **conducteur** électrique oppose une **résistance** (notée  $R$ ) au **passage** du **courant** (noté  $I$ ). Cette résistance provoque un **échauffement** et donc une **perte d'énergie** sous forme de **chaleur**. La puissance perdue par cet effet se calcule :

$$P_{perdue} = P_{Joule} = R \times I^2$$

La puissance perdue dépend du carré de l'intensité.

Que se passe-t-il si l'intensité est divisée par 2 ?

Soit  $I' = \frac{I}{2}$ . On a alors :

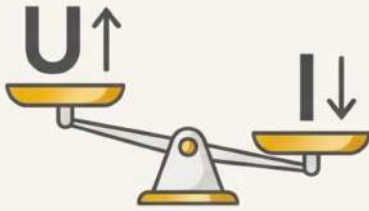
$$P'_{Joule} = R \times I'^2 = R \times \left(\frac{I}{2}\right)^2 = R \times \frac{I^2}{4} = \frac{P_{Joule}}{4}$$



L'objectif est donc de transporter l'électricité avec l'intensité la plus faible possible.

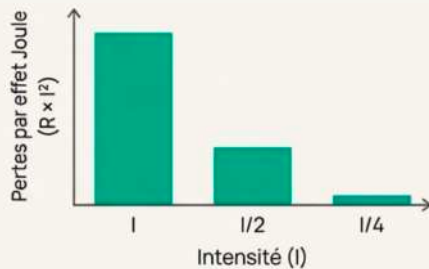
Comment réduire l'intensité (I) sans réduire la puissance transportée (P) ?

En utilisant une autre relation fondamentale :  $P = U \times I$ .



1. Pour une même puissance (P), si on augmente la tension (U), on diminue l'intensité (I).

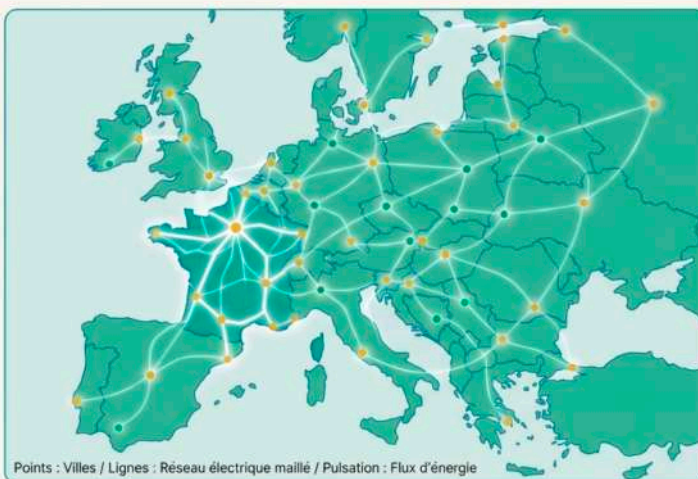
2. Si I diminue, on réduit massivement les pertes par effet Joule ( $RI^2$ ).



3. C'est pourquoi l'électricité voyage sur les grandes lignes à Très Haute Tension (400 000 Volts) !

**La solution : Voyager en Très Haute Tension**

### Un réseau maillé pour plus de sécurité



Le réseau de transport n'est pas une simple ligne droite.

C'est un '**réseau maillé**' qui connecte les zones de production et de consommation à travers la France et l'Europe.

Ce maillage garantit la **stabilité** :

si une ligne tombe en panne, le courant peut emprunter un autre chemin.

Il permet aussi de gérer l'équilibre entre l'offre et la demande à l'échelle d'un continent.

### III. L'équilibre instantané



- L'électricité se consomme au moment où elle est produite.
- Le réseau doit en permanence ajuster la production à la demande, qui varie à chaque seconde.

Que faire si le vent ne souffle pas (baisse de production) ou lors d'un pic de consommation le soir ?

C'est le défi de l'intermittence.

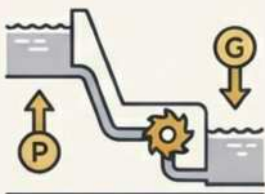
#### Activité 2

Pour faire face à l'intermittence de production et de consommation, il faut mettre l'énergie en réserve : la stocker. Plusieurs moyens sont possibles :



#### **Énergie Chimique**

La plus connue. On charge des batteries ou on produit de l'hydrogène.



#### **Énergie Mécanique**

On utilise l'électricité pour pomper de l'eau dans un barrage en altitude (STEP). On la relâche pour produire de l'électricité quand on en a besoin.



#### **Énergie Électromagnétique**

Stockage dans des supercondensateurs (moins courant pour le réseau).

## IV. L'impact sur l'environnement

Même les méthodes de production sans combustion ont des conséquences sur l'environnement et la société.



Pollution **chimique**  
(fabrication des batteries,  
panneaux solaires)



Déchets **radioactifs**  
(centrales nucléaires)



Impact sur la **biodiversité**  
(construction de barrages,  
parcs éoliens)



Risques **industriels**  
(accidents sur les sites de  
production)