

Les atouts de l'électricité

Cours

Sommaire

I Les méthodes de production d'énergie électrique sans combustion

A Les chaînes énergétiques et le rendement

B La conversion d'énergie mécanique

1. La conversion d'énergie mécanique directe
2. La conversion d'énergie mécanique indirecte

C La conversion d'énergie radiative

D La conversion d'énergie chimique

II Le stockage de l'énergie

A Le stockage de l'énergie chimique

B Le stockage de l'énergie mécanique

C Le stockage de l'énergie électromagnétique

RÉSUMÉ

Il existe trois méthodes de production d'énergie électrique sans combustion : la conversion d'énergie mécanique, d'énergie radiative et d'énergie chimique. Ces méthodes ont un impact sur l'environnement et la biodiversité. Le stockage de l'énergie est un enjeu majeur de la transition énergétique. Malgré ses nombreux atouts, l'électricité pose des difficultés technologiques en matière de stockage sous sa forme propre. L'énergie électrique requiert une transformation en une autre forme d'énergie. Cette énergie chimique, mécanique ou électromagnétique doit être stockée, puis restituée en électricité.

I Les méthodes de production d'énergie électrique sans combustion

Les procédés de fabrication d'énergie sont représentés par des chaînes énergétiques. L'efficacité d'une conversion d'énergie est quantifiée par son rendement. Il existe trois méthodes de production d'énergie électrique sans combustion : la conversion d'énergie mécanique, directe ou indirecte, la conversion d'énergie radiative et la conversion d'énergie chimique.

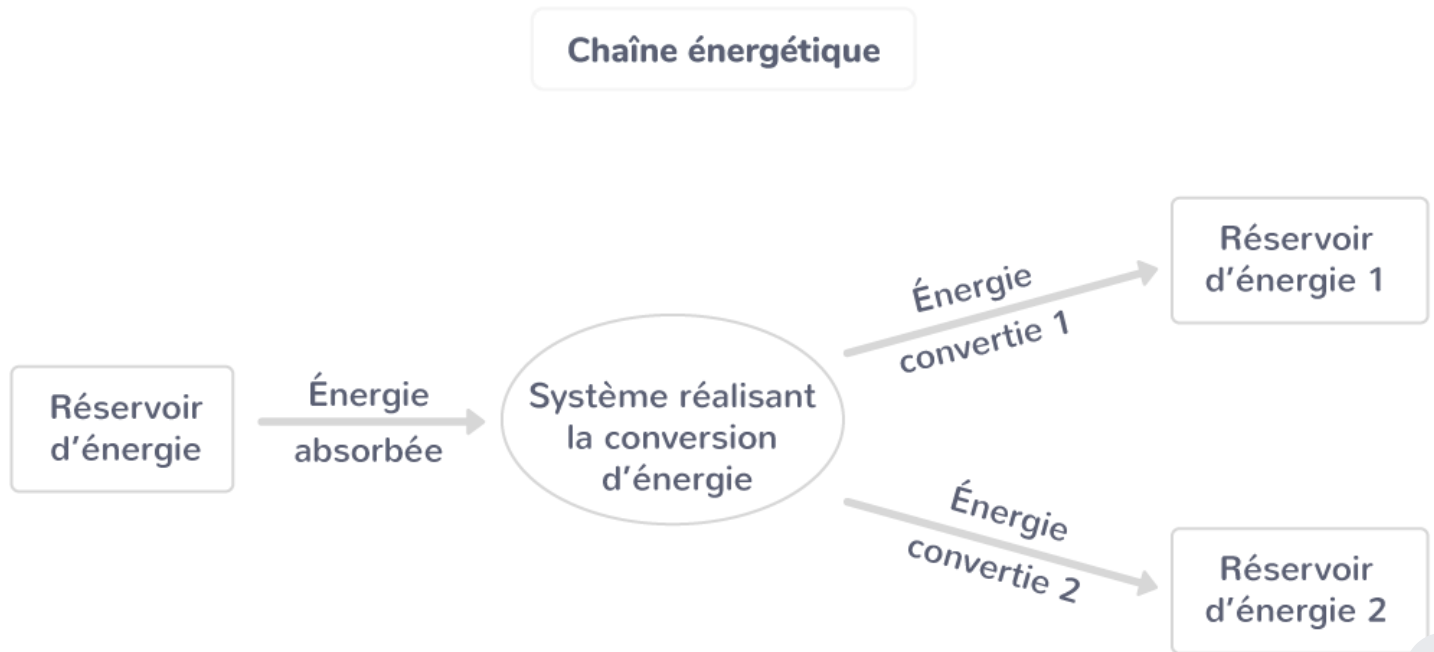
A Les chaînes énergétiques et le rendement

Les chaînes énergétiques sont des schémas représentant l'ensemble des conversions d'énergie d'un système. Le rendement d'une conversion est égal au rapport entre l'énergie utile et l'énergie absorbée, ou entre la puissance utile et la puissance absorbée.

Les conversions d'énergie réalisées par un système ont toutes le même bilan :

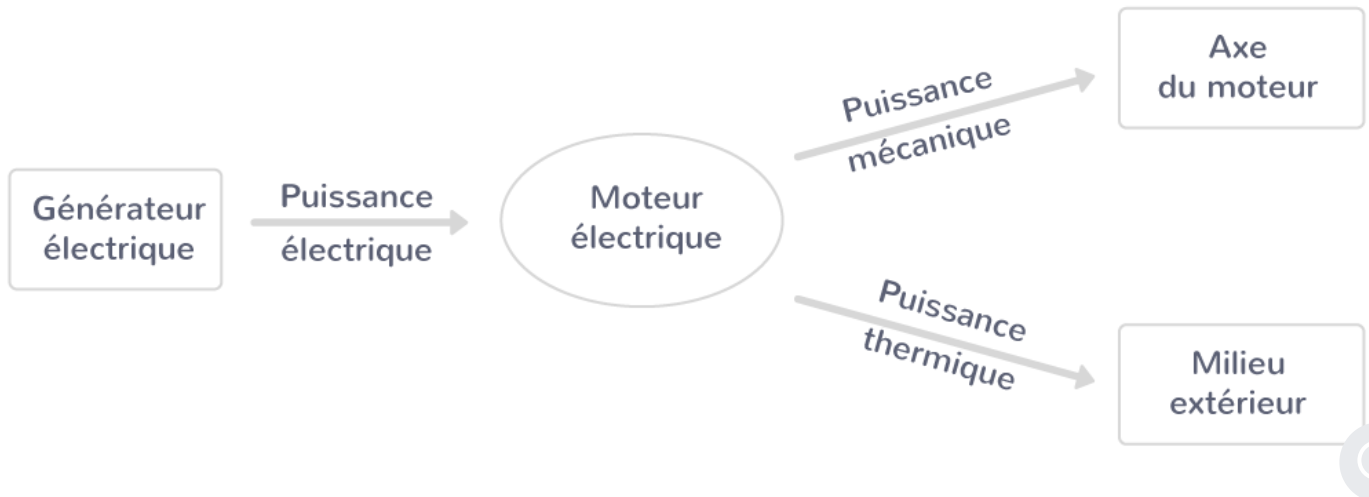
- l'énergie initiale, provenant d'un réservoir d'énergie, est absorbée par le système ;
 - le dispositif transfère l'énergie souhaitée, appelée généralement « énergie utile », à un autre réservoir d'énergie ;
 - une partie de l'énergie est perdue, le plus souvent dissipée sous forme d'énergie thermique (ou chaleur).
- Une chaîne énergétique illustre ce bilan. Par convention, on représente :

- les systèmes dans des ellipses ;
- les réservoirs d'énergie dans des rectangles ;
- les transferts d'énergie ou de puissance par des flèches, au-dessus desquelles on peut indiquer leur nature.



EXEMPLE

Chaîne énergétique d'un moteur électrique



FORMULE

Rendement

Le rendement d'une conversion est le rapport de l'énergie utile par celle absorbée ou aussi de la puissance utile par celle absorbée. C'est une grandeur sans unité, généralement notée η :

$$\eta = \frac{E_{\text{utile(J)}}}{E_{\text{absorbée(J)}}} = \frac{P_{\text{utile(W)}}}{P_{\text{absorbée(W)}}$$

À cause des pertes inévitables lors des conversions d'énergie, le rendement est compris entre 0 et 1. On l'exprime souvent par un pourcentage.

EXEMPLE

L'expression du rendement d'un moteur électrique est :

$$\eta = \frac{P_{\text{mécanique}}}{P_{\text{électrique}}}$$

Ainsi, le rendement d'un moteur qui consomme une puissance électrique de 200 W et fournit une puissance mécanique de 160 W est :

$$\eta = \frac{P_{\text{mécanique}}}{P_{\text{électrique}}} = \frac{160}{200} = 0,800 = 80,0\%$$

Lorsque des conversions d'énergie s'enchaînent, le rendement global est égal au produit des rendements des différentes conversions.

PROPRIÉTÉ

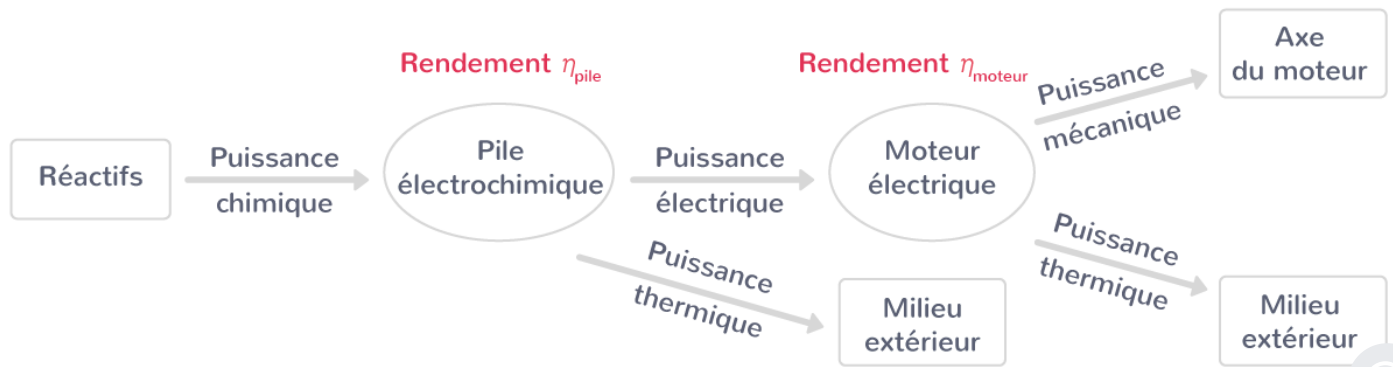
Le rendement global de la conversion de la puissance chimique en puissance mécanique est égal au produit des rendements de la pile et du moteur :

$$\eta = \eta_{\text{pile}} \times \eta_{\text{moteur}}$$

EXEMPLE

Une pile électrochimique alimente un moteur électrique.

Chaîne énergétique d'une conversion globale



B La conversion d'énergie mécanique

La conversion d'énergie mécanique est dite directe si l'énergie électrique est produite seulement par la mise en mouvement d'un élément. Si cette mise en mouvement est précédée de la conversion d'une autre forme d'énergie en énergie thermique, on parle de conversion indirecte.

1. La conversion d'énergie mécanique directe

La conversion d'énergie mécanique directe en énergie électrique est réalisée par les éoliennes, les hydroliennes et les barrages.

Plusieurs dispositifs permettent d'exploiter directement l'énergie mécanique que possède un élément mobile ou des fluides naturels pour produire de l'énergie électrique :

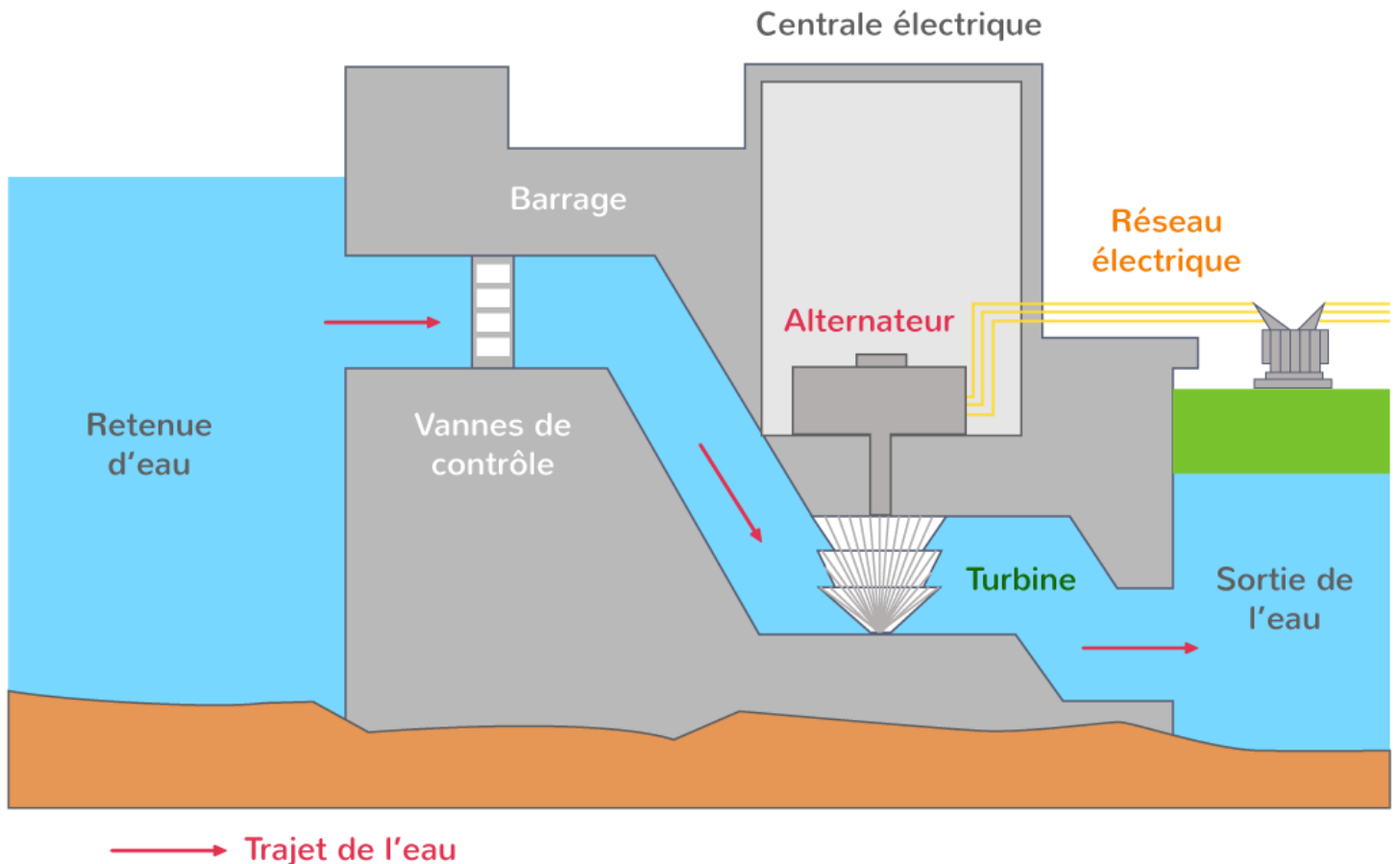
Dispositif	Type d'énergie mécanique exploité
Dynamo	Énergie cinétique d'un élément mobile
Éolienne	Énergie cinétique du vent
Hydrolienne	Énergie cinétique des courants marins
Barrage hydroélectrique	Énergie potentielle de pesanteur d'une retenue d'eau

Dans ces dispositifs, c'est un alternateur qui produit l'énergie électrique. Lorsque l'énergie mécanique initiale provient d'un fluide, air ou eau, une turbine transmet son énergie mécanique à l'alternateur.

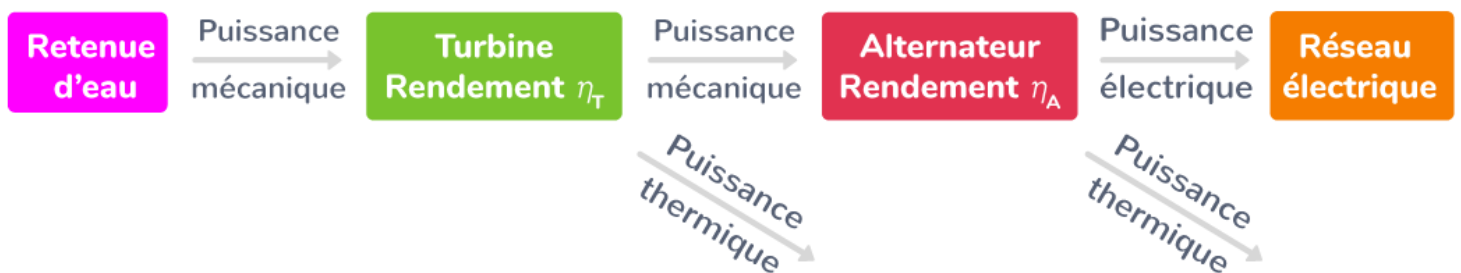
ILLUSTRATION

Dans un barrage hydroélectrique, l'ouverture de la vanne libère la retenue d'eau qui transfère son énergie mécanique à la turbine.

Schéma d'un barrage hydroélectrique



Chaîne énergétique d'un barrage hydroélectrique



Dès que le débit de l'eau est supérieur à 40 % du débit maximal, le rendement de la turbine atteint la valeur de 90 % et le rendement d'un gros alternateur est d'environ 95 %. Dans ces conditions, le rendement global du barrage est donc :

$$\begin{aligned}\eta_{\text{barrage}} &= \eta_T \times \eta_A \\ \eta_{\text{barrage}} &= \frac{90}{100} \times \frac{95}{100} \\ \eta_{\text{barrage}} &= 0,86 = 86 \%\end{aligned}$$

Ces installations requièrent des infrastructures conséquentes et ont un impact sur l'environnement et la biodiversité.

EXEMPLE

La mise en eau des barrages provoque l'inondation de terres, de forêts et d'habitats.

Pendant l'exploitation du barrage, l'équilibre des écosystèmes est mis à mal (sous-oxygénation en amont et suroxygénation en aval), entraînant une hausse de la mortalité de certaines espèces.

Les barrages empêchent l'écoulement des sédiments, ce qui provoque l'envasement des cours d'eau.

PROPRIÉTÉ

L'exploitation de ces énergies ne peut être qu'intermittente.

EXEMPLE

Les éoliennes et les hydroliennes ne produisent de l'énergie électrique que si la vitesse du vent ou des courants marins atteignent une valeur seuil.

2. La conversion d'énergie mécanique indirecte

La conversion d'énergie mécanique indirecte en énergie électrique est réalisée dans les centrales nucléaires, solaires et géothermiques. L'énergie mécanique est obtenue à partir d'énergie thermique, qui peut elle-même provenir de la conversion d'une autre énergie.

Certaines installations produisent de l'énergie électrique en convertissant une énergie primaire en énergie mécanique par l'intermédiaire de l'énergie thermique (ou chaleur).

Installation	Type d'énergie primaire exploité
Centrale nucléaire	Énergie nucléaire stockée dans l'uranium
Centrale solaire thermique	Énergie solaire
Centrale géothermique	Énergie thermique stockée dans le sol terrestre



PIÈGE

Il ne faut pas confondre les centrales solaires thermiques, où l'énergie lumineuse est transférée à un liquide caloporteur pour augmenter sa température, et les centrales photovoltaïques qui exploitent des panneaux qui produisent directement de l'énergie électrique.

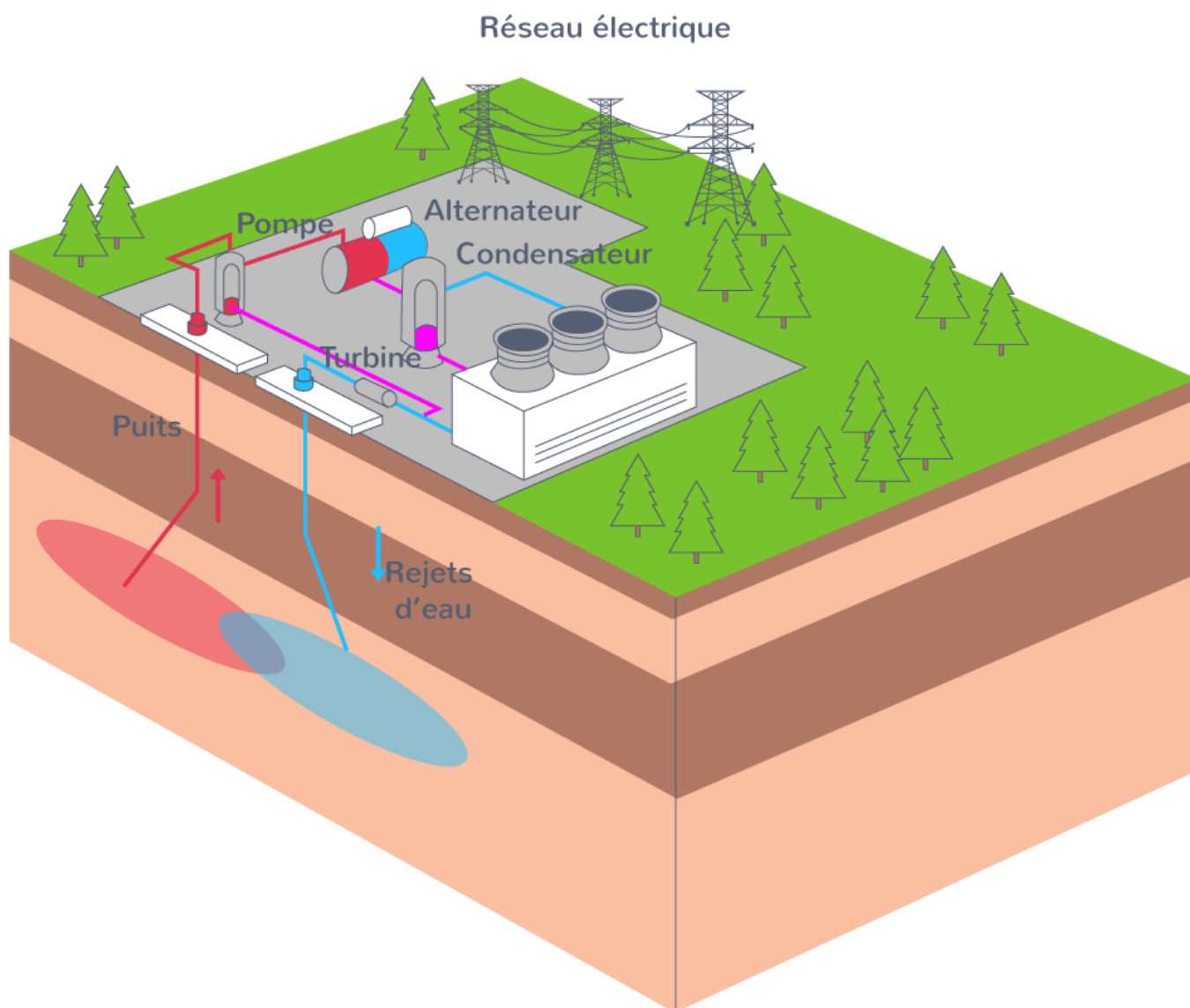
Dans ces centrales, la conversion d'énergie mécanique est indirecte :

- l'exploitation de l'énergie primaire produit de l'énergie thermique, qui est transmise à un fluide ;
- le fluide met en mouvement une turbine, ce qui produit de l'énergie mécanique ;
- l'énergie mécanique est transférée à un alternateur, qui la convertit en énergie électrique.

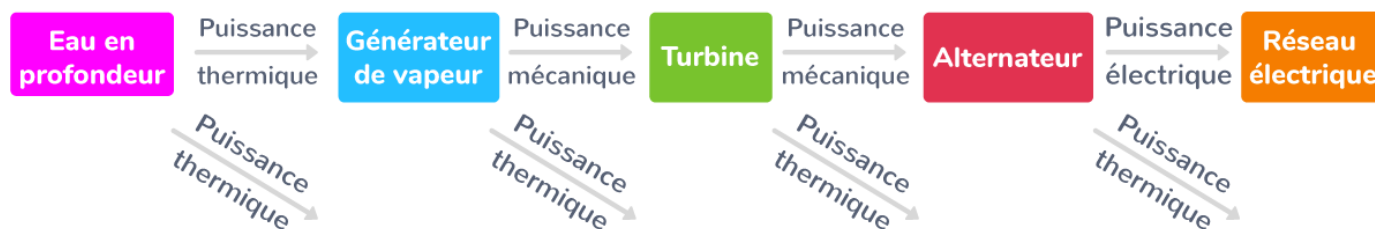
EXEMPLE

Une centrale géothermique récupère l'énergie thermique de l'eau en profondeur. Lorsque l'eau chaude arrive en surface, elle se transforme en vapeur et fait tourner une turbine. Celle-ci transmet de l'énergie mécanique à un alternateur qui produit alors de l'énergie électrique.

Schéma d'une centrale géothermique



Chaîne énergétique d'une centrale géothermique



Le rendement global de la conversion de la puissance nucléaire en puissance électrique est de l'ordre de 30 %. Pour produire 2,6 GW de puissance électrique, une centrale doit donc consommer une puissance

nucléaire de 8,7 GW :

$$\eta_{\text{centrale}} = \frac{P_{\text{électrique}}}{P_{\text{nucléaire}}}$$

D'où :

$$P_{\text{nucléaire}} = \frac{P_{\text{électrique}}}{\eta_{\text{centrale}}}$$

$$P_{\text{nucléaire}} = \frac{2,65}{0,30}$$

$$P_{\text{nucléaire}} = 8,7 \text{ GW}$$

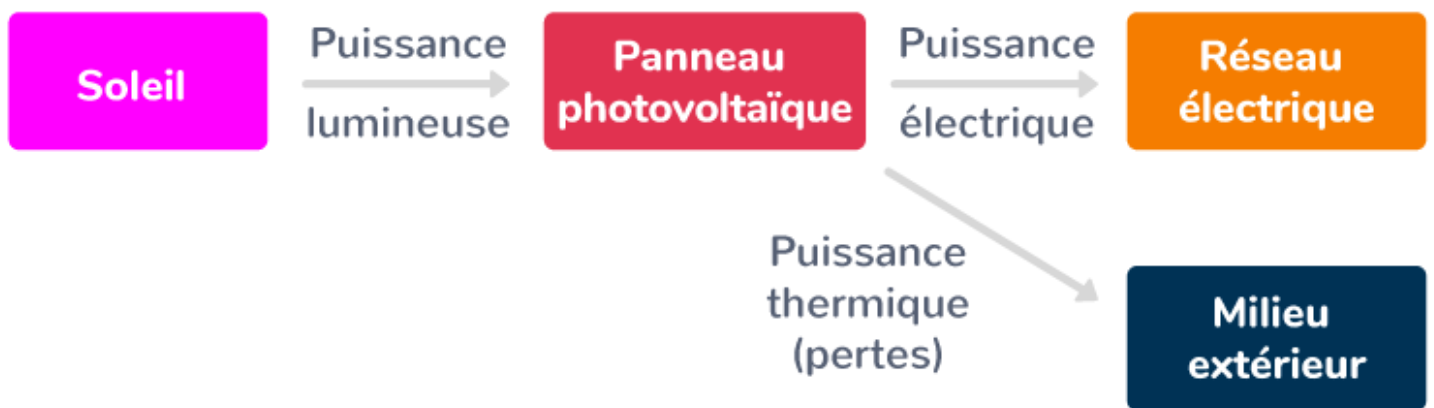
Ces centrales ont un rendement de l'ordre de 30 %, qui reste sensiblement inférieur à celui d'une centrale thermique.

Dans le cas des centrales nucléaires, des déchets radioactifs sont produits. Il faut les stocker pendant des millions d'années et les accidents ne sont pas inévitables.

C La conversion d'énergie radiative

La conversion d'énergie radiative dans les panneaux photovoltaïques produit de l'électricité à partir de l'énergie du rayonnement solaire.

Chaîne énergétique d'un capteur photovoltaïque



Le rendement des panneaux photovoltaïques est assez faible, de l'ordre de 20 %, et diminue d'environ 1 % par an. De plus, leur fabrication pose problème car elle nécessite des métaux rares comme l'indium et le gallium. Or, l'extraction de ces minerais s'avère généralement coûteuse, tant sur le plan financier qu'environnemental.

D La conversion d'énergie chimique

La conversion d'énergie chimique en énergie électrique repose sur le transfert d'électrons entre les réactifs d'une oxydoréduction. Les différents types de piles sont le siège de réactions d'oxydoréduction.

Les piles sont des dispositifs qui convertissent l'énergie chimique en énergie électrique :

Chaîne énergétique d'une pile



L'énergie chimique est libérée lorsque les réactifs stockés dans la pile échangent des électrons selon une réaction appelée oxydoréduction.

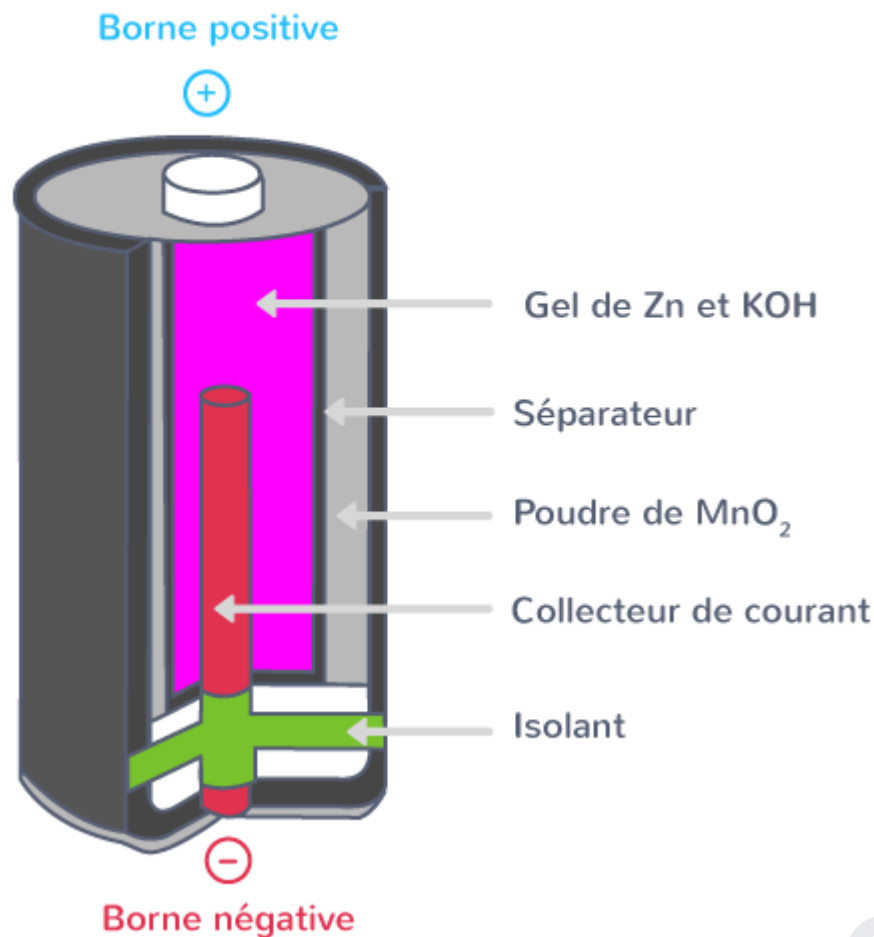


EXEMPLE

Dans une pile alcaline, les réactifs sont le zinc et le dioxyde de manganèse MnO_2 . Ils sont séparés par un corps isolant :



Schéma d'une pile alcaline



Lorsque la pile est insérée dans un circuit électrique, ses bornes positive et négative sont liées par des conducteurs électriques. Les réactifs peuvent alors réagir ensemble. Les réactions qui se déroulent sont alors :

- une libération d'électrons au niveau de la borne négative :

$$\text{Zn (s)} + 2 \text{HO}^- \text{ (aq)} \longrightarrow \text{ZnO (s)} + \text{H}_2\text{O (l)} + 2 \text{e}^-$$
- un gain d'électrons au niveau de la borne positive :

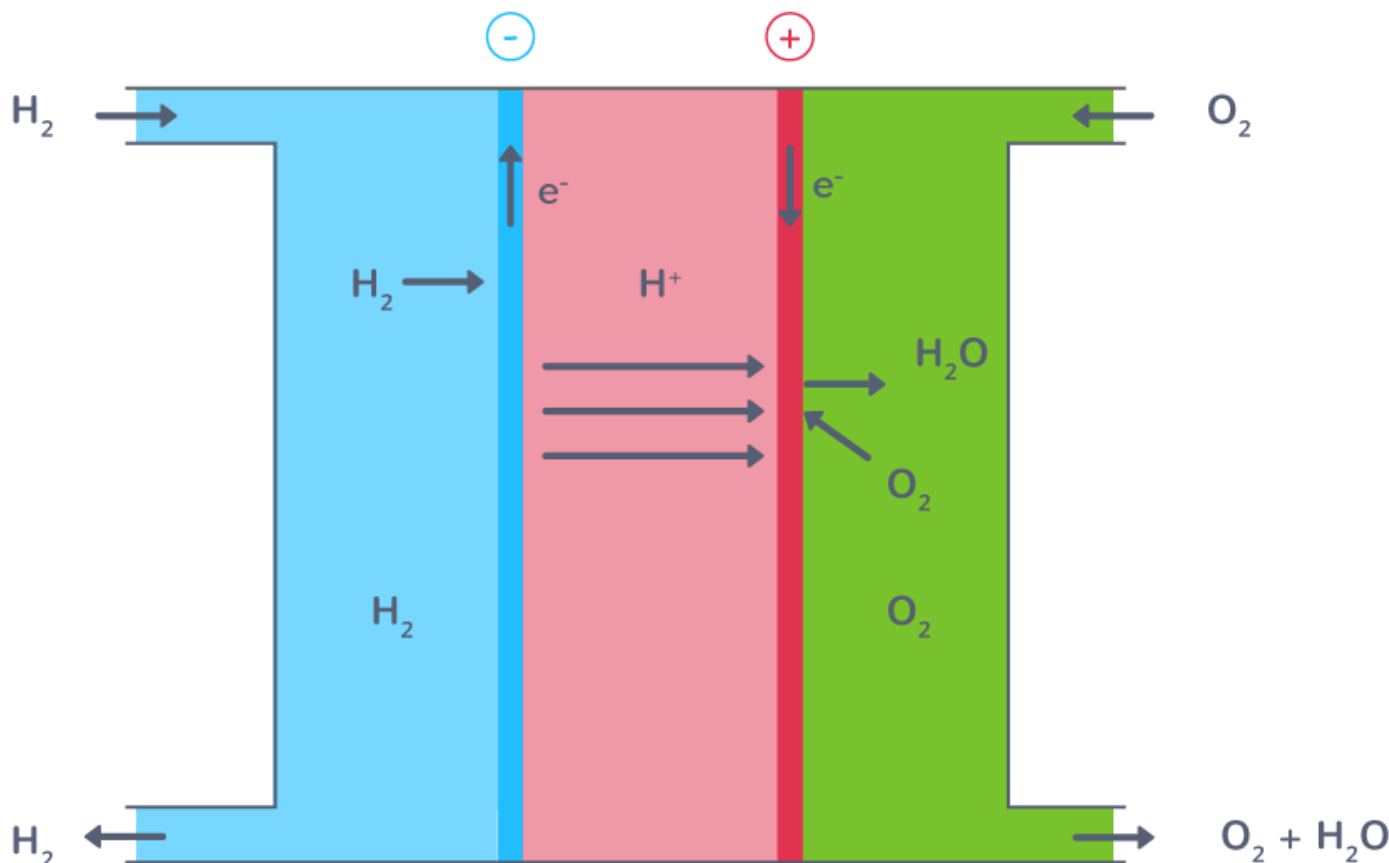
$$\text{MnO}_2 \text{ (s)} + \text{H}_2\text{O (l)} + \text{e}^- \longrightarrow \text{MnO(OH) (s)} + \text{HO}^- \text{ (aq)}$$
- La réaction totale est donc :

$$\text{Zn (s)} + 2 \text{MnO}_2 \text{ (s)} + \text{H}_2\text{O (l)} \longrightarrow 2 \text{MnO(OH) (s)} + \text{ZnO (s)}$$

Les piles à combustibles, ou piles à hydrogène, se distinguent par :

- leurs réactifs : le dihydrogène H_2 , stocké dans un réservoir, et le dioxygène O_2 , présent dans l'air ou dans un autre réservoir ;
- le bilan de la réaction d'oxydoréduction qui ne produit que de l'eau : $\text{H}_2 \text{ (g)} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \text{ (aq)} \longrightarrow \text{H}_2\text{O (l)}$.

Schéma d'une pile à combustible



Le rendement des piles est assez bon, jusqu'à 50 % pour les piles à combustible. Mais leur impact environnemental n'est pas neutre : leur fabrication nécessite des métaux rares (cobalt, lithium, etc.) et pour l'instant, leur recyclage pose question.

II Le stockage de l'énergie

Le stockage de l'énergie est nécessaire pour faire face aux variations de production et de consommation. L'énergie électrique ne pouvant pas être stockée, elle doit être convertie en une autre forme d'énergie avant d'être restituée pour son utilisation. Ainsi, l'énergie chimique peut être stockée dans des accumulateurs (ou batteries), l'énergie mécanique dans des stations de pompage – turbinage et l'énergie électromagnétique dans des super-capacités.

A Le stockage de l'énergie chimique

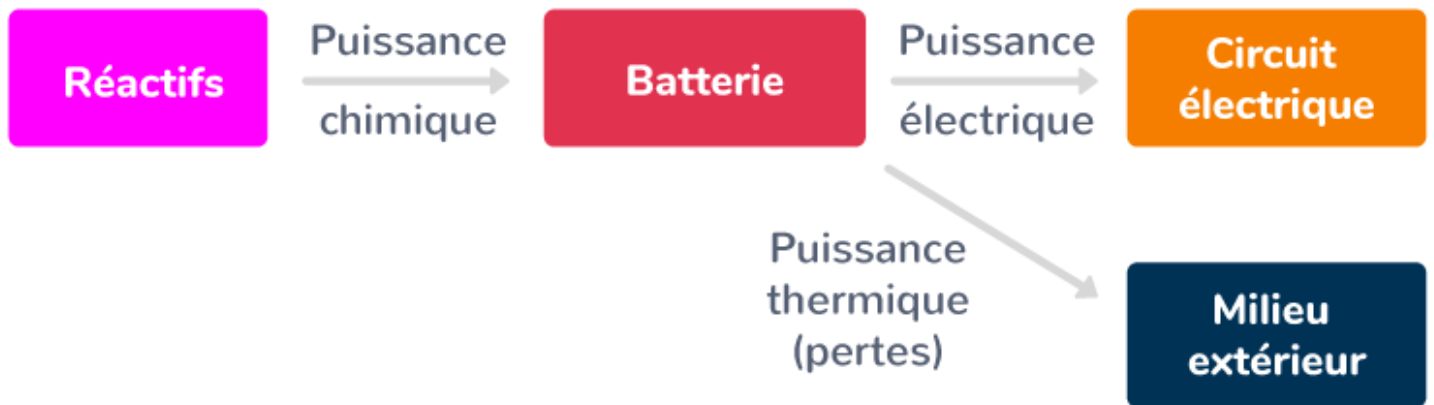
Les batteries, ou accumulateurs, et les piles à combustible stockent de l'énergie chimique qui peut ensuite être convertie en énergie électrique. Ces dispositifs fonctionnent comme des piles mais ont la particularité de pouvoir être rechargés.

Les batteries, ou accumulateurs, ont deux modes d'utilisation :

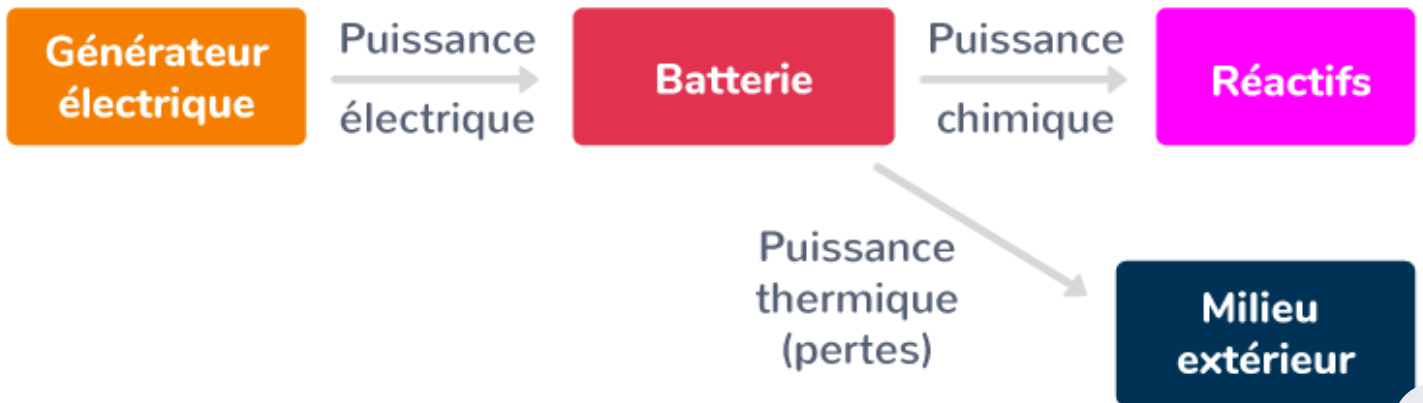
- la décharge, pendant laquelle ils se comportent comme des piles et convertissent l'énergie chimique en énergie électrique, les réactifs étant consommés ;
- la charge, pendant laquelle un générateur leur fournit de l'énergie électrique, qu'ils convertissent en énergie chimique, les réactifs étant alors régénérés.

Chaînes énergétiques d'une batterie

Décharge



Charge



Dans ce cas, la réaction d'oxydoréduction exploitée est réversible.

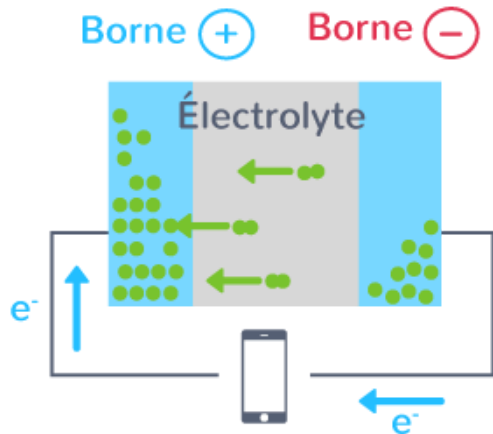
EXEMPLE

Les batteries équipant les Smartphones actuels sont des batteries Li-ion (lithium-ion) qui exploitent une réaction d'oxydoréduction réversible :

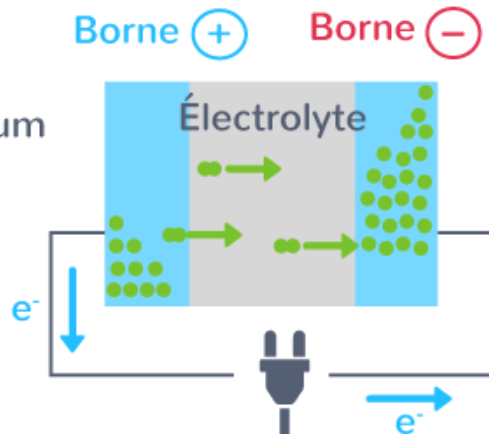
Chaînes énergétiques d'une batterie



Batterie en décharge



Batterie en charge



L'utilisation de dihydrogène couplée à une pile à combustible, est aussi un bon moyen de stocker l'énergie chimique car cette pile peut fonctionner dans les deux sens et le dihydrogène joue le rôle de réservoir d'énergie.

EXEMPLE

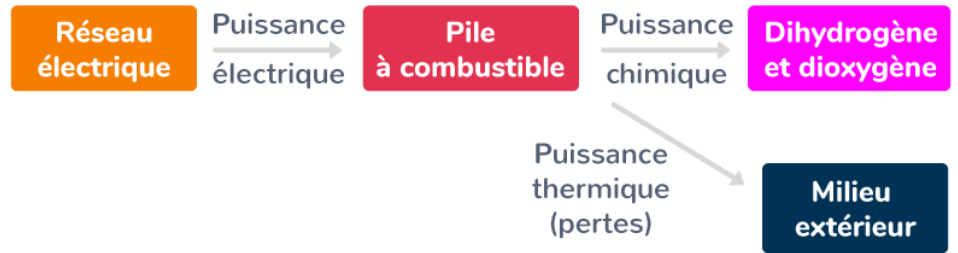
Fonctionnement en récepteur électrique

Réaction chimique



Électrolyse de l'eau

Chaîne énergétique



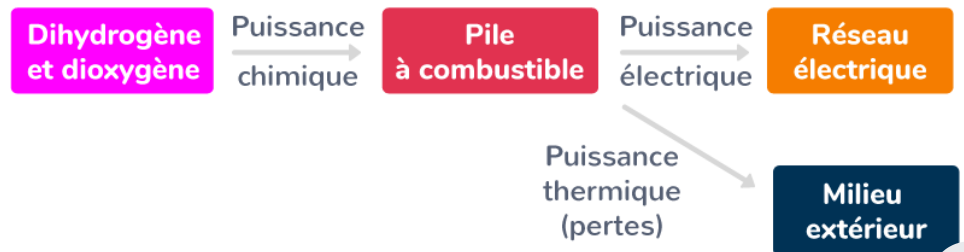
Fonctionnement en générateur électrique

Réaction chimique



Synthèse de l'eau

Chaîne énergétique



B Le stockage de l'énergie mécanique

Les stations de pompage-turbinage sont un type particulier d'installations hydroélectriques permettant de stocker l'énergie mécanique.

Une station de pompage-turbinage est composée de deux bassins situés à des altitudes différentes. En pompant l'eau du bassin inférieur vers le bassin supérieur lorsque la demande électrique est faible, elle permet de stocker de l'énergie mécanique. Lorsque la demande électrique augmente, elle restitue de l'énergie électrique sur le réseau en turbinant l'eau du bassin supérieur.

EXEMPLE

Phase de pompage - Stockage de l'énergie mécanique



Phase de turbinage - Restitution de l'énergie électrique



C Le stockage de l'énergie électromagnétique

En accumulant des charges électriques, les super-capacités permettent de stocker l'énergie électromagnétique et de la convertir ensuite en énergie électrique.

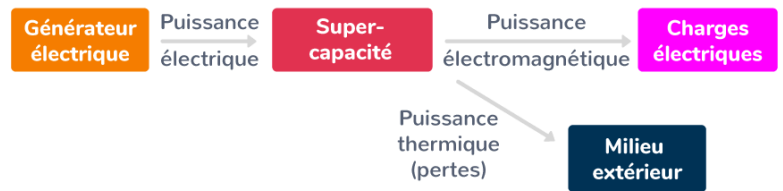
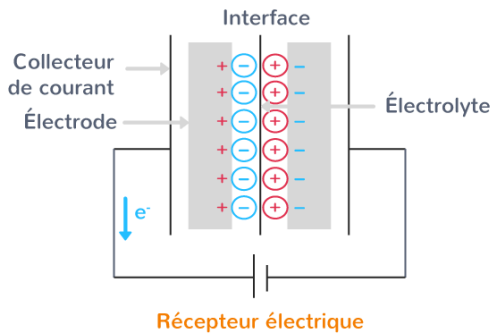
Le principe des super-capacités repose sur l'accumulation de charges électriques à l'interface entre une solution ionique (électrolyte) et deux électrodes, séparées par une interface qui joue le rôle d'isolant.

- Pour stocker l'énergie électromagnétique, on impose une tension électrique entre les deux électrodes, ce qui provoque l'accumulation des charges électriques.
- Pour restituer l'énergie électrique, on relie la super-capacité à un circuit ou à un réseau électrique, ce qui provoque le déplacement des charges électriques. À la différence des batteries, il n'y a donc pas de réaction d'oxydoréduction.

EXEMPLE

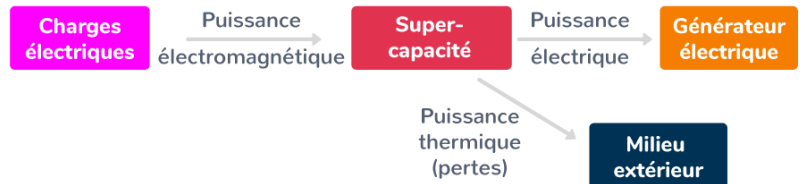
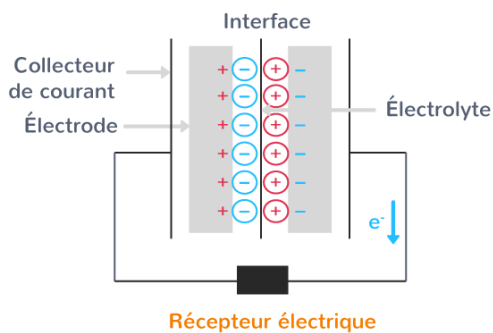
Fonctionnement en récepteur électrique

Accumulation des charges électriques



Fonctionnement en générateur électrique

Circulation des charges électriques



Caractéristiques comparées des différents types de stockage de l'énergie

Technologie	Batterie Li-ion	Pile à combustible	Station de pompage-turbinage	Super-capacité
Rendement (%)	75-95	~ 50	70-85	98 %
Capacité (ou densité d'énergie)	150 Wh/kg	5 000 W/m ²	Variable, ~ 500 MW par station	10 Wh/kg
Durée de vie	500-1 000 cycles	5-10 ans	> 40 ans	Une dizaine d'années Plus d'un million de cycles

Coût (€/kWh)	200-1 200	< 500	70-150	10 000- 20 000
Impact écologique	Utilisation de métaux rares Problème du recyclage	Risque explosif du dihydrogène	Dégradation d'un site naturel	