

Les atouts de l'électricité et ses enjeux dans le développement durable

Introduction :

Depuis les premiers temps de la maîtrise de l'électricité jusqu'à nos jours, celle-ci a pris de plus en plus d'importance dans notre quotidien, au point d'en devenir un élément incontournable.

À l'heure où les enjeux environnementaux influent grandement sur les choix énergétiques mondiaux, nous pouvons nous demander quels sont les atouts de l'électricité dans le processus de transition énergétique qui s'amorce.

Pour répondre à cette problématique, nous aborderons dans un premier temps la production d'énergie électrique sans combustion, puis nous verrons les enjeux du stockage de cette forme d'énergie.

1 | L'être humain déclare sa flamme à l'énergie électrique !

Le réchauffement climatique, la fin annoncée du pétrole, la dégradation de la qualité de l'air dans les agglomérations qui deviennent toujours plus grandes... tous ces éléments font que l'être humain, pressé par l'urgence de la situation, n'a désormais plus le choix de se tourner davantage vers une production d'énergie non issue d'une combustion.

→ **L'énergie électrique sans combustion** représente un enjeu essentiel pour la préservation de notre environnement.

Voyons donc les différents moyens de produire de l'électricité sans combustion.

a. Production d'électricité à partir de l'énergie mécanique

La production d'énergie électrique à partir de l'**énergie mécanique** est bien connue depuis le perfectionnement de l'**alternateur**.



L'énergie mécanique est la somme de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle de pesanteur.

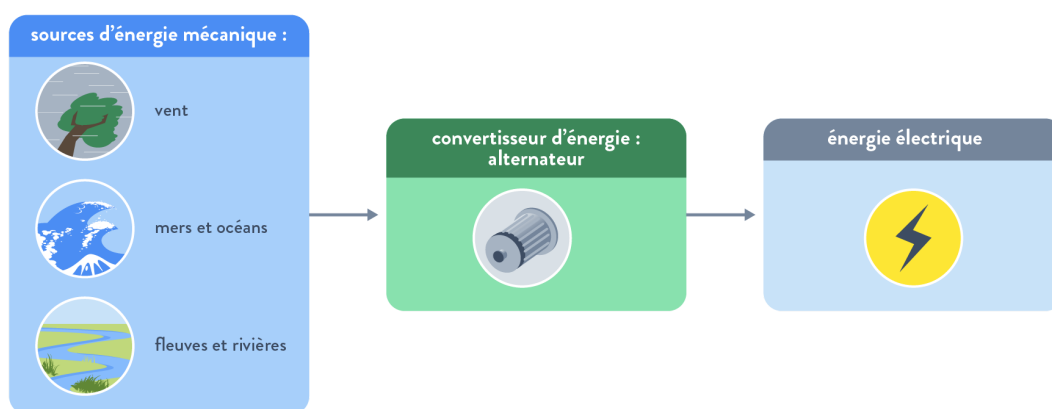
L'énergie mécanique (qui provient donc d'un mouvement) est transformée en énergie électrique.

Dans le cas de l'alternateur, c'est l'aimant en mouvement qui produit un champ magnétique. Ce champ magnétique va lui-même induire un courant électrique dans le cuivre de la bobine.

L'énergie mécanique peut être directement liée à la source d'énergie utilisée, on parle alors de **conversion directe d'énergie mécanique**.

L'énergie mécanique directement produite est alors transformée en énergie électrique par un alternateur.

Chaîne de transformation énergétique directe à partir d'énergie mécanique



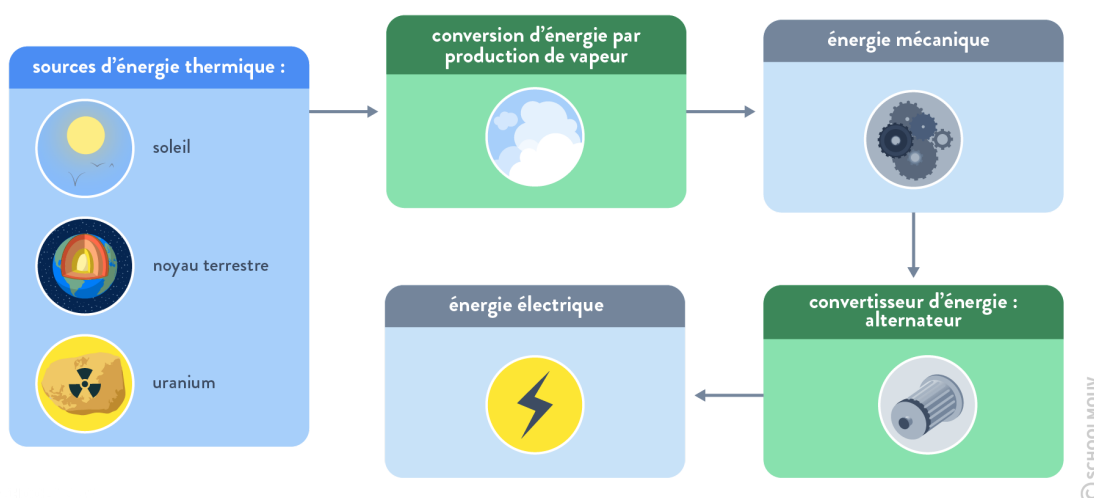
- Dans le cas du vent, le nom donné au système permettant la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique est l'**éolienne** (énergie cinétique des vents).
- Dans le cas des mers et océans, on parle de l'**hydrolienne** (énergie cinétique des courants marins).
- Dans le cas des fleuves et rivières, il s'agit du **barrage hydroélectrique** (énergie cinétique de l'eau).



Les mécanismes de l'hydrolienne et du barrage hydroélectrique sont différents : le barrage hydroélectrique en montagne ou sur des fleuves utilise des turbines, lesquelles fonctionnent hors de l'eau grâce à des conduites forcées ; l'hydrolienne, elle, se trouve immergée et le plus souvent en flux libre.

L'énergie mécanique peut aussi provenir d'une conversion d'énergie thermique : on parle alors de **conversion indirecte d'énergie mécanique**, puisque l'énergie thermique est d'abord transformée en énergie mécanique, grâce à la production de vapeur d'eau, avant d'être convertie en énergie électrique.

Chaîne de transformation énergétique indirecte à partir d'énergie thermique

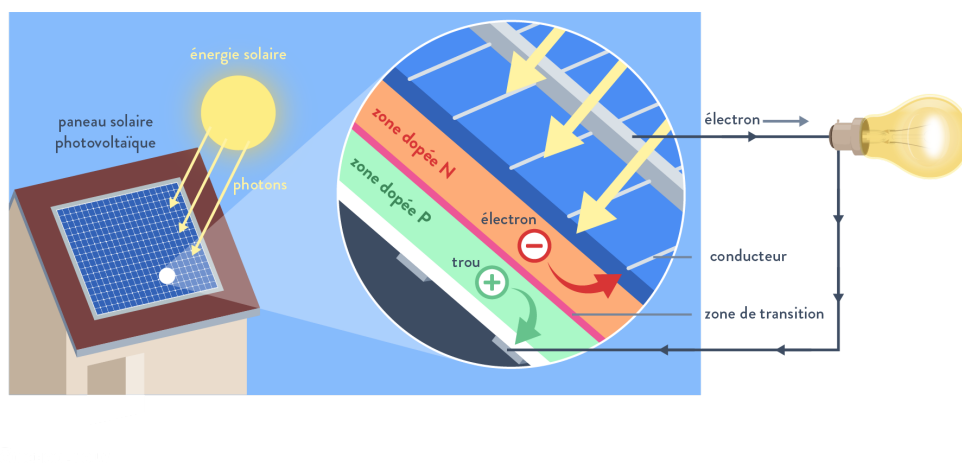


→ Ce type de transformation énergétique se retrouve dans les **centrales solaires thermiques** (chaleur solaire), dans des **centrales géothermiques** (chaleur de la Terre) et dans les **centrales nucléaires** (chaleur produite par la fission nucléaire de l'uranium).

b. Production d'électricité à partir du rayonnement électromagnétique solaire

Le soleil est une source d'énergie inépuisable (à l'échelle humaine). Depuis plusieurs années, grâce aux **progrès réalisés avec les semi-conducteurs**, l'être humain perfectionne la captation de cette **énergie radiative** à l'aide de **panneaux photovoltaïques** installés sur les habitations individuelles ou collectives, sur les bâtiments industriels, ou encore regroupés en « ferme solaire ».

Panneau solaire et effet photovoltaïque



Le rendement des panneaux photovoltaïques (c'est-à-dire le rapport de l'énergie électrique produite sur l'énergie reçue), inférieur à 20 %, reste faible, mais l'énergie radiative solaire

arrivant en continu sur la Terre, il est, en théorie, possible de subvenir très largement aux besoins mondiaux en électricité. En effet, la consommation mondiale d'énergie est d'environ 10^{14} GWh/an. Or, l'énergie solaire reçue est d'environ 10^{18} GWh/an, soit 10 000 fois plus.

Pour parvenir à ce résultat, il faudrait savoir stocker l'électricité de manière efficace pour la rendre utilisable quand c'est nécessaire, notamment durant les pics de consommation.

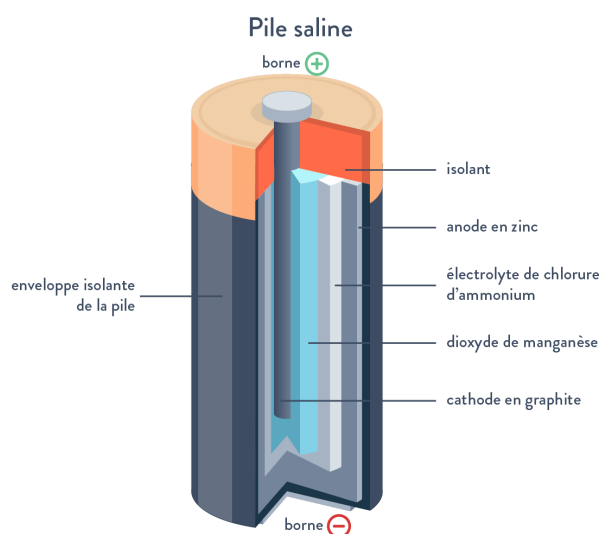
c. Production d'électricité à partir de la chimie (oxydoréduction)

Un moyen de répondre à cette problématique de stockage est la **pile (ou l'accumulateur)**.



Pile électrochimique :

Une pile ou un accumulateur est un **dispositif électrochimique**, c'est-à-dire qu'une transformation chimique (oxydoréduction) est responsable de la « production » d'électrons et donc d'un courant électrique.

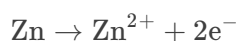


© SCHOOLMOUV

Le principe de fonctionnement d'une pile saline repose donc sur une double réaction : l'**oxydoréduction**.

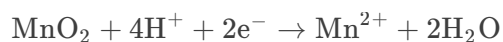
Il s'agit de deux transformations concomitantes qui se produisent lorsque les deux bornes de la pile sont reliées à un récepteur.

- Au niveau de la borne négative, appelée **anode**, le zinc métallique (Zn) va subir une transformation pour devenir un ion zinc (Zn^{2+}), libérant ainsi deux électrons :



→ On dit que le zinc subit une **oxydation**.

- Au niveau de la borne positive, appelée **cathode**, le dioxyde de manganèse (MnO_2) va capter deux électrons pour devenir un ion manganèse (Mn^{2+}).



→ On dit que le dioxyde de manganèse subit une **réduction**.



Le caractère acide du chlorure d'ammonium permet l'apport des ions H^+ nécessaires à la réaction de réduction.

Ce même principe se retrouve pour les piles alcalines, avec des matériaux différents. Une pile est considérée comme « vide » lorsque l'un des deux réactifs a été totalement transformé.

Penchons-nous à présent sur le cas de la **pile à hydrogène**.

La pile à hydrogène est une **pile à combustible**. Le nom de pile à combustible tient au fait que le réducteur de la réaction d'oxydoréduction est un combustible (dihydrogène), mais il s'agit bien ici d'un générateur électrochimique sans combustion. Ce type de pile possède de nombreux avantages :

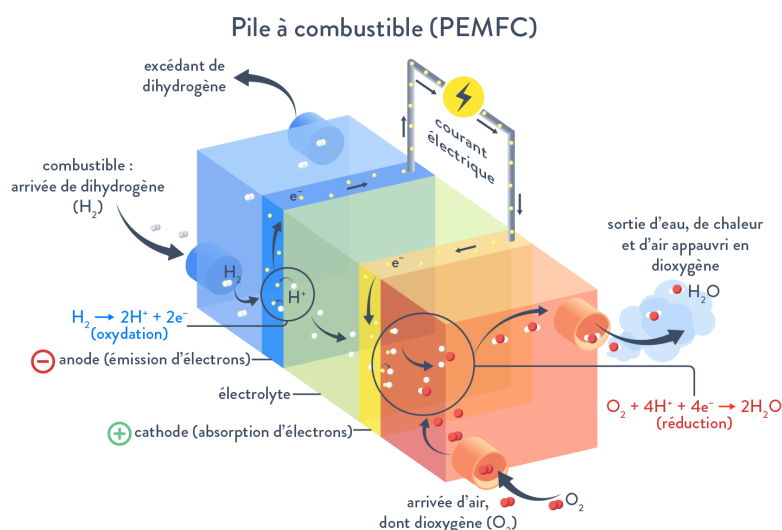
- l'eau y est le seul « déchet » de la production d'électricité ;
- l'utilisation de l'hydrogène et de l'oxygène comme éléments chimiques permettant d'alimenter cette pile est facilitée par le fait que ces deux éléments sont parmi les plus présents sur la Terre ;
- son fonctionnement est silencieux et la pile a une grande longévité.

...mais aussi des inconvénients :

- le dihydrogène nécessaire à son fonctionnement doit être synthétisé, car la molécule de dihydrogène n'existe pas à l'état natif sur la Terre. Cette synthèse coûte cher et rejette du dioxyde de carbone, faisant baisser le rendement global (environ 30 %) ;
- le caractère explosif du dihydrogène n'est pas non plus sans danger ;
- les investissements nécessaires restent conséquents, car cette technologie n'est pas encore très répandue.

Dans le domaine de la mobilité, des constructeurs automobiles se sont lancée dans l'aventure mais les coûts élevés et l'absence de réseau de distribution de dihydrogène freine considérablement le développement dans ce domaine.

Les deux autres principaux domaines d'utilisation de ces piles sont l'industrie aérienne pour l'alimentation électrique à bord des avions (réduction de la consommation de kérosène) et l'aérospatiale pour une alimentation autonome des satellites.



© SCHOOLMOUV

Quand on relie les deux bornes de la pile à combustible à un récepteur, deux transformations se produisent :

- au niveau de l'anode, borne négative de la pile à combustible, le dihydrogène (H_2) se transforme en ion H^+ (proton) et libère deux électrons. Les électrons vont circuler, à l'extérieur de la pile, dans le récepteur, et permettre son fonctionnement. Dans le même temps, les protons vont traverser l'électrolyte et arriver à la cathode ;
- au niveau de la cathode, borne positive de la pile, le dioxygène (O_2), les protons H^+ et les électrons vont « s'assembler » pour former de l'eau (H_2O) qui sera ensuite évacuée de la pile.

d. Bilan des modes de production d'électricité sans combustion

a Bilan comparé des rendements suivant le mode de production :

Le rendement est le rapport de l'énergie produite (énergie électrique en sortie) sur l'énergie consommée (énergie en entrée) par le générateur.

	Production d'électricité avec combustion			Production d'électricité sans combustion				
	pétrole	gaz	charbon	nucléaire	hydro-électrique	éolien	photo-voltaïque	géo-thermique
Rendement	38 %	5 %	38 %	33 %	80 %	50 %	15 %	80 %

b Bilan de l'impact environnemental :



La production d'électricité à partir de l'énergie mécanique, de rayonnement électromagnétique ou de la réaction chimique d'oxyréduction est certes sans combustion, et donc sans rejet de gaz à effet de serre (ou presque), mais ces méthodes ne sont malheureusement pas toujours aussi vertueuses en termes écologiques que l'on peut l'imaginer.

Des progrès dans ces domaines sont encore nécessaires.

En effet, l'hydroélectricité est conditionnée à la construction de barrages à l'**impact environnemental** non négligeable (modification de milieux et d'écosystèmes). Quant à l'électricité éolienne, très dépendante des conditions aérologiques, elle demande des ressources en espaces, même si son effet en termes de biodiversité et d'écologie est plus relatif.

Pour ce qui est du photovoltaïque, du nucléaire et des piles électrochimiques, les ressources (uranium, silicium, plomb, lithium ...) sont limitées et leur exploitation, en plus d'être une catastrophe écologique, est souvent aussi synonyme de problèmes humanitaires (travail des enfants, corruption, etc.). De plus, le retraitement des déchets reste pour le moment un défi à relever et donc une menace environnementale importante.

Dans le cas de la pile à combustible, l'idée de ne rejeter que de l'eau semble séduisante, mais il faut également prendre en compte la production du dihydrogène, non présent à l'état natif sur Terre. Cette production de dihydrogène est très énergivore et risquée (risque explosif).

Finalement, quelle que soit la méthode de production d'électricité retenue, l'impact environnemental reste présent dans de plus ou moins grandes proportions.

Toutefois, en perfectionnant le stockage de l'énergie électrique, comme nous avons commencé à l'évoquer concernant l'utilisation des piles, il deviendrait possible d'optimiser son utilisation et donc de réduire les nuisances environnementales.

2 | L'ère du stockage doit arriver

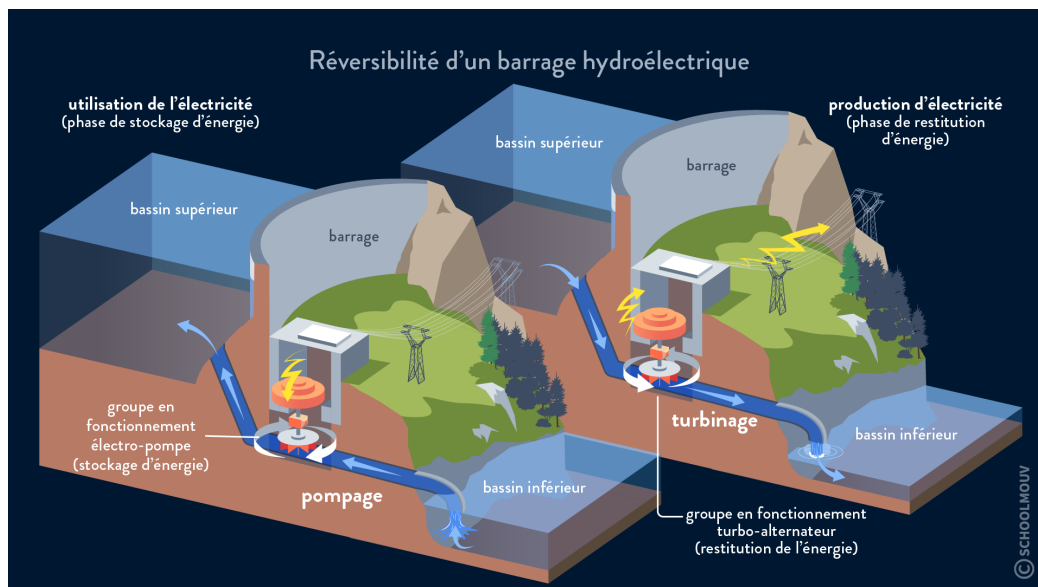
Pour développer l'utilisation de l'électricité produite sans combustion, l'être humain doit apprendre à **stocker l'énergie nécessaire pour produire de l'électricité**, ou à transformer l'énergie électrique en une autre forme d'énergie qui, elle, serait stockable. Plusieurs techniques sont d'ores et déjà envisageables.

a. L'énergie potentielle de pesanteur



Cette méthode s'applique dans le cadre des retenues d'eau et consiste à **transformer l'énergie électrique en énergie potentielle de pesanteur** (liée à la **gravitation**).

En d'autres termes, il s'agit d'utiliser des pompes électriques pour faire monter de l'eau dans un barrage d'altitude. L'eau ainsi élevée, gagne en énergie potentielle de pesanteur qui pourra ensuite être de nouveau transformée en énergie électrique.



Avec cette technique, pour alimenter les pompes électriques, on utilise l'énergie électrique produite par des centrales dont le fonctionnement est nécessairement continu (centrale nucléaire ou éolienne par exemple) mais non utilisée par les populations. En effet, l'utilisation de l'électricité est variable suivant la période de la journée, mais aussi suivant les saisons.



Attention

Ce type de stockage ne peut être envisagé que dans des zones présentant des variations de relief importantes, donc en montagne le plus souvent.

Si le rendement est bon (entre 70 % et 85 %) et la méthode fiable et parfaitement maîtrisée, son impact environnemental en revanche est assez important. En effet, il faut construire des barrages d'altitude mais également développer un réseau de transport d'électricité, car les sources d'énergie électrique présentant un surplus de production ne se situent pas dans la même zone géographique.



Astuce

À noter :

La France possède moins d'une dizaine de sites utilisant cette méthode, mais des études sont en cours pour l'adapter aux bords de mer présentant de fortes marées.



L'énergie électromagnétique



À retenir

Cette technique consiste à stocker temporairement l'électricité grâce à un **condensateur**.



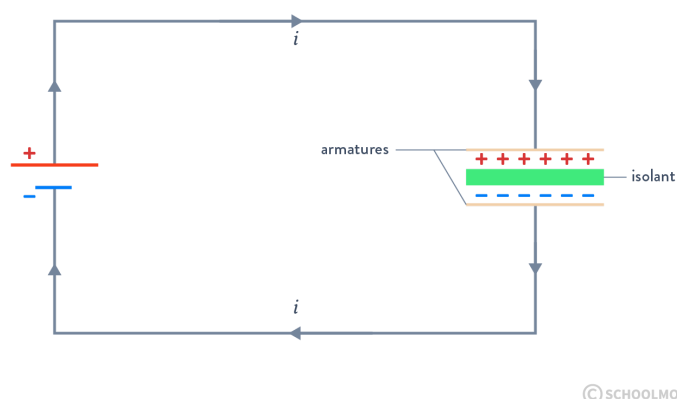
Définition

Condensateur :

Un condensateur est un dispositif de stockage constitué de deux plaques de matériaux conducteurs, appelées armatures, séparées par un isolant électrique.

Lorsque l'on applique une tension entre ses armatures, le condensateur se « charge » : l'une des armatures accumule des électrons et se charge négativement, pendant que l'autre libère des électrons et se charge positivement.

Condensateur en phase de charge



Lorsque l'on isole le condensateur de son circuit de charge, les deux armatures étant séparées par un isolant électrique, les charges ne peuvent passer de l'une à l'autre.

→ Il y a donc bien stockage d'énergie électrique, sous forme d'une **différence de potentiel**.

Pour restituer cette énergie électrique, il faut relier le condensateur à un récepteur électrique. Les électrons accumulés sur l'armature négative vont alors circuler à l'extérieur du condensateur pour finalement rejoindre l'armature positive : c'est la **décharge** du condensateur.

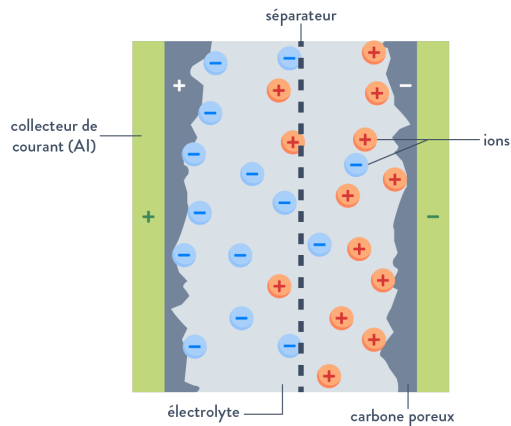
Un condensateur ne peut cependant pas accumuler une très grande quantité d'énergie électrique.

Pour remédier à ce problème, les scientifiques sont en train de développer et de perfectionner des **supercondensateurs**.

Pour faire simple, un super condensateur ressemble à deux condensateurs associés en série (la réalité est plus complexe).

Pour augmenter la performance, on a augmenté la surface de stockage des charges électriques grâce à l'utilisation d'un **matériau microporeux** (nombreuses aspérités qui augmentent considérablement la surface). L'isolant a été remplacé par un **électrolyte, liquide constitué d'ions**. Ce sont ces ions qui compensent la charge des plaques. De chaque côté du séparateur, on a l'équivalent d'un condensateur. Le séparateur est un matériau microporeux laissant passer les électrons mais empêchant un court-circuit à l'intérieur du supercondensateur.

Supercondensateur



© SCHOOLMOUV

Les avantages de cette technique sont :

- l'immédiateté de la **disponibilité de l'énergie électrique**, car il n'y a aucune transformation à réaliser ;
- le très **grand nombre de cycles de charge/décharge possibles** (plus d'un million) ;
- la très grande **rapidité de la charge** (quelques secondes) ;
- le **rendement supérieur à 95 %**.

Les inconvénients de cette même technique sont :

- la **faible quantité d'énergie électrique stockée** (difficilement utilisable pour stocker le surplus de grande centrales ou d'éoliennes) ;
- la **décharge très rapide**.

Les progrès sur la quantité d'énergie stockée sont au centre des préoccupations des chercheurs et il devient d'ores et déjà possible de faire fonctionner des bus de ville grâce à cette technique (c'est le cas en Chine par exemple) car, la charge étant très rapide, les supercondensateurs peuvent être rechargés à chaque arrêt.



L'énergie chimique

Un des moyens connus et utilisés depuis longtemps pour le stockage de l'énergie chimique est l'accumulateur.

Plusieurs technologies existent avec notamment les **accumulateurs au plomb** (batterie de voiture thermique) et les **accumulateurs lithium-ions** (véhicules électriques).



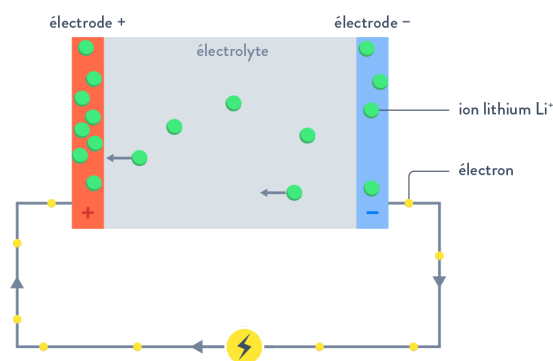
L'accumulateur fonctionne sur le même principe que la pile : grâce à une réaction d'oxyréduction. Mais dans le cas de l'accumulateur, il est possible, moyennant un apport

d'énergie sous forme d'électricité, de régénérer les réactifs par inversion forcée des transformations chimiques.

On parle d'accumulateur car ce dispositif est capable d'emmagasiner de l'énergie électrique (recharge) pour la restituer plus tard.

Voici le principe de fonctionnement d'un accumulateur lithium-ions :

Accumulateur en phase de décharge

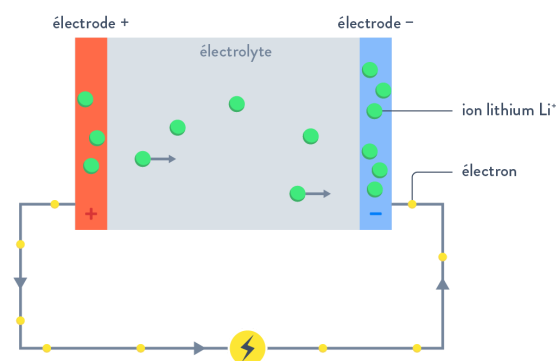


© SCHOOLMOUV

Du côté de la borne négative, des atomes de lithium cèdent un électron et se transforment en ions lithium Li^+ .

Ces ions lithium vont ensuite se déplacer à travers l'électrolyte pour aller capter un électron du côté de la borne positive et se transformer en atome de lithium.

Accumulateur en phase de charge



© SCHOOLMOUV

→ Moyennant un apport d'énergie électrique, il est possible d'inverser la transformation chimique et de reformer les atomes de lithium du côté de la borne négative.

Il s'agit donc bien d'un moyen de stockage de l'énergie électrique.

Une batterie lithium-ions permet de stocker 3 à 4 fois plus d'énergie électrique par unité de masse que les batteries au plomb. Elle se recharge aussi beaucoup plus vite et le nombre de cycles charges-décharges supportés sans perte d'efficacité est supérieur à mille.

Les inconvénients de l'accumulateur restent sa durée de charge relativement longue pour éviter tout échauffement intempestif, mais aussi l'utilisation du lithium, dont la production et le retraitement après la vie de l'accumulateur sont nuisibles pour l'environnement.

Sous la pression de nouvelles normes environnementales dans l'automobile, de nombreuses recherches sont en cours pour réduire l'impact négatif de ces accumulateurs, avec notamment des **électrolytes solides sans lithium**.

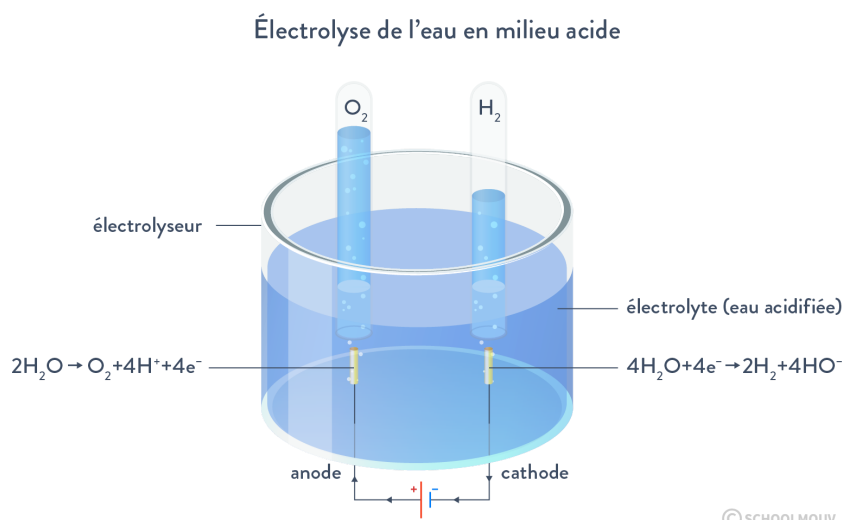


Une autre technique de stockage par voie chimique qui se développe est la **filière hydrogène**. Dans ce cas, le surplus d'énergie électrique est transformé en dihydrogène qui, lui, sera ensuite retransformé en énergie électrique.

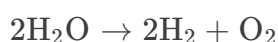
Le principe est le suivant : l'excès de l'énergie électrique produit est utilisée par un **électrolyseur**.



Une électrolyse est un processus durant lequel il y a conversion d'énergie électrique en énergie chimique. Ce processus se réalise dans un contenant, l'électrolyseur, contenant une solution aqueuse acidifiée, l'électrolyte.



Un courant continu passe à travers deux électrodes immergées dans un électrolyte liquide (ou solide) pour décomposer l'eau en dioxygène et en dihydrogène suivant l'équation :



Le dihydrogène ainsi produit est ensuite stocké sous forme gazeuse, liquide ou solide. Durant les périodes de fortes consommations, il existe différents moyens pour produire de l'électricité à partir du dihydrogène stocké : l'un d'eux consiste à alimenter une pile à combustible qui utilise le dihydrogène, comme vu précédemment, d'autres passent par des méthodes avec combustion après méthanisation ou par voie directe.

d. Bilan des modes de stockage d'électricité

Technologie	Autonomie	Rendement	Puissance	Densité d'énergie	Durée de vie	M d'ex
Énergie potentielle	quelques jours	65-80 %	0,1 à 1 GWh	dépend hauteur de chute	40 ans et plus	
Supercondensateur	quelques minutes	90-95 %	10 k à 5 MWh	5 à 10 kWh/kg	10 k à 500 k cycles	
Accumulateur	10 min-10 h	70-80 %	10 k à 1 000 MWh	20 à 120 kWh/kg	500 à 4 k cycles	
Hydrogène	1 h à quelques jours	30-50 %	10 k à 10 GWh	300 à 600 Wh/kg	5 à 10 ans	

Conclusion :

Les différentes techniques de productions d'électricité sans combustion sont ainsi amenées à se développer, compte tenu des préoccupations liées au réchauffement climatique et aux normes toujours plus restrictives en matière de production de gaz à effet de serre.

Pour faire de ces techniques une alternative aux modes de production actuels, majoritairement par combustion à l'échelle mondiale, il va falloir d'une part perfectionner et généraliser le stockage de l'énergie électrique. Pour éviter de nouveaux déboires environnementaux, l'être humain devra cette fois appréhender le problème de manière globale, c'est-à-dire que le choix des techniques de stockage devra prendre en compte l'ensemble des paramètres (matière première, énergie liée à la construction, impact environnemental, recyclabilité...).

Même si de toute évidence l'énergie la plus propre est celle que l'on évite de consommer, la recherche scientifique a les capacités de mettre au point des méthodes de production et de stockage éco-responsables pour permettre à l'ensemble de l'humanité de bénéficier

d'une ressource d'énergie électrique suffisante. Mais la volonté politique à l'échelle de la planète sera-t-elle au rendez-vous ?