

Le stockage de l'électricité

par SirEnergies

Table des matières

1. Quelles sont les grandes filières technologiques de stockage d'électricité ?
 1. Les technologies de stockage électrochimique
 2. Les technologies de stockage mécanique
2. Quelles sont les dernières innovations en matière de stockage de l'électricité ?
 1. Les batteries à gravité
 2. Le stockage de l'électricité sous forme de chaleur
 3. Le stockage de l'électricité sous forme de froid

Le stockage de l'électricité est un des enjeux de la transition énergétique.

Remplacer les énergies fossiles passe par l'électrification des usages. Mais, pour atteindre **la neutralité carbone en 2050**, encore faut-il que l'électricité soit d'origine décarbonée...

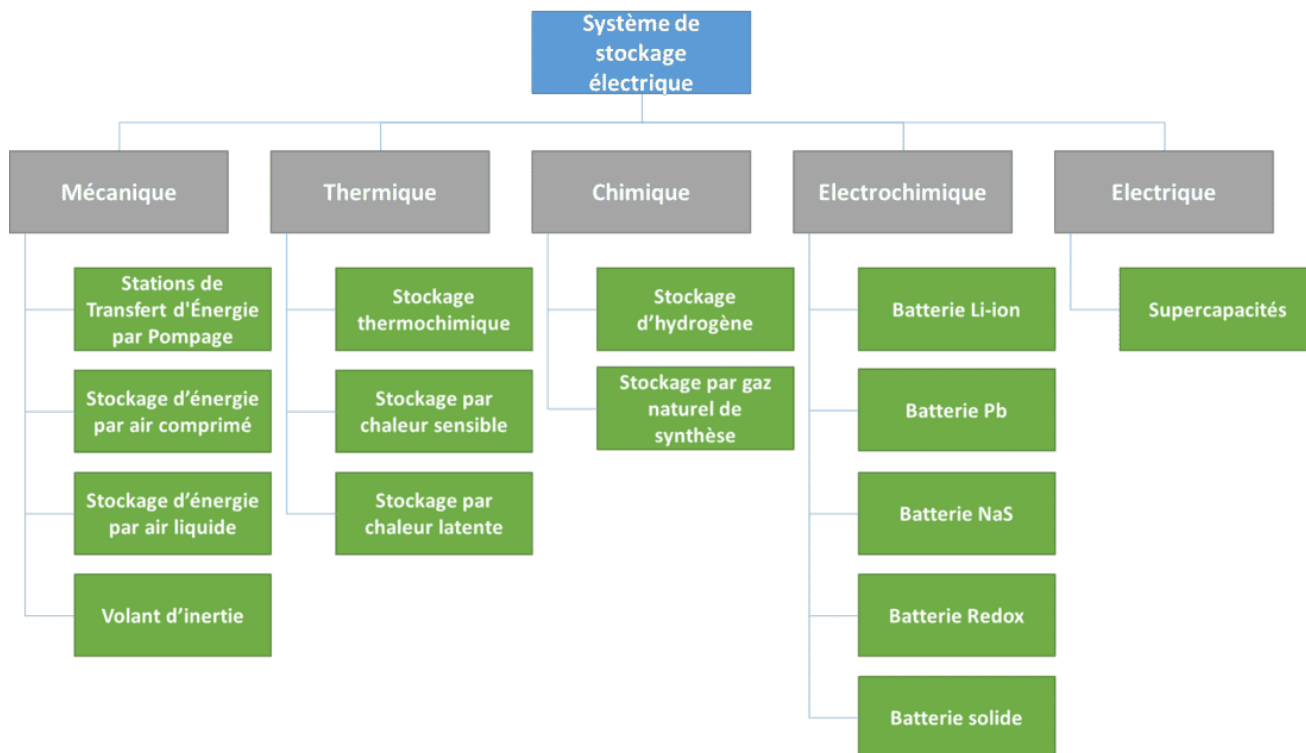
Tous les espoirs se tournent vers les énergies renouvelables. Or, elles ont un point faible. Dépendant des conditions naturelles, leur production est **intermittente**.

Dans son rapport publié en juin 2023 sur les perspectives futures 2035, RTE pointe du doigt le fait que le système électrique sera inéluctablement confronté à des « *périodes d'abondance et de rareté de la production par rapport à la consommation* ».

La solution ? Stocker l'électricité pour lisser la production annuelle, concilier la demande et l'offre et maintenir l'équilibre du réseau électrique. Les innovations technologiques pour le stockage de l'énergie ne manquent pas. Tour d'horizon.

Quelles sont les grandes filières technologiques de stockage d'électricité ?

L'électricité ne peut pas être stockée à grande échelle sous sa propre forme en raison de sa **faible densité énergétique**. Pour contourner cette limite, de nombreuses solutions visent à stocker l'énergie électrique sous une autre forme d'énergie.



Les différentes technologies stationnaires de stockage de l'électricité - Source : smartgrids-cre.fr

Les technologies de stockage électrochimique

Tout le monde utilise des **piles**. Mais peu savent qu'elles appartiennent à la famille du stockage électrochimique. Avec le développement des usages, la technologie s'est améliorée ces dernières années pour offrir des capacités de stockage de l'énergie plus performantes.

Les batteries électrochimiques

Les **batteries électrochimiques** sont constituées d'un empilement de plusieurs éléments chimiques. Leur capacité de stockage et leur puissance dépendent des technologies utilisées.

La batterie électrochimique la plus connue aujourd'hui est la batterie lithium-ion. Mais il existe une **multitude de batteries électrochimiques** : plomb-acide, nickel-cadmium, lithium-polymère, sodium-soufre, etc.

Composées de deux électrodes, séparés par un électrolyte, elles fonctionnent toutes sur le **principe de l'oxydoréduction**. Les électrons libérés se déplacent de l'anode vers la cathode - et vice-versa - pour charger et décharger la batterie.

Les batteries utilisées pour le stockage des énergies renouvelables sont dites **fixes ou stationnaires**. Les **batteries embarquées** accompagnent aujourd'hui nos quotidiens, notamment dans les véhicules électriques, les smartphones ou les ordinateurs portables.

Technologie mature, la batterie électrochimique a une durée de vie limitée. L'extraction et le recyclage du lithium posent aussi des questions environnementales et sociales.

La pile à combustible

La pile à combustible (PAC) **convertit un combustible en énergie**, via le même principe d'oxydoréduction.

La **pile à hydrogène** est la pile à combustible la plus prometteuse aujourd'hui. Elle permet de retransformer l'électricité stockée sous forme d'hydrogène en électricité. Pour réussir cette prouesse chimique, l'hydrogène est oxydé par l'anode.

L'électrolyte dirige les électrons libérés vers un circuit externe, générant ainsi un courant électrique. Les électrons sont ensuite recombinés avec de l'oxygène au niveau de la cathode. Ils repartent en sens inverse pour répéter l'opération plusieurs fois.

Les batteries à flux redox

De grands espoirs entourent les **batteries à circulation** ou batteries à flux redox. Elles stockent de l'électricité sous forme d'énergie chimique, puis la retransforment en électricité.

Les batteries à circulation utilisent aussi le principe de l'oxydoréduction. Elles se distinguent des batteries électrochimiques par leurs deux **électrolytes sous forme liquide**.

Plus simples à recycler et avec une durée de vie plus longue que les batteries lithium-ion, les batteries à flux redox pourraient venir les concurrencer. Leur commercialisation est aujourd'hui freinée par leur **nocivité pour l'environnement**. En cause : le vanadium dont elles sont constituées.

Le CEA poursuit des recherches pour le remplacer par des molécules organiques biosourcées.

Les technologies de stockage mécanique

Les technologies de stockage mécanique consistent à stocker des éléments naturels, transformables rapidement en énergie verte pour répondre aux pics de consommation.

Les retenues d'eau

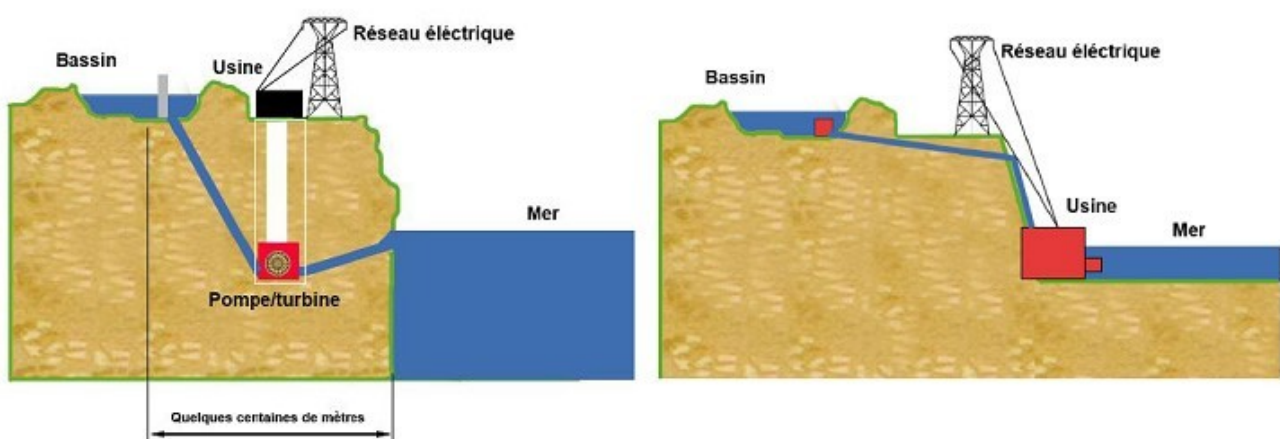
L'**hydroélectricité** joue un rôle majeur dans la régulation de la production d'électricité en France. Les centrales de lac et d'éclusée stockent l'eau en grandes quantités dans des réserves en amont des barrages.

En cas de hausse de la demande électrique, un système de vannes **libère immédiatement l'eau pour entraîner les turbines**. Le générateur transforme cette énergie mécanique en électricité verte, directement injectable dans le réseau.

Les stations de pompage (STEP)

Les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP) sont constituées de deux bassins creusés à des hauteurs différentes.

Schéma de principe d'une STEP marine



Sch

schéma de principe d'une STEP marine Source : EDF SEI

Quand la demande est faible, l'électricité en surplus est utilisée pour pomper et transférer l'eau du bassin inférieur vers le bassin supérieur. En cas de pic de consommation, les vannes sont ouvertes du bassin supérieur vers le bassin inférieur pour créer une chute d'eau artificielle et produire de l'électricité grâce à la pression de l'eau.

Les STEP représentent **99 % des capacités de stockage d'électricité** dans le monde. La STEP Hongrin-Léman reste à ce jour le plus grand site mondial avec 100 GWh de capacité de stockage. Elle devrait être détrônée en 2026 par la STEP Snowy 2.0 en Australie, avec une capacité annoncée de 350 GWh.

Le stockage d'électricité par air comprimé

Avec la STEP, le stockage d'électricité par air comprimé est l'un des systèmes de stockage les plus anciens et les mieux maîtrisés.

Le stockage par air comprimé fonctionne sur le même principe que les STEP. Comprimé dans des cavités souterraines, l'air est libéré au moment des pics de consommation. **La pression de l'air actionne des turbines** qui génèrent de l'électricité.

Avec une faible emprise au sol, les unités de stockage par air comprimé ont des puissances assez modestes. Mais le futur projet de CAES (Compressed Air Energy Storage) lancé en Californie pourrait changer la donne en 2028, avec sa capacité de stockage de 4 GWh et sa puissance de 500 MW.

Le stockage d'électricité par inertie

Le stockage par inertie consiste à stocker l'électricité **sous forme d'énergie cinétique**.

L'électricité est utilisée pour faire tourner un **volant d'inertie**. Une fois lancée à plus de 8 000 tours par minute, la masse continue à tourner autour d'un axe cylindrique. L'énergie cinétique peut être transformée en électricité via un moteur, sans perte d'énergie.

Solide et fiable, le stockage inertiel présente une grande réactivité et une durée de vie très longue. Mais son **temps de stockage très limité** le limite à des utilisations rapides et ponctuelles d'optimisation du réseau électrique.

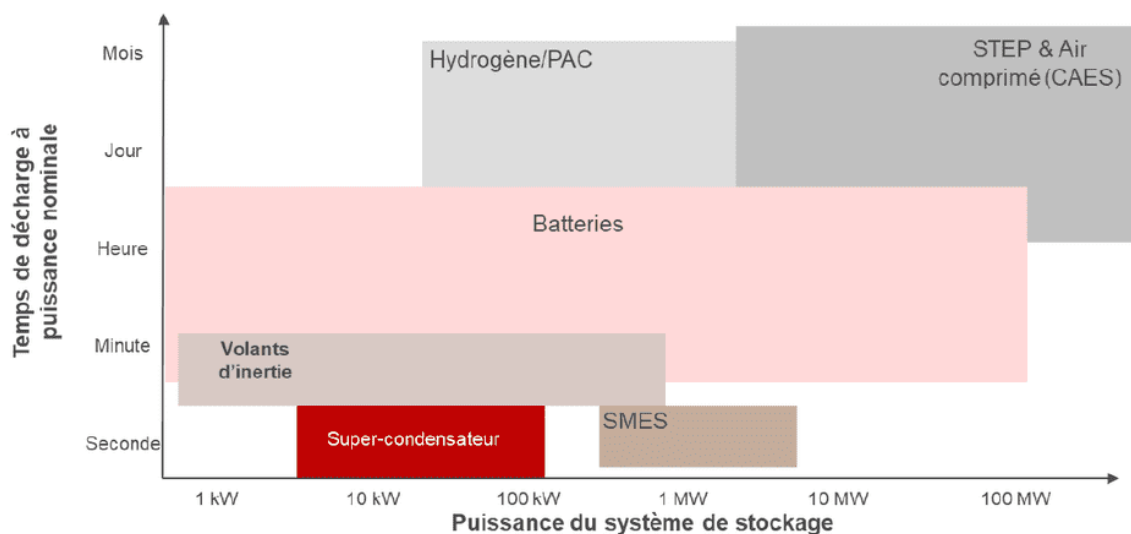
Le stockage chimique par hydrogène

Comme son nom l'indique, le stockage chimique vise à stocker l'électricité sous forme chimique. Aujourd'hui, le stockage sous forme d'hydrogène attire tous les regards. L'électricité est utilisée pour fabriquer de l'hydrogène et de l'oxygène à partir d'eau, via **électrolyse**.

L'hydrogène peut ensuite être stocké, transporté et exploité sous différentes formes. Il peut être retransformé en électricité via une pile à combustible. C'est la technique du **power-to-power**. Il peut aussi être utilisé directement sous forme d'hydrogène par l'industrie ou les transports lourds.

Une autre voie s'ouvre aujourd'hui avec le **power-to-gas**. En cours d'expérimentation, le procédé de méthanation combine l'hydrogène produit grâce à l'électricité à du CO₂ capturé pour produire un méthane de synthèse directement injectable dans le réseau gaz.

Figure 8 : Caractéristique temps de décharge / puissance de différentes technologies de stockage



Source : Analyses E-CUBE Strategy Consultants

Comparaison des différentes technologies de stockage - Source : Analyse E-Cube Strategy Consultants

Quelles sont les dernières innovations en matière de stockage de l'électricité ?

Chaque solution de stockage de l'énergie présente des limites. Les STEP nécessitent de l'espace et de lourds investissements. Les batteries électrochimiques soulèvent des questions environnementales. De plus, elles ne permettent pas de répondre aux besoins croissants de stockage. Les chercheurs rivalisent d'imagination avec des innovations énergétiques audacieuses dont les performances restent à prouver.

Les batteries à gravité

Tout ce qui monte doit redescendre. C'est cette loi découverte par Newton qui inspire l'innovation du **stockage gravitaire**. L'électricité est stockée sous forme d'énergie de pesanteur.

Les surplus d'électricité servent à soulever d'énormes masses. Lorsque la demande augmente, les masses sont relâchées. **Dans leur chute contrôlée, elles entraînent un alternateur** qui génère de l'électricité.

La première batterie de stockage en béton au monde est **en cours de construction en Chine**. Sa capacité annoncée de 25 MW pour 100 MWh doit permettre d'alimenter 3 600 foyers pendant une journée. Ce système gravitaire est décrié par les scientifiques qui dénoncent les risques et l'impact carbone du béton.

Des chercheurs travaillent sur une autre technique : le Underground Gravity Energy Storage (UGES). Elle consiste à **stocker du sable dans des mines souterraines abandonnées**. Quand la production électrique est déficitaire, le sable relâché dans la mine entraîne un générateur d'électricité. Les surplus de production permettent de remonter le sable.

Le stockage de l'électricité sous forme de chaleur

Le sable est aussi exploité par les Finlandais pour stocker l'électricité sous forme de chaleur. La société Polar Night Energy a construit un réservoir expérimental pour contenir une centaine de tonnes de sable.

L'électricité convertie en chaleur est stockée dans le sable. Isolée, la chaleur peut être conservée plusieurs mois. Elle est réutilisable sous forme d'eau chaude, d'air chaud ou de vapeur d'eau.

Les projets européens Amadeus et Nathalie fondent aussi de grands espoirs dans le stockage de l'électricité à très haute température, **dans des alliages métalliques au silicium**. La chaleur est convertie en courant électrique grâce à des convertisseurs statiques. Dans l'attente d'un prototype industriel, un prototype de laboratoire a prouvé l'efficacité du système.

Le stockage de l'électricité sous forme de froid

Les technologies de stockage d'énergie à air liquide (LAES) visent l'inverse : stocker l'énergie sous forme de froid. L'électricité est utilisée pour refroidir et liquéfier l'air, stocké en grandes quantités dans un espace réduit. L'air peut ensuite être réchauffé pour produire de l'électricité. **Lors de sa décompression, il entraîne une turbine** qui génère un courant électrique.

Une première centrale commerciale de stockage est **en cours de construction en Angleterre**. Elle doit être achevée fin 2024. L'énergie stockée devrait permettre d'alimenter 600 000 foyers pendant une heure.

Le stockage de l'électricité représente un véritable défi. Le relever est indispensable pour réussir la transition énergétique et accompagner le développement des énergies renouvelables.

Si de nombreuses solutions de stockage de l'énergie existent déjà, elles présentent toutes des limites. Les chercheurs s'attellent à les lever pour un avenir énergétique durable, sûr et neutre en carbone.