

Les systèmes de stockage d'énergie



Stockage d'énergie et piles à combustibles

Bouakkaz Abderraouf

Département de génie électrique

Faculté de technologie

Université 20 Aout 1955
(Skikda)

2.00

Avril 2022

Table des matières

Objectifs	3
I - Les systèmes de stockage d'énergie	4
1. Stockage de l'énergie	4
2. Caractéristiques principales d'un système de stockage d'énergie	5
3. Différents modes de stockage d'énergie	5
3.1. Stockage d'énergie mécanique	7
3.2. Le stockage électrique	9
3.3. Stockage d'énergie thermique	9
3.4. Stockage d'énergie électrochimique	12
4. Exercices	16
4.1. Exercice : 01	16
4.2. Exercice : 02	16
4.3. Exercice : 03	16
4.4. Exercice : 04	16
4.5. Exercice : 05	17
4.6. Exercice : 06	17
Glossaire	18
Abréviations	19

Objectifs

Ce chapitre vise à:

- Acquérir des connaissances de base dans les systèmes de stockage d'énergie ;
- Maîtriser les concepts de base des systèmes de stockage d'énergie.
- Apprendre les techniques et les différentes technologies des systèmes de stockage d'énergie ;

I Les systèmes de stockage d'énergie

La majorité des besoins énergétiques actuels dans le monde sont satisfaits par les énergies fossiles du fait de sa **disponibilité**, de son **économie**, et les principaux secteurs plus utilisant cette énergie dans les infrastructures sont : **l'industrie, les transports, l'agriculture, le résidentiel et le commercial**.

Mais l'utilisation continue de combustibles fossiles a suscité de sérieuses inquiétudes concernant **l'environnement, la disponibilité limitée et les contraintes géographiques**, et **la sécurité énergétique**. Cela a stimulé l'intérêt et soulevé le défi de la production d'énergie à partir de sources renouvelables, en particulier l'énergie solaire et éolienne, qui sont les plus abondantes et potentiellement disponibles.

Cependant, **la variabilité et l'intermittence de sources à énergies renouvelables** présente un grand défi dans la production d'énergie et l'équilibre énergétique pour **assurer la stabilité et la fiabilité de l'approvisionnement**. Le point commun à la plupart des sources d'énergie renouvelables est que leur emplacement dépend des ressources et que les systèmes de transmission doivent être développés pour répondre à cette contrainte.

Par conséquent, les systèmes de stockage d'énergie peuvent compenser les problèmes de **variabilité et d'intermittent des sources d'énergie renouvelables** en stockant l'énergie générée puis en la rendant disponible à la demande plus tard. De plus, les systèmes de stockage d'énergie peuvent également fournir de nombreux bienfaits peuvent être résumés comme **l'exploitation de quantités d'énergie autrement gaspillées** (par exemple, les quantités rejetées d'énergie éolienne peuvent être stockées), **la fiabilité accrue de l'approvisionnement en énergie** (puisque'une source d'énergie supplémentaire est disponible) et **les services énergétiques qui déplacent la production des périodes de pointe vers les périodes creuse**.

1. Stockage de l'énergie

Définition : Stockage d'énergie

Le stockage d'énergie est la capture de l'énergie produite à un moment donné pour une utilisation ultérieure afin de **réduire les déséquilibres entre la demande et la production d'énergie**.

Définition : Système de stockage d'énergie

Un système de stockage d'énergie est un dispositif unitaire utilisé pour **stocker de l'énergie** afin d'être utilisé ultérieurement en cas de besoin.

💡 Fondamental

Les systèmes de stockage d'énergie électrique sont habituellement utilisés comme systèmes de secours pour **équilibrer la puissance** et de donner le système **une haute qualité, une fiabilité et plus de flexibilité**.

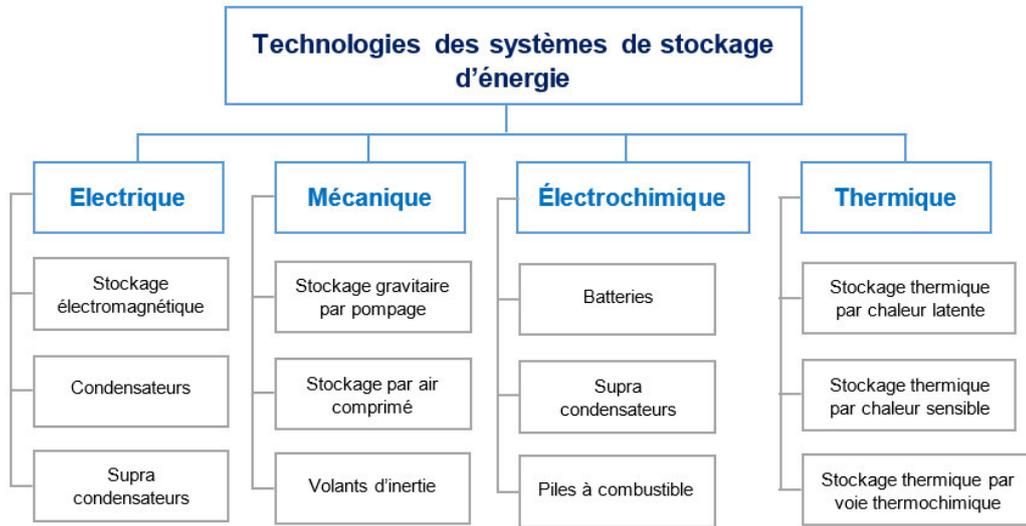
2. Caractéristiques principales d'un système de stockage d'énergie

L'énergie électrique peut être stockée sous diverses formes d'énergie, telles que **l'énergie mécanique, l'énergie thermique, l'énergie électrochimique, l'énergie électrostatique**, etc. Chacune d'entre elles a des caractéristiques et des applications distinctes. Parmi les caractéristiques communes des systèmes de stockage d'énergie sont les suivantes :

- **Capacité** : La capacité de stockage est la quantité d'énergie extraite d'un dispositif ou d'un système de stockage d'énergie ; généralement mesurée en joules ou en kilowattheures. Certaines technologies fournissent un stockage d'énergie à court terme, tandis que d'autres peuvent durer beaucoup plus longtemps.
- **Efficacité du cycle** : l'efficacité du cycle d'un dispositif de stockage d'énergie est définie comme le rapport entre la quantité d'énergie produite pendant la décharge et la quantité d'énergie absorbée pendant la charge. Une efficacité de cycle élevée proche de 100 % implique que moins d'énergie est perdue pendant les cycles de charge et de décharge.
- **Cycle de vie** : le cycle de vie est le nombre maximal de cycles de charge et de décharge qu'un élément de stockage d'énergie peut effectuer avant que sa capacité ne tombe en dessous d'un pourcentage spécifique. Une fois le cycle de vie terminé, les éléments de stockage d'énergie doivent être remplacés.
- **Taux d'auto-décharge** : l'auto-décharge ou la fuite est une mesure de la vitesse à laquelle un élément de stockage d'énergie perd son énergie même s'il n'y a pas de courant consommé par une charge. Pour un stockage d'énergie à long terme, des éléments de stockage d'énergie à faible auto-décharge sont préférés.
- **Densité d'énergie et de puissance** : La densité d'énergie est le stockage d'énergie maximum par volume ou par poids. La densité de puissance est la puissance nominale maximale par volume ou par poids. Pour les applications automobiles ou portables où le volume et le poids sont des contraintes critiques, les densités d'énergie et de puissance sont importantes.

3. Différents modes de stockage d'énergie

Les systèmes de stockage d'énergie sont généralement classés en fonction de la forme de leur stockage d'énergie en quatre catégories principales : **stockage mécanique, stockage d'énergie thermique, stockage électrique et stockage électrochimique**.



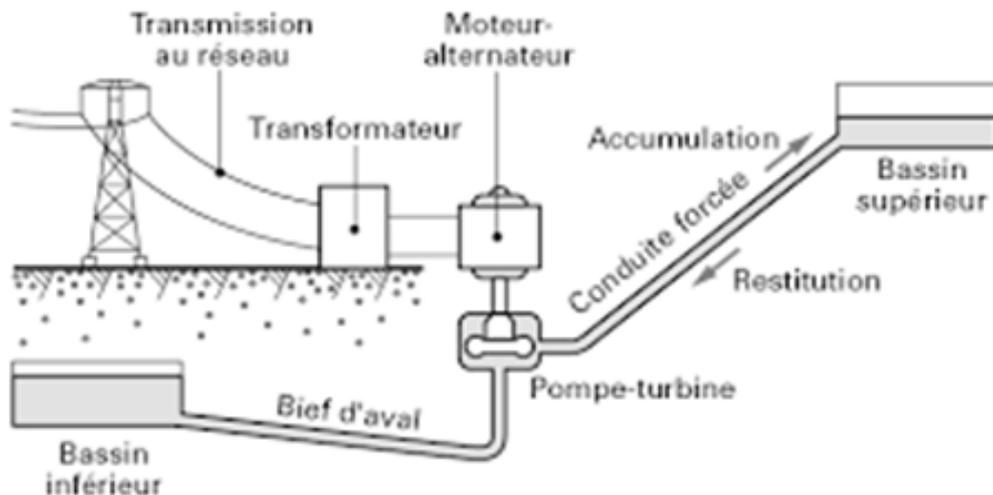
Classification des dispositifs de stockage d'énergie

3.1. Stockage d'énergie mécanique

3.1.1. Stockage gravitaire par pompage

Dans un système de stockage gravitaire par pompage appelé aussi stations de transfert d'énergie par pompage (STEP)^{*}, le surplus d'énergie apparaissant en période de faible demande, provenant soit du réseau électrique, soit d'une unité de production renouvelable (comme un parc éolien ou PV), est exploité pour pomper de l'eau en bas vers un réservoir de stockage surélevé (supérieur). Lorsque la demande en pointe, l'eau est libérée du réservoir supérieur (en haut) vers le réservoir inférieur (en bas) et entraîne une turbine hydraulique qui alimente un générateur électrique connecté au système. En conséquence, le système est capable de couvrir un déficit de puissance existant en utilisant la quantité appropriée d'énergie précédemment stockée. Dans une autre version, les turbines à eau peuvent être remplacées par des machines hydrauliques réversibles fonctionnant dans les deux sens (en pompage et en turbine), souvent appuyées par un groupe motopompe indépendant.

Le rendement du cycle d'un système de stockage par pompage varie généralement entre 65 % et 77 %, tandis que le principal inconvénient de tels systèmes est leur coût d'investissement élevé, directement lié à la nécessité de construire au moins deux réservoirs, comme il est préférable d'être proche de la consommation.



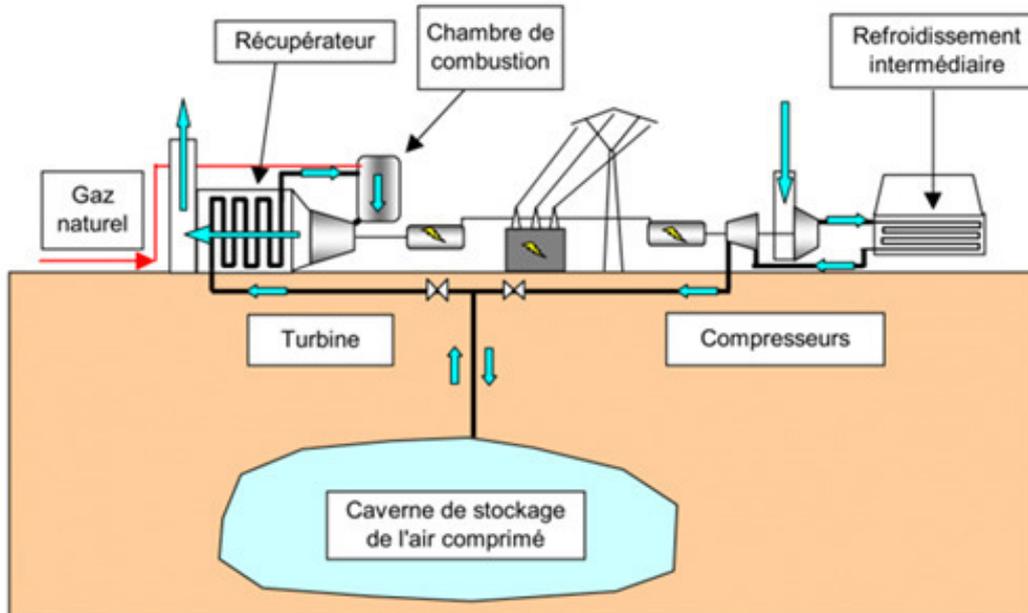
Système de stockage hydraulique par pompage (source : Agence Régionale Energie Réunion-ARER).

Cf. "Stockage d'énergie par pompage (STEP)"

3.1.2. Stockage par air comprimé

Dans un système de stockage d'énergie par air comprimé (CAES^{*} : *Compressed Air Energy Storage*), durant les périodes hors pointe, la puissance prélevée sur le réseau ou une autre source de production renouvelable (comme un parc éolien ou PV^{*}), est utilisée pour compresser l'air dans une caverne souterraine (avec des pressions d'air atteignant 80 bars). Pendant les périodes de demande de pointe, la quantité d'air comprimé requise est libérée de la caverne, chauffée au gaz naturel puis fournie sous forme de gaz à une turbine à gaz où se produit la détente, comme dans un *cycle Brayton*. C'est en fait le principal avantage d'un système de stockage d'énergie par air comprimé : le fait que les étapes de compression et de génération sont séparées les unes des autres, ce qui peut représenter jusqu'à 66% de la consommation de carburant nécessaire pour entraîner le compresseur dans un cycle Brayton,

n'est pas nécessaire dans le cas d'un cycle de stockage d'énergie à air comprimé. En conséquence, dans un système de stockage d'énergie à air comprimé, toute la puissance de la turbine à gaz est disponible pour la consommation.

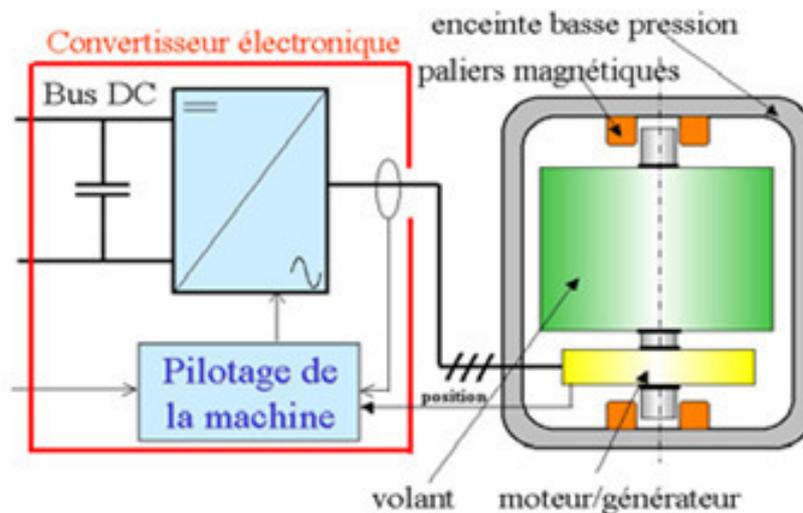


Système de stockage par air comprimé

Cf. "Stockage d'énergie par air comprimé"

3.1.3. Volants d'inertie

Dans un système de stockage d'énergie à volant d'inertie, l'énergie cinétique est stockée en faisant tourner un disque ou un rotor sur son axe. Lorsqu'une alimentation de secours à court terme est requise, le volant d'inertie profite de l'inertie du rotor et l'énergie cinétique stockée est convertie en électricité. Un volant d'inertie moderne se compose d'une masse rotative (une jante attachée à un arbre) supportée par des roulements et reliée à un moteur/générateur. Pendant le fonctionnement du moteur, de l'énergie électrique est fournie au stator et le couple produit augmente l'énergie cinétique du rotor. Lors de la décharge, le système fonctionne en sens inverse. La quantité d'énergie stockée dans un volant est directement proportionnelle au moment d'inertie de masse du rotor et au carré de sa vitesse de rotation.



Système de stockage par volants d'inertie

Cf. "Stockage d'énergie à volant d'inertie"

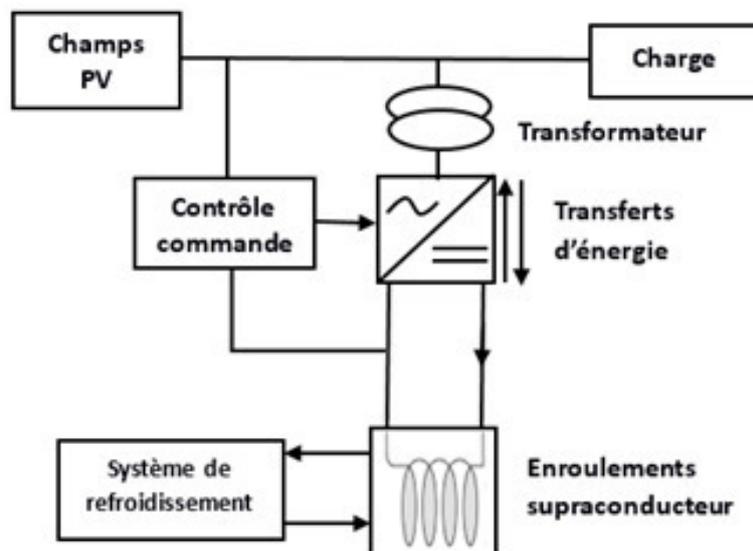
3.2. Le stockage électrique

L'énergie électrique peut stoker directement en énergie électrique sans transformation...

3.2.1. Stockage électromagnétique

Dans un système de stockage électromagnétique, l'énergie est stockée dans le champ magnétique produit lorsqu'un courant continu circule dans une bobine supraconductrice. Pour ce faire, le matériau supraconducteur* de la bobine doit être suffisamment refroidi pour ne présenter aucune résistance au passage du courant, permettant à l'unité de stocker de l'énergie dans le champ magnétique. Le matériau supraconducteur actuellement utilisé est un alliage niobium-titane, fonctionnant à la température de l'hélium liquide.

Les systèmes de stockage électromagnétique ont la capacité de réagir rapidement. Ils peuvent être profondément déchargés sans aucune influence sur leur efficacité opérationnelle ou leur durée de service, et leur manque de pièces mobiles et leur valeur d'efficacité impressionnante plus de 90 % sont des avantages supplémentaires. Les systèmes de stockage électromagnétique sont confrontés à certains problèmes liés à la stabilité de la bobine supraconductrice : la supraconductivité semble être assez sensible aux variations de température et au champ magnétique critique. Le principal inconvénient de la technologie, cependant, est l'énorme quantité d'énergie nécessaire pour maintenir la bobine à des températures aussi basses, combinée au coût global élevé de l'emploi d'une telle unité.



Système de stockage électromagnétique

3.3. Stockage d'énergie thermique

Le stockage d'énergie thermique est une forme de stockage d'énergie. Cependant, l'énergie thermique stockée repose sur le transfert thermodynamique, dans ce cas, un matériau spécifique utilisé pour absorber la chaleur qui augmente sa température. Les systèmes de stockage d'énergie thermique ont généralement des temps de réponse assez longs et seront donc plus efficaces s'ils sont utilisés en tant que systèmes de stockage de masse.

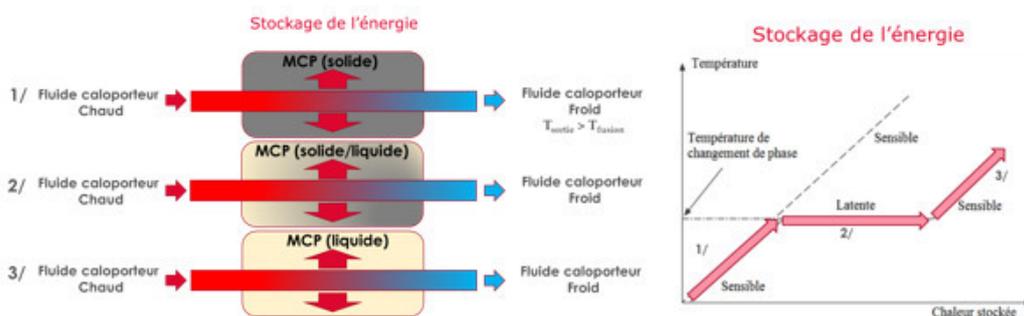
Le stockage thermique peut être réalisé à travers trois phénomènes différents associés aux matériaux qui assurent le stockage. On parle alors de stockage par chaleur latente, stockage par chaleur sensible, et stockage d'énergie thermique par voie thermochimique.

3.3.1. Stockage d'énergie thermique par chaleur latente

L'énergie thermique peut être stockée de façon isotherme* grâce à un changement de phase des matériaux, solide /liquide ou liquide/vapeur. Durant l'étape de charge, l'énergie thermique fournie au média permet son échauffement, puis son changement de phase et éventuellement sa surchauffe. Celui-ci est ensuite stocké à la température de charge. Lors de la restitution de l'énergie celui-ci change de nouveau de phase pour restituer l'énergie stockée et reprendre son état initial.

Les procédés de stockage d'énergie thermique par chaleur latente sont généralement des **systèmes de stockage passifs** . Le fluide caloporteur passe dans le stockage uniquement pendant les phases de charge et de décharge. Le matériau de stockage ne circule pas, il est séparé du fluide caloporteur. Pour assurer le transfert de chaleur entre les deux, des échangeurs de chaleur sont utilisés. La majorité des procédés utilisent des transitions solide-liquide.

Plusieurs matériaux à changement de phase sont disponibles, y compris, mais sans s'y limiter, **des sels, des polymères, des gels, de la cire de paraffine et des alliages métalliques** , chacun ayant des propriétés différentes. Le processus étant isotherme*, le matériau spécifique peut être sélectionné pour obtenir la plage de température souhaitée. Les qualités souhaitables comprennent également une chaleur latente et une conductivité thermique élevées.

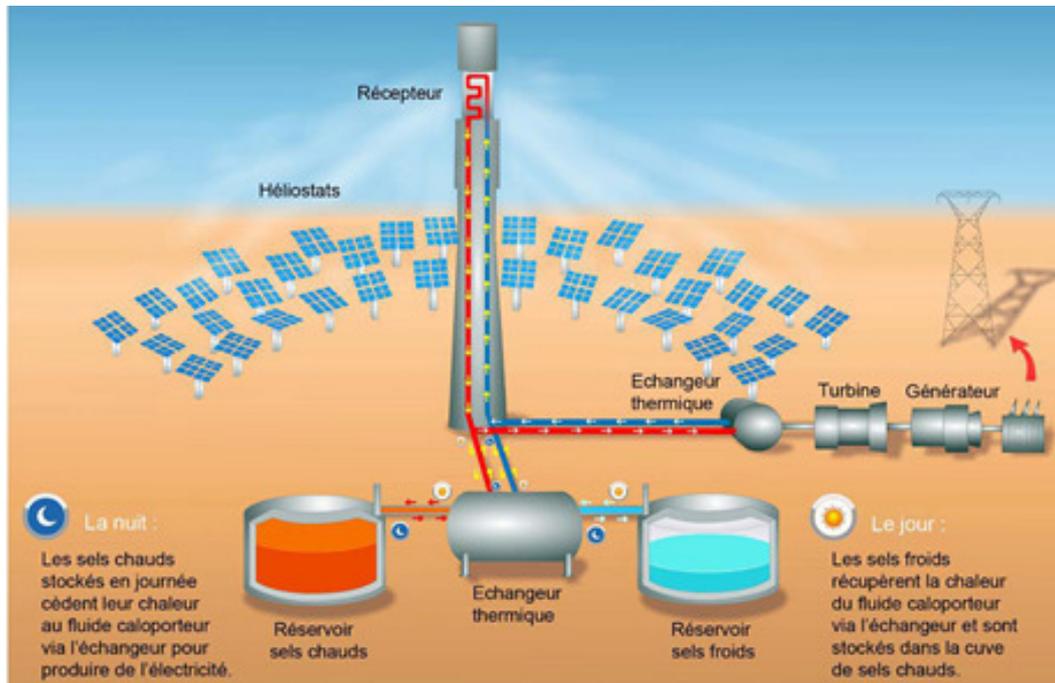


Stockage d'énergie thermique par chaleur latente (source : Centre Technique des Industries Aéronautiques et Thermiques-CETIAT)

3.3.2. Stockage d'énergie thermique par chaleur sensible

Le stockage de chaleur sensible est la méthode la plus simple. Cela signifie simplement que la température d'un certain milieu est augmentée ou diminuée. Ce type de stockage est le plus disponible dans le commerce des trois types, car les autres sont encore en cours de recherche et de développement.

Les matériaux sont généralement **peu coûteux et sûrs** . L'une des options les moins chères et les plus couramment utilisées est un réservoir d'eau, mais des matériaux tels que les sels fondus ou les métaux peuvent être chauffés à des températures plus élevées et offrent donc une capacité de stockage plus élevée.



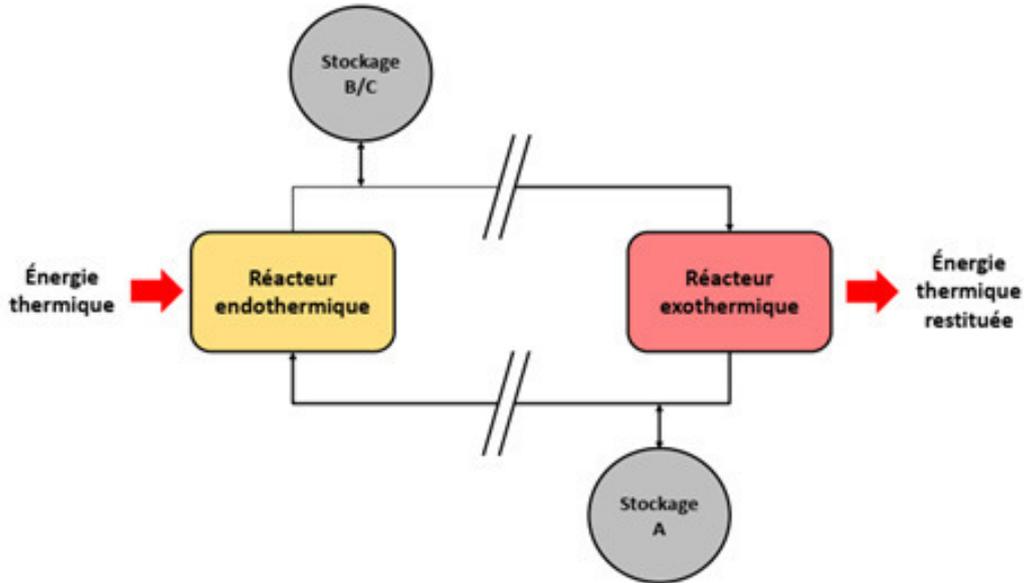
Stockage d'énergie thermique par chaleur sensible (source : www.mytopschool.net)

3.3.3. Stockage d'énergie thermique par voie thermochimique

Le stockage de chaleur thermochimique implique une sorte de réaction chimique exotherme^{*}/endotherme^{*} réversible avec des matériaux thermochimiques. Selon les réactifs, cette méthode peut permettre une capacité de stockage encore plus élevée que stockage par chaleur latente.

Dans ce type de stockage, la chaleur est appliquée pour décomposer certaines molécules. Les produits de réaction sont ensuite séparés et mélangés à nouveau lorsque cela est nécessaire, ce qui entraîne une libération d'énergie. Quelques exemples sont la décomposition de l'oxyde de potassium (sur une plage de 300-800 °C, avec une décomposition thermique de 2,1 MJ/kg), l'oxyde de plomb (300-350 °C, 0,26 MJ/kg) et l'hydroxyde de calcium (au-dessus de 450 °C).

Lors de l'étape de charge, l'énergie thermique issue du champ solaire permet de mettre en œuvre la réaction endothermique^{*}. Les produits de cette réaction (B et C) sont séparés et stockés. Lorsque l'énergie thermique doit être restituée, les produits stockés (B et C) sont mis en contact afin de réaliser la réaction exothermique^{*} réversible et ainsi restituer la chaleur et régénérer le produit initial (A).



Stockage d'énergie thermique par voie thermochimique

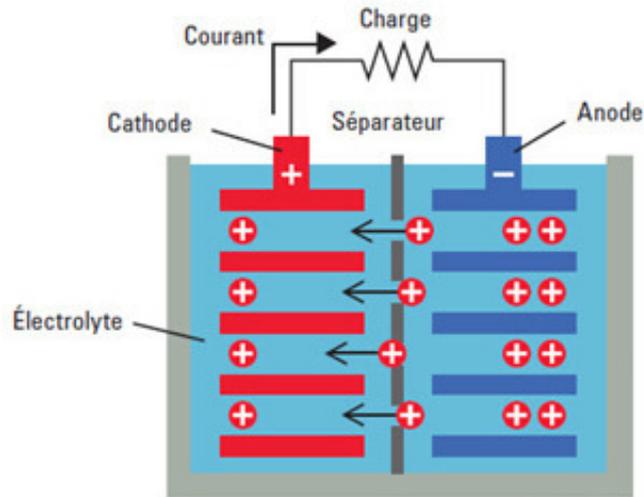
3.4. Stockage d'énergie électrochimique

Les technologies de stockage d'énergie chimique sont principalement constituées de batteries (batteries secondaires et à flux) et de produits chimiques d'origine renouvelable (hydrogène, pile à combustible).

3.4.1. Batteries

Les batteries sont la technologie de stockage d'énergie la plus largement utilisée, traditionnellement les batteries utilisées dans de nombreuses applications autonomes (montres, jeux, PC, téléphones et bien d'autres choses). Les nombreux types de batteries existantes, chacune avec ses caractéristiques particulières, couvrent un large éventail d'applications, de la qualité de l'énergie à la gestion de l'énergie. Les technologies les plus couramment utilisées comprennent les batteries plomb-acide (L/A) et nickel-cadmium (Ni-Cd) « mature », ainsi que les batteries avancées sodium-soufre (Na-S), métal-air et lithium-ion (Li-ion), qui sont récemment devenus disponibles dans le commerce. Un système de batterie typique comprend une pile de batteries, où l'énergie électrique est convertie en énergie chimique, et vice versa (les cellules de batterie connectées en série et en parallèle pour atteindre les niveaux souhaités de tension et de courant de sortie).

Les batteries sont généralement déterminées par leur rendement, leur profondeur de décharge, leur nombre de cycles, leur température de fonctionnement, leur densité énergétique et leur auto-décharge.



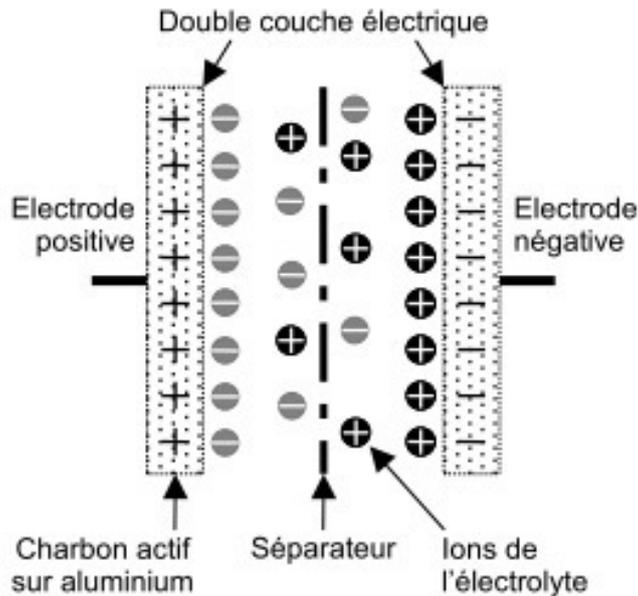
Stockage d'énergie par les batteries (source : h2sys.fr)

3.4.2. Les supra condensateurs

Un supra condensateur est formé de deux collecteurs métalliques généralement en aluminium, de deux électrodes conductrices électroniques à très haute surface spécifique plongées dans un électrolyte et d'une membrane de séparation poreuse.

Ce qui distingue les supra condensateur (SC^*) des autres condensateurs conventionnels, c'est leur grande capacité, qui est remarquablement élevée. La capacité des SC^* est d'environ 5 F/cm^2 alors que la valeur correspondante pour les condensateurs classiques ne dépasse pas $40 \mu\text{F/cm}^2$. Les électrodes sont constituées d'un matériau poreux de grande surface, et l'électrolyte peut être aqueux ou organique : les différences entre les deux incluent une densité d'énergie plus élevée dans le cas des électrolytes organiques mais des coûts inférieurs et une plage de température plus large dans le cas des électrolytes aqueux.

Les principaux avantages du SC^* incluent des densités de puissance très élevées, des taux de charge et de décharge rapides, une faible perte de courant électrique, une durée de vie considérable de l'ordre de 8 à 10 ans (des milliers de cycles par an à décharge profonde), une stabilité de fonctionnement dans une large plage de températures et un rendement énergétique élevée (de l'ordre 95%). D'autre part, bien que la densité d'énergie soit plus élevée que dans les condensateurs courants, elle reste parmi les plus faibles en stockage d'énergie, tandis que les problèmes de coût sont également une contrainte sérieuse pour de tels systèmes. Les SC^* sont destinés aux applications de qualité de l'énergie, contribuant également aux configurations de stockage hybrides pour le support des systèmes d'énergie renouvelables et des véhicules électriques.



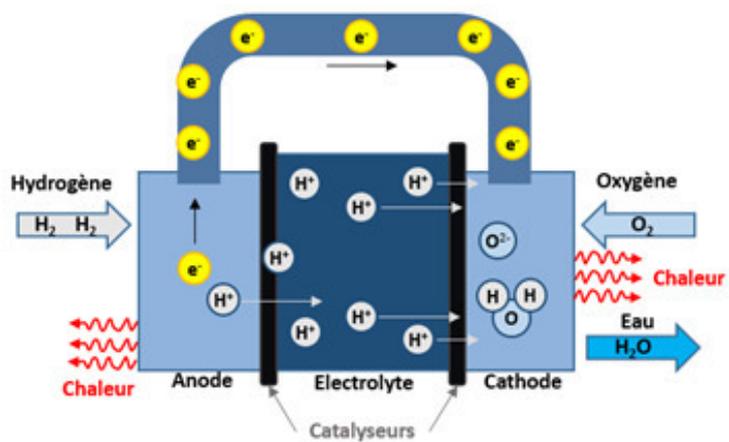
Structure d'un super condensateur

3.4.3. Piles à combustible

Les piles à combustible sont constituées de deux électrodes entourant un électrolyte. L'oxygène passe sur une électrode et l'hydrogène sur l'autre, générant de l'électricité, de l'eau et de la chaleur. En principe, une pile à combustible fonctionne comme une batterie. Cependant, une pile à combustible n'a pas besoin d'être rechargée ; tant que le combustible est fourni à la pile, de l'électricité est produite. Ainsi, les restrictions imposées à la capacité de stockage sont déterminées par la taille du réservoir de carburant. L'énergie produite par une pile à combustible dépend directement du type de pile à combustible, de la température de fonctionnement et du catalyseur utilisé pour améliorer les performances de la réaction chimique.

Le principal inconvénient de cette technologie est le rendement du cycle qui, en incluant l'étape de production d'hydrogène, est estimé entre 30 et 40 %. Les pertes sont détectées lors de l'électrolyse pour produire de l'hydrogène, lors de l'étape de stockage, et enfin lors du processus de génération d'électricité via la pile à combustible. Le composant pile à combustible seul peut toutefois atteindre pour certains types des rendements de 60 % (dans le cas des piles à combustible à haute température, c'est-à-dire les piles à combustible à carbonate fondu (MCFC^{*}), les piles à combustible à oxyde solide (SOFC^{*}) ou les piles à combustible alcalines (AFC^{*}).

Parmi les avantages technologiques que l'on peut rencontrer figurent la densité énergétique élevée due à l'utilisation de l'hydrogène, le faible coût énergétique, l'auto-décharge négligeable et le large éventail d'applications, y compris l'interaction avec les systèmes à énergie renouvelables.



Stockage d'énergie par piles à combustible (source : h2sys.fr)

4. Exercices

4.1. Exercice : 01

Un système de stockage d'énergie permet

- Stockage d'énergie
- Stockage d'électricité
- Compenser d'énergie
- Générer l'énergie

4.2. Exercice : 02

Parmi les principales caractéristiques d'un système de stockage d'énergie on trouve:

- La quantité d'énergie extraite d'un système de stockage d'énergie
- Le nombre maximal de cycles de charge et de décharge.
- Le stockage d'énergie maximum par volume ou par poids
- Une efficacité de cycle élevée
- La puissance nominale maximale par volume ou par poids.

4.3. Exercice : 03

Les batteries à gravité sont un type de système de stockage mécanique!.

- vrai
- faux

4.4. Exercice : 04

Classifier les systèmes de stockage d'énergie selon leur type:

Piles à combustible	Bobine supraconductrice	Les supra condensateurs	Stockage par air comprimé
Volants d'inertie	Stockage d'énergie thermique par chaleur latente	Batteries	
Stockage par chaleur sensible	Stockage par voie thermochimiques	Condensateur	Stockage gravitaire

Stockage électrochimique	Stockage électrique	Stockage mécanique	Stockage thermique

4.5. Exercice : 05

Complétez les mots manquants par les mots suivantes : *déséquilibres* ; *capture* ; *réduire* ; *ultérieure*

Le stockage d'énergie est la [] de l'énergie produite à un moment donné pour une utilisation [] afin de [] les [] entre la demande et la production d'énergie.

4.6. Exercice : 06

Un système énergétique qui dépend de sources d'énergie renouvelables avec un système de stockage appelé un système d'énergie :

Glossaire

endotherme

Une réaction endothermique est une transformation qui absorbe de l'énergie.

Exotherme

Une réaction exothermique est une transformation qui dégage de l'énergie

isotherme

la température est identique à un moment donné (température constante)

Matériau supraconducteur

Métal ou alliage dont la résistivité électrique baisse énormément au-dessous d'une certaine température

Abréviations

AFC : Alkaline fuel cells

CAES : Compressed Air Energy Storage

MCFC : Molten carbonate fuel cells

PV : Photovoltaïque

SC : Super condensateur

SOFC : Solid oxide fuel cells

STEP : stations de transfert d'énergie par pompage