

Chapitre II : stockage de l'énergie

II.1. Définition et généralités sur le stockage d'énergie :

Le stockage d'énergie dépend du type d'énergie ; Les **énergies fossiles** « charbon, gaz et pétrole » sont stockées naturellement dans **des réservoirs « des nappes »**, une fois extraites, elles peuvent facilement être transformées ou transportées d'un point de vue technique. Le stockage pour les énergies intermittentes concerne principalement le stockage de l'électricité et celui de la chaleur. Il s'avère plus complexe **« nécessite des systèmes spécifiques »**, à cause de la dépendance de leur production à des vecteurs énergétiques tels que l'électricité, la chaleur ou l'hydrogène. Cependant, **l'électricité** est généralement transformée **« en énergie mécanique, thermique ou chimique »** pour être stocké. Contrairement, le stockage de **la chaleur** est généralement effectué sous **sa forme originale**.

- Le but principal du stockage d'énergie est de faire **un équilibre entre la demande et la production d'électricité** « il permet l'adaptation dans le temps entre l'offre et la demande en énergie », cet équilibre est nécessaire au fonctionnement des réseaux électriques. Ces réseaux sont conçus pour résister à un certain nombre d'aléas climatiques, pertes d'ouvrages pour la production, ...etc.
- L'un des inconvénients majeurs des énergies renouvelables en général est son intermittence due au caractère intermittent du [vent](#), du soleil ou de la géothermie. C'est pourquoi les systèmes de stockage auront un rôle important dans le développement de ces énergies dans la venir.

- L'électricité produite, par les panneaux solaires ou les éoliennes, dans les périodes de faible consommation ou de surproduction peut être stockée pour être restituée ensuite pendant les périodes où la production ne couvre pas la demande « production faible ou demande forte »

D'après un communiqué de la société Sonalgaz :

- le 30 juillet 2017, suite à la hausse de la température, la consommation d'électricité a atteint un pic de **13.881 MW**.

D'après l'accompagne d'ensemble des acteurs du monde énergétique industriel **ENEA** :

- En France, une baisse de **1°C** de la température en hiver entraîne une augmentation de la consommation de **2,3 GW**.
- Le 8 février 2012, un pic de **102 GW** de consommation atteint en France a porté ponctuellement à **2 000 €** le prix du **MWh** sur les marchés.
- A l'inverse, des épisodes de prix négatifs à **-500 €/MWh** ont été observés en Allemagne en 2010, causés par des surplus de production éolienne.

- La nature du stockage est multiple et fonction du temps de décharge, de la puissance et de la durée requises. Le stockage peut être :
 - à **usage fixe ou centralisé** : on parle stockage stationnaire
 - à **usage mobile** : il est alors qualifié d'embarqué « moyens de transport, appareils électroniques, ...etc. ».
- On différencie aussi le stockage en fonction de sa capacité « quantité de charge électrique disponible » :
 - le stockage est dit de **faible capacité** lorsque celle-ci est de l'ordre du **kWh**,
 - de forte capacité si elle est supérieure à **10 MWh**. Dans ce cas, on parle de **stockage massif** de l'énergie.

II.2. Stockage de l'électricité

- À ce jour, **le stockage direct de l'énergie électrique** est actuellement limité et coûteux. Certains systèmes permettent de stocker directement l'énergie sous **forme électrique**. Il s'agit principalement **des grands condensateurs** ou **des supercondensateurs**. Cette difficulté de stockage ne pas permettre d'envisager exploitation du stockage direct à grande échelle. Au contraire, **le stockage indirect de l'énergie électrique** représente la part de lion des capacités de stockage massif d'énergie installées dans le monde. Ce stockage de l'électricité vise à répondre à quatre problématiques principales :
 - la récupération de la production d'énergie excédentaire par rapport à la demande du moment.
 - la fourniture d'énergie pour compenser l'insuffisance due au caractère intermittent de l'offre.
 - la fourniture d'énergie pour alimenter un pic de demande occasionnel.
 - la fourniture d'énergie en cas de défaillance du système électrique ou de mauvaise qualité du réseau local.

II. 2. 1. Stockage direct de l'électricité

- Le **stockage direct de l'électricité** est réussi par l'utilisation de grands condensateurs « composants électriques constitués de deux armatures conductrices stockant des charges électriques opposées », dont la capacité se mesure à l'échelle du microfarad, qui ont des capacités de stockage limitées et dont les coûts sont plus ou moins élevés.
- Une autre piste du stockage direct de l'électricité est le stockage par les **supercondensateurs** « des condensateurs fabriqués à base des matériaux supraconducteurs ». Cependant, ceux-ci « **les supraconducteurs** » requièrent des températures d'utilisation proches du zéro absolu « - 273°C » dont le maintien **est techniquement aussi difficile que coûteux**. Mais, les **supercondensateurs** interviennent plutôt en puissance qu'en énergie « **capables de délivrer une forte puissance pendant un temps très court** ». Ils peuvent donc représenter un complément intéressant des batteries. La combinaison batterie/supercondensateur peut s'avérer particulièrement efficace dans le cas des véhicules hybrides.

II. 2. 2. Stockage indirect de l'électricité

- Hormis dans les condensateurs ou supercondensateurs, l'électricité ne se stocke pas directement. Il est donc nécessaire de convertir l'électricité en une autre énergie qu'en peut la maîtrisée. Les différents modes de stockage sont classés en fonction des énergies primaires de conversion.
- **II. 2. 2. 1. Mode de stockage mécanique**
- Ce mode de stockage d'électricité englobe tous les types de stockage d'énergie à grande échelle que ce soit potentielle ou cinétique.

A- Stations de transfert d'énergie par pompage « STEP »

- Ce système de stockage repose sur le principe de l'énergie gravitaire « énergie hydraulique donc aux barrages ». Il s'agit de la solution la plus employée pour stocker l'énergie des centrales électriques et il permet de stocker de grandes quantités d'énergie électrique, il utilise deux bassins à des altitudes différentes. Le surplus d'électricité du réseau est utilisé pour pomper l'eau du bassin inférieur dans le bassin supérieur. Dans le cas, de déficit de production électrique, l'eau pompée dans le bassin supérieur fait tourner une turbine par gravité et restitue l'énergie accumulée.
- Avec un rendement pouvant atteindre plus de 80%, ce type de stockage représente près de 99 % des capacités de stockage massif d'énergie installées dans le monde à fin 2011, avec une capacité totale d'environ 140 GW assurée par presque 400 STEP. Cependant, les études prospectives prévoient que la capacité mondiale des STEP devrait être de l'ordre de 400 GW à l'horizon 2050.

Stations de transfert d'énergie par pompage « STEP »

Avantages

- Elles représentent une des solutions de stockage à grande échelle les plus fiables;
- Elles peuvent déplacer des quantités massives d'énergie;
- Dotées d'une longue durée de vie « 40 ans »;
- Elles représentent l'un des moyens de stockages les moins coûteux;
- Elles sont à ce jour valorisées comme moyen d'arbitrage sur les marchés de l'électricité.

Inconvénients

- la nécessité de trouver un site géographique adapté, réunissant deux bassins superposés, rend la construction de nouvelles STEP de plus en plus difficile et coûteuse. Les meilleurs sites sont utilisés en premier, d'où une raréfaction des capacités disponibles et une augmentation des coûts de construction.
- problématiques d'acceptation sociétale, inhérentes à toute nouvelle mise en eau de réservoirs coût des aménagements.

- La centrale STEP de l'île d'El Hierro « **Canaries, Espagne** » représente un meilleur exemple de cette technique, elle permet d'assurer l'autonomie électrique de l'île et d'éviter l'importation de **6000 tonnes de pétrole** par an. La centrale est constituée de 5 éoliennes « **11,2 MW** », de deux bassins« bassin inférieur de 50 000 m³ et bassin supérieur 700 mètres plus haut de 550 000 m³ » de turbines hydrauliques « **11,3 MW** » pour le pompage et le turbinage. Les éoliennes et les turbines peuvent produire de l'électricité simultanément pour gérer les pics de consommation.

B- Stations de stockage par air comprimé « Compressed Air Energy Storage CAES »

- Les stations de stockage par air comprimé sont conçues, tout simplement, pour stocker de l'air comprimé « sous forme de pression dans des cavités souterraines au lieu du pompage de l'eau », grâce à un compresseur, en heure creuse. Cet air est libéré pour faire tourner des turbines qui produisent de l'électricité, pour le délivrer en heure de pointe.
- Aujourd'hui, deux installations liées à des cavités salines sont en fonctionnement, une à Huntorf « Allemagne » de **290 MW** fonctionne depuis 1978 et la seconde à McIntosh en Alabama « Etats- Unis » de **110 MW** fonctionne depuis 1991.
- Le rendement des CAES est malheureusement réduit « inférieur à 50% » car la chaleur des gaz post- compression est perdue. Afin d'en améliorer la performance, des systèmes de stockage thermique sont en cours de développement afin de récupérer la chaleur « stockage adiabatique ».

C- CAES adiabatiques avancées AA-CAES « Advanced Adiabatic CAES »

- Le système CAES adiabatique a été étudié à **Université technique de Clausthal** en Allemagne, dont le principe est d'éviter la perte de chaleur, mais il n'existe pas un réservoir capable de supporter à la fois une forte pression et une forte température, cependant, ce système n'est jamais expérimenté.
- Le principe du AA-CAES reprend cette idée, mais propose deux réservoirs, un réservoir permettant de stocker l'air comprimé « semblable aux réservoirs des CAES conventionnels » et d'un système de stockage thermique récupérant la chaleur de l'air comprimé. En phase de déstockage, cette chaleur est restituée à l'air comprimé avant le passage dans la turbine. Les CAES adiabatiques avancées atteignent grâce à ce système une efficacité de l'ordre de 70%.
- Les stations AA-CAES nécessitent encore un effort de recherche pour diminuer les coûts du stockage thermique. La plus grande station CAES dans le monde est en construction à Ohio « Etats-Unis », de puissance 0.8 à 2,7 GW avec 16h de stockage et une pression de l'ordre de 55 à 110 bars et un réservoir « une cavité d'un minée de calcaire » de profondeur de 670 m.

Note : un processus est dit adiabatique lorsque les deux systèmes qui le composent n'échangent pas de chaleur entre eux.

– Chiffres clés

- puissance : 10 à 300 MW ;
- production annuelle : de 10 MWh à 10 GWh ;
- temps de réponse (temps nécessaire pour faire passer le système d'un état de stockage sans décharge à une décharge à pleine puissance) : quelques minutes ;
- efficacité : ~50 % pour les systèmes conventionnels, ~70 % pour les adiabatiques et ~95% pour les isothermes (pour le système détenteur / compresseur);
- durée de vie : potentiellement supérieure à 30 ans ;

– Zone d'utilisation

- Il existe actuellement dans le monde quelques CAES, en production. Citons :
 - Huntorf en Allemagne : **290 MW** en 1979, utilisant une mine de sel, 3h de stockage ;
 - Alabama au USA : **110 MW** en 1991, utilisant une mine de sel, 26h de stockage ;
 - Hokkaido au Japon : **2 MW** en 2001, utilisant une mine de charbon, 4h de stockage ;
 - New Hampshire au USA : **1 MW** en 2011 en surface, 4h de stockage ;
 - Hydrostor au Canada : **1 MW** en 2013 en sous-marin, 4h de stockage ;
 - Texas au USA : **2 MW** en 2014, utilisant une mine de sel, 16h de stockage ;
- En construction citons :
 - ADELE en Allemagne : **90 MW** prévus en 2018, utilisant une mine de sel, 4h de stockage ;
 - Californie au USA : **300 MW** prévus en 2021, utilisant une mine de sel, 10h de stockage ;
 - Ohio au USA : **2 700 MW**, utilisant une mine de calcaire 16h de stockage.

D- Volants d'inertie

- Les volants inertiels sont longtemps utilisés pour la régulation des machines à vapeur. Aujourd'hui, leur principe permet de stocker l'énergie sous forme de rotation mécanique. L'électricité fait tourner à très grande vitesse une masse autour d'un axe cylindrique dans un caisson isolé, qui permet de convertir l'énergie électrique « dans le cas de surplus de production » en une énergie cinétique. Cette énergie cinétique conservée peut être ensuite récupérée sous forme d'électricité grâce à un alternateur « principe de la dynamo ».

Les volants d'inertie

| avantages | Inconvénient |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none">➤ Haut rendement « environ 80% »,➤ Phase de stockage très rapide « par rapport à une batterie électrochimique »,➤ Temps de réponse très court « permet de réguler la fréquence du réseau »,➤ Aucune pollution « sans combustible fossile et produits chimiques »,➤ Technologie fiable « peu d'entretien ». | <ul style="list-style-type: none">➤ Temps de stockage Limité « environ 15 minutes ». |

Les deux plus grandes installations de volantes inerties sont aux États-Unis, d'une puissance de 20 MW chacune.

- **Note** : le stockage d'énergie par volant d'inertie ne permet pas d'obtenir une durée importante de stockage comme les [STEP](#) ou [les CAES](#). Néanmoins, il est utile pour la régulation et l'optimisation énergétique d'un système.

II. 2. 2. 2. Mode de stockage chimique

Le principe de ce mode de stockage d'électricité repose sur la conversion de l'énergie chimique en énergie électrique, concerne principalement les batteries et le vecteur hydrogène.

- **A- Batteries**
- Le stockage d'électricité s'effectue grâce à des réactions électrochimiques qui consistent à faire circuler des ions et des électrons entre deux électrodes. Les composants chimiques peuvent être différents d'une technologie à une autre, créant ainsi une grande variété de batteries.
- Les batteries utilisées pour le stockage massif à ce jour, ce sont surtout les batteries à flux, qui font l'objet de la majorité des études. L'utilisation des batteries au plomb, au sodium ou au lithium-ion se situe plutôt à l'échelle d'un bâtiment ou d'une petite collectivité où elles permettent d'optimiser la gestion de sources d'énergie renouvelables, solaire ou éolienne « ou autre », notamment pour le lissage de la charge journalière en stationnaire. Elles peuvent délivrer une puissance pendant quelques heures ou sur plusieurs jours et résister à un certain nombre de cycles de charge/décharge.

Batteries à flux

- Ces batteries sont des batteries rechargeables, permettent le stockage des couples électrochimiques « électrolytes » à l'extérieur de la cellule de réaction, dans des réservoirs séparés par une membrane, à l'état liquide. Les électrolytes circulent à travers une cellule d'échange d'ions. **On trouve différentes technologies des batteries à flux.**
 - Technologie redox reduction-oxydation « technologie conventionnelle NASA en 1976 ».
 - Technologie Hybride
 - Technologie sans-membrane
 - Technologie organique
 - Technologie à nanoréseaux
 - Densité énergétique
- Les batteries à flux représentent les avantages de **pouvoir rapidement recharger** « le système remplace les électrolytes par des réservoirs ». Elles peuvent supporter plus de 10 000 cycles de charge de plus l'effet d'autodécharge est quasiment nul. Contrairement, **la présence des réservoirs et la nécessiter d'utiliser un système de circulation** « pompe, capteurs,...etc. » représentent les inconvénients majeurs de ces batteries.

- **Batteries lithium-ion "avancées"**

Le fonctionnement de la batterie lithium-ion repose sur l'échange réversible de l'ion lithium entre une électrode positive et une électrode négative. Ainsi, on peut citer à titre d'exemple, le système le plus important, à ce jour, qui se trouve à Zhangbei « Chine » en 2011, de capacité de 20 à 36 MW sur 4 à 6 h avec une production éolienne de 100 MW et une production solaire de 40 MW.

- **Batteries Zn-Br**

Ces batteries sont fondées sur le couple zinc/brome « Zn^{+}/Br^{-} ». Plusieurs démonstrateurs ont été réalisés, on peut citer à titre d'exemple un système de 400 kWh réalisé à Akron « Michigan » USA, quelques installations commerciales sont aujourd'hui opérationnelles.

B- Vecteur hydrogène

- L'hydrogène ne représente pas une source d'énergie directe comme l'énergie éolienne à titre d'exemple, mais un vecteur énergétique. Il ne se trouve pas sous forme pure dans la nature, mais doit être extrait de l'eau « H_2O » par électrolyse. Le gaz d'hydrogène peut être directement utilisé « comme combustible » ou bien stocké et converti de nouveau en électricité « par une pile à combustible ».
- Le principe de la pile à combustible, est de convertir l'énergie chimique en énergie électrique à partir de l'hydrogène qui sera utilisé comme carburant. Cette pile ne rejette que de l'eau, donc ne pollue pas. L'électrolyse de la pile exige des métaux rares et précieux en plus les difficultés d'industrialisation augmentent le prix du dispositif, qui reste trop élevé et entraîne des problèmes de stockage. Le rendement global est moins de 50% et leur durée de vie s'avère insuffisante dans le cadre d'applications couplées au réseau électrique. En bref, le progrès de cette technique n'est pas pour demain.

II. 3. Stockage thermique « de la chaleur »

- Le développement du stockage thermique est lié directement au développement des [fermes solaires thermodynamiques](#). Le stockage de cette chaleur solaire thermodynamique permettrait de réduire les effets de son intermittence et du décalage entre les périodes les plus productives « le jour/l'été » par rapport aux périodes de plus grandes demandes « le soir/l'hiver ». Ce stockage concerne principalement le chauffage « ou la climatisation » des bâtiments. Tout matériau possède la capacité de libérer ou de stocker la chaleur via un transfert thermique. Ce transfert peut être :

A- Stockage par chaleur sensible:

- L'élévation de la température d'un matériau permet de stocker de l'énergie sous forme de chaleur. C'est le cas, par exemple, d'une pierre posée près d'une cheminée, une fois qu'elle a emmagasiné la chaleur, elle peut être déplacée et céder sa chaleur. Ce principe est le même, pour les chauffe-eau solaires : ils récupèrent la chaleur dans la journée pour la restituer ensuite, avec un rendement moyen de l'ordre de 40% pour les systèmes les plus récents. Les matériaux privilégiés sont l'eau, l'huile de synthèse, la roche ou encore le béton.

B-Stockage par chaleur latente

- Ce mode de stockage est basé sur les **m**atériaux à **c**hangement de **p**hase « **MCP** », ces matériaux stockent de l'énergie lorsqu'ils changent leur état « par exemple solide-liquide ». La transformation inverse permet de libérer l'énergie accumulée sous forme de chaleur ou de froid, avec un rendement d'environ 60%. Plusieurs types de ces matériaux « organiques '**acides gras et paraffines**' ou inorganiques '**sels hydratés**' » servent de régulateur thermique en fonction de la chaleur apportée par le soleil, pour tempérer les bâtiments.
- Il n'existe pas à ce jour d'installations de stockage de grandes capacités basées sur ce principe mais de nombreux projets sont en cours.