

L'hydrogène et le stockage d'électricité

BOUDRIES Rafika Directrice de Recherche
Division Hydrogène Energies Renouvelables - CDER
E-mail: r.boudries@cder.dz

Le stockage de l'énergie consiste à mettre en réserve une quantité d'énergie ou d'une substance d'énergie équivalente pour une utilisation ultérieure. Il permet une grande flexibilité du système électrique et une gestion optimale des aléas du réseau système électrique. En effet ce stockage peut contribuer à l'équilibre du système électrique sur des périodes courtes, là où il y a déséquilibre momentané entre l'offre et la demande d'énergie.

La nature du stockage dépend de l'utilisation de l'énergie après le stockage. Cette utilisation peut être d'origine stationnaire (gestion de réseau électrique par exemple) ou d'origine mobile (alimentation d'une voiture électrique par exemple).

Avec les énergies conventionnelles, le stockage répond à un souci d'équilibrage du réseau électrique où l'offre doit continuellement s'adapter à la demande qui dépend principalement de l'heure de la journée, des conditions climatiques et de la saison. Il peut aussi s'avérer nécessaire pour les foyers isolés situés dans les zones enclavées éloignées du réseau électrique.

Avec l'avènement de la transition énergétique et le recours massif aux énergies renouvelables ainsi qu'à l'introduction des systèmes autonomes et des mini-réseaux, le rôle de stockage d'énergie s'est élargi pour inclure le souci de la non-disponibilité et du caractère intermittent des énergies primaires utilisées pour la production d'électricité et de l'équilibre du réseau. Les énergies renouvelables, particulièrement l'énergie solaire et l'énergie éolienne, sont de nature diffuse et surtout intermittente. Elles dépendent des conditions climatiques et sont variables au cours de l'année. Toutefois, portées par la volonté de développer une énergie électrique durable et écologique, les énergies renouvelables ont assuré une forte pénétration dans le secteur énergétique, permettant ainsi l'essor des moyens de stockage.

Le stockage est aussi et surtout nécessaire dans le cas où l'électricité est produite à partir d'un mix énergétique, ce qui est le cas dans la transition énergétique. La stratégie réside dans le stockage de l'électricité produite à partir d'une source primaire temporairement en excès durant les heures de basse consom-

mation, tel que le solaire durant le jour, et de la mettre à disposition durant les heures de forte demande ou au moment où la ressource n'est plus disponible.

Ainsi, l'équilibre continu entre une offre intermittente et une demande fluctuante, condition nécessaire pour le réseau de transport et de distribution électrique, exige dans les dispositifs de production et de distribution de moyens de stockage adéquats. Ces moyens de stockage jouent le rôle de tampons entre une ressource intermittente de production et une demande de consommation dont les fluctuations ne sont pas nécessairement en phase avec ceux de la production.

En un mot on peut dire que la maîtrise des technologies de stockage pour assurer non seulement l'adéquation entre l'offre et la demande mais aussi une bonne gestion technique et une rentabilité économique du réseau électrique est devenu une condition incontournable au succès de la transition énergétique et au recours massif aux énergies diffuses et intermittentes que sont les énergies renouvelables.

Le stockage joue un rôle central dans l'optimisation de l'adéquation offre-demande. Parmi les contributions du stockage à la gestion du réseau :

- Il permet de transférer les besoins en énergie des heures de faible consommation aux heures de haute consommation Afin d'éviter l'usure des équipements de production d'électricité suite aux actions répétées de démarrages et d'arrêts pour équilibrer l'offre et la demande.
- Il permet aussi une meilleure gestion de la réserve primaire en se substituant pour la fourniture de cette réserve aux installations de production d'urgence qui sont sous-utilisés.
- Il assure aussi la sécurité du réseau en réagissant rapidement, évitant ainsi le délestage et les coupures de courant.

Il est à noter que le stockage de l'énergie électrique est difficile sous forme électrique. La stratégie de son stockage réside principalement à transformer l'énergie électrique en une autre forme d'énergie, plus apte à être conservée et la reconstituée ultérieurement. L'électricité peut être stockée d'une manière réversible sous différentes formes suivant différents procédés et différentes techniques.

Suivant le procédé mis en œuvre, on distingue quatre classes de systèmes de stockage.

Il y a les procédés mécaniques comprenant les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP), le stockage d'énergie par air comprimé (CAES) et les volants inertiel. Les procédés électrochimiques incluent, entre autre, les batteries et l'hydrogène. Les supra-conducteurs et les supraconducteurs (SMES) sont les techniques de stockages basées sur les procédés électromagnétiques. Finalement, on a les procédés thermiques où l'énergie est stockée sous forme de chaleur sensible ou de chaleur latente.

La technologie de stockage par STEP représente 98 % des technologies actuellement utilisées pour le stockage de l'énergie électrique. Les autres technologies, aussi actuellement utilisées, incluent les batteries (principalement à lithium, à sodium/souffre et à plomb) et dans une certaine mesure la technologie de stockage par air comprimé (CAES). Parmi ces technologies, on a :

Stations de transfert d'énergie par pompage (STEP) :

Les STEP permettent la conversion de l'énergie électrique en énergie potentielle. Le principe d'une STEP est simple. Elle est composée de deux retenues à différents niveaux reliées par un canal. Pendant la période de surproduction, le surplus électrique est utilisé pour pomper l'eau de la retenue inférieure vers la retenue supérieure. Durant la période de grande demande, l'eau s'écoule de la retenue supérieure vers la retenue inférieure par gravité, alimentant ainsi les turbines qui produisent l'électricité. Si les retenues sont en général des lacs et des étangs, les STEP peuvent aussi utiliser la mer comme retenue.

La STEP marine à Okinawa au Japon en est un exemple.

Les STEP sont basées sur une technologie de stockage éprouvée qui a atteint la maturité économique. Il y a plus de 400 STEP réparties à travers le monde. Ces STEP englobent 99 % des capacités de stockage de l'électricité. Certaines d'entre elles, telles que celles de Bath Country aux USA (3 GW) et de Guangzhou (2.4 GW) et d'Huizhou (2.4 GW) en Chine, atteignent des puissances de l'ordre du GW.

Les STEP sont associées aussi bien avec les centrales électriques conventionnelles qu'avec les systèmes de production d'électricité renouvelable. A titre d'exemple, il y a la centrale d'El Hierro aux îles Canaries, Espagne, où une STEP est utilisée pour le stockage du surplus de l'énergie électrique produite par une ferme d'éoliennes.

Bien qu'offrant un rendement de stockage élevé et peu de maintenance, les STEP souffrent de limites géographiques et de coûts élevés des installations. Leurs éloignements des centres de consommation exigent aussi des moyens de transports et de distribution aggravant ainsi les coûts des investissements.

Finalement, il y a aussi le problème de l'impact environnemental à cause de la construction des retenues.

Stockage d'énergie par air comprimé (CAES) :

Le CAES est une technologie ayant des caractéristiques similaires à celles des STEP. Elle est en plein développement. Le principe du CAES est basé sur la conversion de l'électricité en air comprimé. Par moyen de compresseurs à très haute pression (jusqu'à 300 bars), l'excès d'électricité est utilisé pour compresser et stocker l'air dans des cavités naturelles ou artificielles. L'électricité est restituée au moment de grande demande par la libération de l'air comprimé pour faire tourner des turbines, produisant ainsi de l'électricité. Le stockage électrique par CAES s'accompagne d'échauffement de l'air lors de la compression mais surtout pose le problème de la disponibilité de sites de bonnes étanchéités.

Actuellement on a les CAES classiques où la chaleur générée pendant la compression de l'air n'est pas utilisée. Pour ces systèmes de stockage, l'air comprimé doit être préchauffé avant d'être envoyé à la turbine. Ce sont les CAES qui existent à travers le monde. Il y en a actuellement une dizaine surtout en Allemagne et aux USA.

Des travaux de R&D sont actuellement en cours pour l'utilisation de la chaleur produite durant la compression de l'air. Dans ce sens-là, les CAES adiabatiques (AA-CAES) présentent des avancées technologiques qui ont relancé

l'intérêt pour la technologie CAES.

Le projet ADELE de RWE (Allemagne) est en cours pour tester cette technologie. Dans ce cas deux cavités sont utilisées, l'une pour le stockage de l'air comprimé et l'autre pour le stockage de l'énergie générée par la compression. Lors de la récupération de l'électricité, l'air comprimé est chauffé par la chaleur de compression stockée, augmentant ainsi le rendement du système. D'autres procédés de récupération de la chaleur sont sous considération. C'est le cas des CAES isothermes.

Stockage Inertiel :

Ce mode de stockage permet de transformer l'énergie électrique en énergie cinétique de rotation pendant le stockage et de transformer l'énergie cinétique de rotation en énergie électrique pendant la restitution de l'électricité. Le volant inertiel du système de stockage est constitué d'une masse de forme cylindrique reliée à un moteur/générateur électrique. Pendant la période de basse consommation, l'excès d'électricité, en utilisant le moteur électrique, met en rotation le volant qui atteint de grande vitesse de 8000 à 16 000 tours par minutes. Une fois partie, le volant continue à tourner même s'il n'y a plus d'alimentation électrique. Lors de la restitution de l'énergie électrique, utilisant la génératrice électrique, l'électricité est générée, résultant dans un ralentissement de la vitesse de rotation du volant.

Le nombre d'installations à travers le monde reste limité ; la principale étant les deux centrales de 20 MW chacune de Beacon Power (USA). Le principal avantage de cette technologie est sa rapidité, quelques secondes, de mise en service. La technologie du stockage inertiel est plus adaptée aux applications de régulation de fréquence, d'optimisation énergétique des systèmes et d'amélioration de qualité. Toutefois, elle souffre des pertes de charge en raison des phénomènes d'autodécharge et de limite de la durée d'autonomie

Le stockage d'énergie électrique par hydrogène :

L'hydrogène présente la particularité d'être aussi bien un produit chimique qu'un vecteur énergétique. En tant que produit chimique, l'hydrogène est à la base de la pétrochimie et de l'électrochimie.

Il joue en effet un rôle important dans le raffinage du pétrole ainsi que dans la production de l'ammoniac. Il est aussi utilisé dans le secteur de la métallurgie de l'électronique et de la pharmacologie. En tant que vecteur énergétique, l'hydrogène peut remplacer les énergies conventionnelles dans toutes les applications aussi bien mobiles que stationnaires.

Seules les technologies de l'hydrogène ont la possibilité de stockage massif et respectueux de l'environnement.

Toutefois, il a été trouvé que c'est surtout dans les applications mobiles et de stockage de l'énergie électrique que l'hydrogène peut jouer un rôle central. En effet, avec l'avènement de la transition énergétique et la forte pénétration des énergies renouvelables pour assurer un développement propre et durable, une opportunité s'est ouverte pour l'hydrogène. L'utilisation des énergies intermittentes mène, vis-à-vis de la demande, à des périodes d'excédents et à périodes de déficits de production électrique.

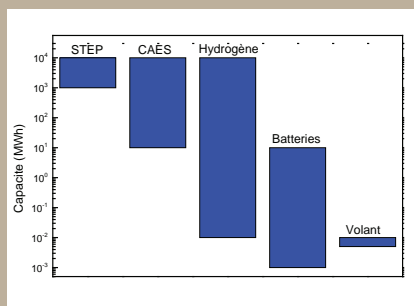
L'hydrogène, en tant qu'élément de stockage, est le mieux indiqué pour équilibrer l'offre et la demande.

Le procédé de stockage par hydrogène consiste en la génération d'hydrogène en utilisant l'excès d'énergie électrique. Cette génération peut être menée par l'un des nombreuses technologies de production d'hydrogène. Cette technologie peut être la dissociation de l'eau par électrolyse.

L'hydrogène généré peut être stocké sous forme de gaz comprimé, sous forme liquide ou sous forme d'hydrure. Pour la restitution de l'énergie électrique stockée, différentes techniques peuvent être utilisées :

- L'électricité est générée à partir d'une pile à combustible.
- L'électricité est générée en utilisant une centrale à gaz fonctionnant avec l'hydrogène
- Il y a d'abord une méthanation de l'hydrogène stocké. Ceci mène à une production de méthane. Ce méthane est alors utilisé dans une centrale à gaz conventionnelle pour la génération d'électricité.

Figure 1:



Capacité de stockage d'énergie électrique.

Actuellement plusieurs projets sur l'utilisation de stockage d'hydrogène de grande capacité sont en cours.

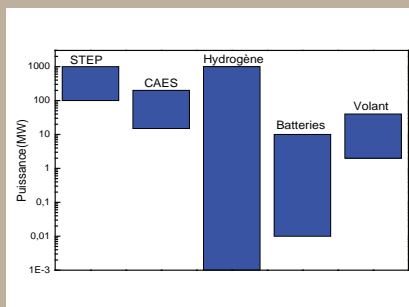
Comparaison des différentes techniques de stockage de l'électricité :

Diverses caractéristiques peuvent être utilisées pour comparer la convenance d'une technologie à stocker l'énergie électrique. Parmi ces caractéristiques, on a :

La capacité de stockage :

Figure 1 montre les capacités de stockage des

Figure 2:



Puissance mobilisable de stockage d'énergie électrique.

technologies les plus prometteuses de stockage de l'énergie électrique. On voit de cette figure que l'hydrogène présente non seulement la plus grande capacité, mais que cette capacité s'étend sur une vaste plage, allant de 10 kWh à 10 GWh.

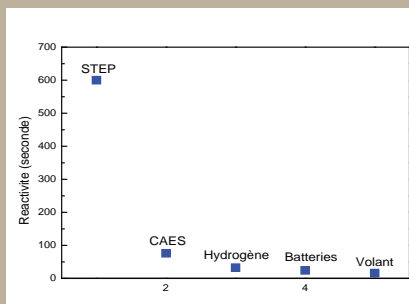
La puissance mobilisable :

Figure 2 représente les puissances des technologies de stockage d'énergie électriques considérées précédemment. Là aussi, on voit que l'hydrogène possède non seulement la puissance la plus élevée mais que la gamme de puissance s'étend sur une large plage.

La réactivité :

cette caractéristique, comme elle définit la capacité de réaction du système, est importante lors de l'ajustement rapide de puissance.

Figure 3:



Réactivité de systèmes de stockage d'énergie électrique.

Figure 3 montre les réactivités des technologies de stockage sous considération.

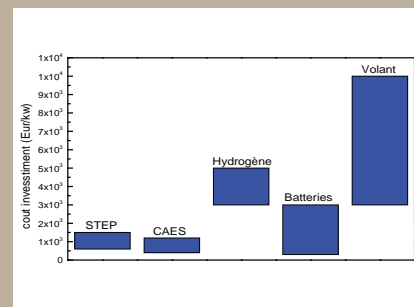
On voit que la réactivité des systèmes de stockage d'énergie électrique utilisant la filière hydrogène est très courte. Elle est 6000 fois plus courte que celle des STEP et 600 fois plus courte que celle des batteries et des volants d'inertie.

Coût d'investissement :

C'est un facteur très important dans l'évaluation de la compétitivité économique des systèmes.

Figure 4 montre les coûts d'investissement des technologies de stockage d'énergie élec-

Figure 4:



Coût d'investissement des systèmes de stockage d'énergie électrique.

trique sous considération. On que d'un point de vue économique, les technologies ayant atteint la maturité, nommément les STEPS et LES CAES, sont les plus compétitives.

Pour l'hydrogène, un effort doit être consenti dans ce domaine.

Les résultats reportés montrent que de toutes les technologies de stockage de l'énergie électrique, l'hydrogène représente le plus grand potentiel pour la gestion de l'énergie électrique dans la transition énergétique. Il a été reporté que seules les technologies de l'hydrogène ont la possibilité de stockage massif et respectueux de l'environnement.

L'intérêt dans l'utilisation de l'hydrogène en tant qu'élément de stockage réside dans le fait que :

- L'hydrogène peut être facilement stocké sous différentes formes (gaz comprimé, liquide ou hydrure) et transporté sur de longues distances.
- Il y a une grande flexibilité dans l'utilisation de l'hydrogène stocké : pile à combustible, méthanation, combustion directe, etc.
- Il y a une possibilité de découplage énergie-puissance : la capacité en énergie dépend de la taille du réservoir de stockage de l'hydrogène, tandis que la capacité de puissance en production ou en utilisation dépend de l'électrolyseur ou de la pile à combustible par exemple.
- L'énergie générée pendant la production (cas de l'électrolyseur) ou l'utilisation (cas de la pile à combustible) peut être utilisée pour augmenter l'efficacité du système.

Références

1. B. Robyns, B. François, G. Delille, C. Sandemont, Gestion et valorisation du stockage de l'énergie dans les réseaux électrique, Ed. ISTE 2015.
2. T. M. Gür, Review of electrical energy storage technologies, materials and systems: challenges and prospects for large-scale grid storage, Energy and Environment Science 11(2018)2696.
3. M. S. Guney, Y. Tepe, Classification and assessment of energy storage systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews 75(2017)1187-1197.