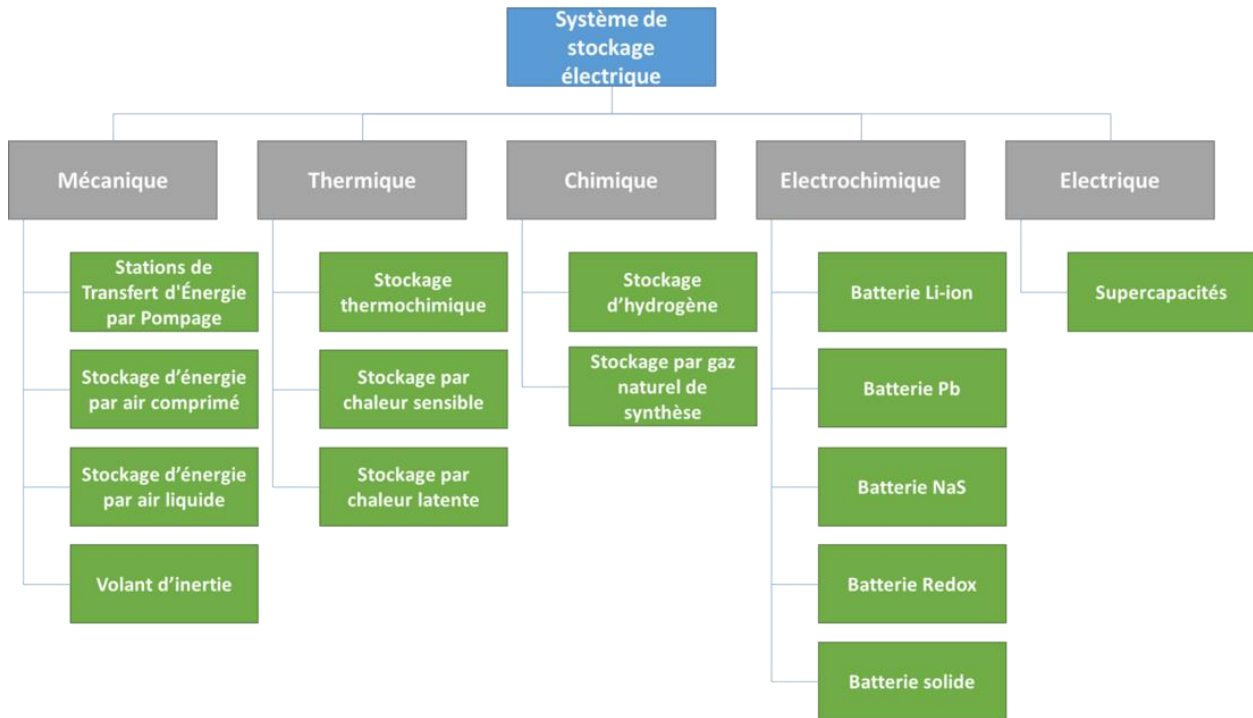


Les différentes technologies stationnaires de stockage de l'électricité

Les solutions de stockage d'énergie se divisent en quatre catégories :

- Mécanique (barrage hydroélectrique, Station de transfert d'énergie par pompage - STEP, stockage d'énergie par air comprimé – CAES, volants d'inertie),
- Electrochimique (piles, batteries, vecteur hydrogène),
- Électromagnétique (bobines supraconductrices, super-capacités),
- Thermique (chaleur latente ou sensible).



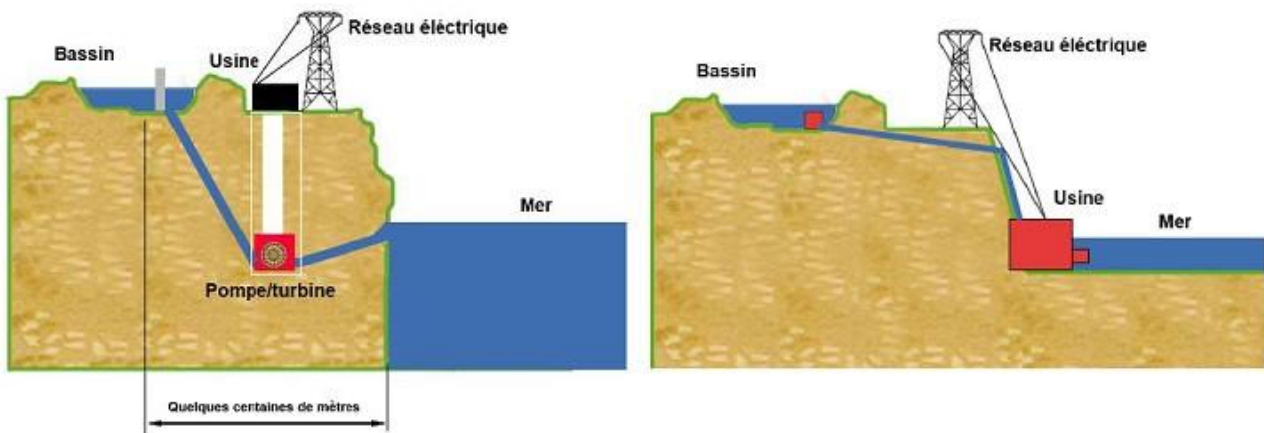
Principales technologies de stockage de l'électricité. Source : CGE d'après Conseil mondial de l'énergie, 2017.

1. Stockage mécanique

1.1. Station de pompage

Les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP) sont des technologies de stockage par gravitation. Elles sont composées de deux retenues d'eau à des hauteurs différentes reliées par un système de canalisations. Elles sont équipées d'un système de pompage permettant de transférer l'eau du bassin inférieur vers le bassin supérieur en heures creuses. En heures pleines, la station fonctionne comme une centrale hydroélectrique classique.

Schéma de principe d'une STEP marine



Fonctionnement d'une installation gravitaire

Source : Bernard Multon et Jacques Ruer – Stocker l'électricité : oui c'est indispensable et c'est possible

La taille importante des installations permet de stocker de grandes quantités d'énergie, jusqu'à plusieurs jours de production en fonction de la taille des réservoirs, et d'importantes capacités de puissance mobilisables en quelques minutes, de quelques dizaines de mégawatts à plusieurs gigawatts en fonction de la hauteur d'eau.

Les STEP peuvent également être installées en façade maritime, avec la mer comme retenue inférieure et une retenue amont au sommet d'une falaise ou constituée par une digue. Il existe aujourd'hui une STEP marine à Okinawa au Japon et, en France, EDF SEI a des projets à La Réunion, la Guadeloupe et en Martinique.

Les stations de pompage jouent un rôle important en période de pointe et sont un élément fondamental de sécurité du réseau dans la mesure où leur production est mobilisable en quelques minutes.

La France compte sur son territoire 4 300 MW de capacités de STEP (Source Projet de PPE janvier 2020). La dernière STEP a été mise en service en 1987 et il n'y a pas aujourd'hui, en métropole, de nouvelles capacités en construction.

La programmation pluriannuelle de l'énergie prévoit d'augmenter les capacités d'énergies hydroélectriques de 500 et 800 MW sur la période 2018-2023. Les STEP sont un moyen de passer les pointes sans faire appel à des centrales plus émettrices en CO₂.

Cependant, les projets hydroélectriques peuvent avoir des impacts environnementaux significatifs qui freinent l'acceptabilité de nouveaux ouvrages.

1.2. Stockage d'énergie par air comprimé

Les installations de stockage d'énergie par air comprimé (Compressed Air Energy Storage - CAES) de grande puissance consistent, en utilisant l'électricité disponible à bas coût en période de faible consommation, à stocker de l'air dans des cavités souterraines (ancienne mine de sel ou caverne de stockage de gaz naturel) grâce à un compresseur. Au moment de la pointe de consommation, cet air comprimé est libéré pour faire tourner des turbines qui produisent ainsi de l'électricité.

Schéma de principe d'une installation de stockage à air comprimé

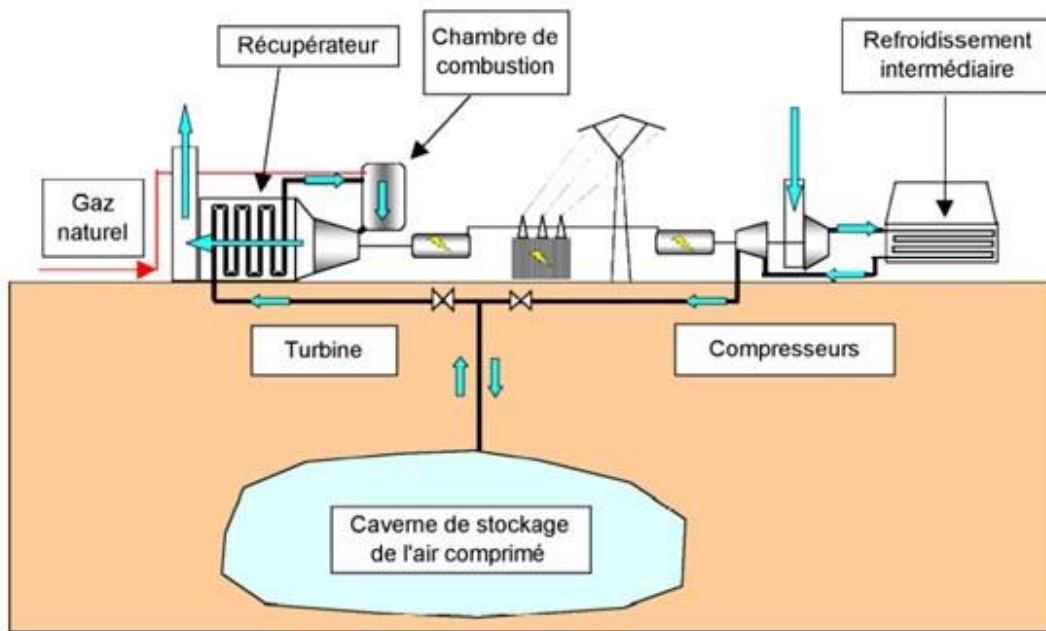


Schéma de principe d'une installation de stockage à air comprimé

Source : Bernard Multon et Jacques Ruer – Stocker l'électricité : oui c'est indispensable et c'est possible

Le rendement des CAES est malheureusement réduit car la compression de l'air s'accompagne d'un échauffement. Afin d'en améliorer la performance, des systèmes de stockage thermique sont en cours de développement afin de récupérer la chaleur (stockage adiabatique).

Des projets industriels sont en cours d'étude au Royaume-Uni en vue d'une intégration sur les réseaux.

1.3. Stockage inertiel

Longtemps utilisé pour la régulation des machines à vapeur, le principe du volant d'inertie permet aujourd'hui de stocker temporairement l'énergie sous forme de rotation mécanique.

Un volant d'inertie est constitué d'une masse (anneau ou tube) en fibre de carbone entraînée par un moteur électrique.



L'apport d'énergie électrique permet de faire tourner la masse à des vitesses très élevées (entre 8 000 et 16 000 tour/min) en quelques minutes. Une fois lancée, la masse continue à tourner, même si plus aucun courant ne l'alimente.

L'électricité est donc stockée dans le volant d'inertie sous forme d'énergie cinétique. Elle pourra être restituée en utilisant un moteur comme génératrice électrique, entraînant la baisse progressive de la vitesse de rotation du volant d'inertie.

Les systèmes de stockage par volant d'inertie ont une très forte réactivité et une grande longévité. En effet, ce système peut absorber de très fortes variations de puissance sur de très grands nombres de cycles. Cependant, les volants d'inertie subissent des pertes de charge en raison de phénomènes d'autodécharge et ne permettent pas d'obtenir une durée d'autonomie importante. Ces systèmes sont donc adaptés pour des applications de régulation, d'optimisation énergétique d'un système et d'amélioration de qualité (microcoupures, coupures brèves, etc.).

2. Stockage électrochimique

2.1. Stockage d'énergie grâce à l'hydrogène

Les systèmes de stockage d'énergie grâce à l'hydrogène utilisent un électrolyseur intermittent. Pendant les périodes de faible consommation d'électricité, l'électrolyseur utilise de l'électricité pour décomposer de l'eau en oxygène et en hydrogène, selon l'équation $2 \text{H}_2\text{O} = 2\text{H}_2 + \text{O}_2$.

Cet hydrogène est ensuite comprimé, liquéfié ou stocké sous forme d'hydrure métallique.

Ensuite, il existe trois moyens différents pour réinjecter de l'électricité sur le réseau à partir de l'hydrogène stocké :

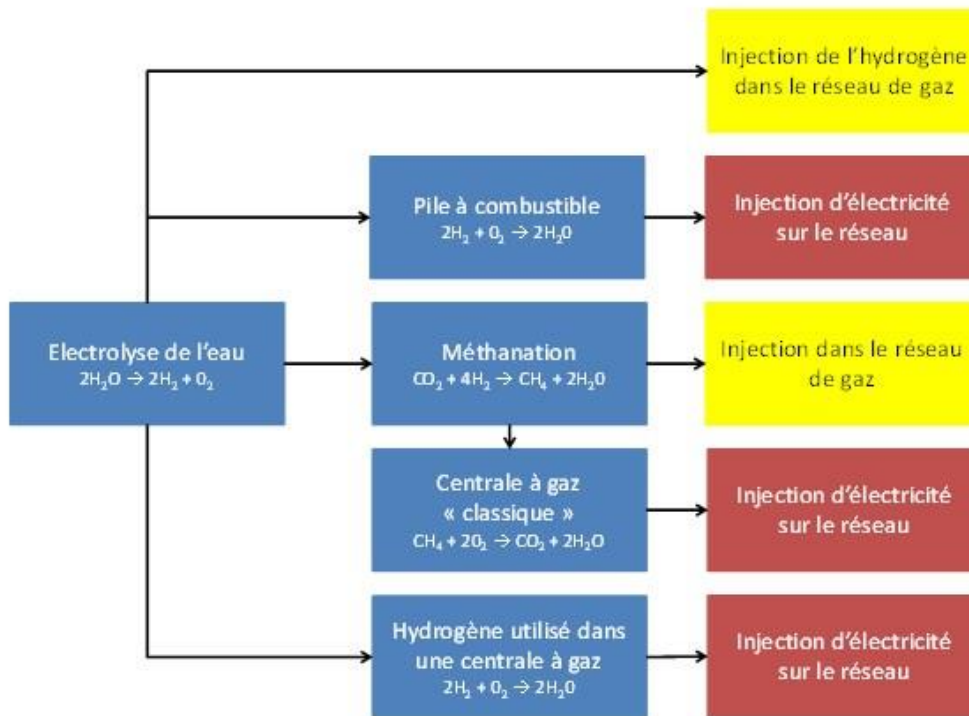
- le premier consiste à alimenter une pile à combustible ;
- le deuxième consiste à synthétiser du gaz naturel selon le procédé de la méthanation. Ce gaz peut être injecté directement dans le réseau de gaz existant ou être utilisé pour alimenter une centrale à gaz « classique », produisant de l'électricité ;
- le troisième consiste à utiliser l'hydrogène directement dans une centrale à gaz spécialement conçue à cet effet, afin de fabriquer de l'électricité.

L'intérêt de ce type de système réside :

- dans la grande flexibilité d'usage du vecteur d'hydrogène, qui a pour particularité d'être facilement stocké et transporté, que ce soit sous forme liquide ou gazeuse ;
- et dans le découplage énergie-puissance : en effet, la capacité de puissance en absorption ou en production est dimensionnée par l'électrolyseur ou la pile à combustible. La capacité en énergie est dimensionnée par la taille des réservoirs et peut aller de plusieurs heures à plusieurs jours en fonction de l'application du système (secours, décalage de consommation).

Pendant leur utilisation, les électrolyseurs et les piles à combustible dégagent de la chaleur (entre 20 et 50 % de l'énergie du système selon la technologie), dont la valorisation améliore la rentabilité économique du système. Cette technologie est aujourd'hui au stade du démonstrateur. Le projet de PPE (janvier 2020) prévoit entre 1 à 10 MW de Power-to-gas à l'horizon 2023.

Les différentes possibilités de stockage de l'énergie grâce à l'hydrogène



Les différentes possibilités de stockage de l'énergie grâce à l'hydrogène
(Source : Sénat, Commission d'enquête sur le coût réel de l'électricité)

2.2. Batteries électrochimiques

Les batteries électrochimiques sont conçues par empilement de disques composés de différents types d'éléments chimiques. Il existe ainsi des batteries plomb-acide, nickel-cadmium, nickel-hydrure métallique, lithium-ion, lithium-polymère, lithium-air, sodium-soufre, chlorure de sodium (zebra), etc.

Tableau comparatif des différentes technologies de batteries (source : Avem)

	Pb	Ni-Cd	Ni-Mh	Ni-Zn	Zebra	LMP	Li-ion	Li-Po	LiFePo4	Li-air
Wh/kg	40	60	90	80	120	110	150	190	110	100
Durée de vie (cycles)	500	2000	1500	nc	nc	1800	1000	2000	2000	nc

L'empilement est ensuite relié à un système d'électronique de puissance qui, lors de la décharge, convertit le courant continu des batteries en courant alternatif à la tension, la fréquence et la puissance voulues. Ce système est aussi utilisé dans le sens inverse pour recharger les batteries.

Dans les systèmes de stockage par batteries électrochimiques, les assemblages de batteries sont conçus pour fournir la puissance et la capacité en fonction des usages (par exemple stabilisation des réseaux, alimentation de secours). La capacité de stockage de puissance et d'énergie varie en fonction des technologies. Les principaux avantages des batteries sont leur flexibilité de dimensionnement et leur réactivité. Ces technologies sont désormais matures et font l'objet de déploiement en France et dans le monde. Début 2020 en France, on dénombrait 7 MW de batteries raccordés au réseau et plus de 300 MW en file d'attente.

2.3. Batteries à circulation

Dans les systèmes de stockage par batteries à circulation, deux électrolytes liquides contenant des ions métalliques (couples d'ions métalliques zinc/brome, polybromure/ polysulfure de sodium et vanadium/vanadium), séparés par une membrane échangeuse de protons, circulent à travers des électrodes. L'échange de charges permet de produire ou d'absorber l'électricité.

La puissance produite ou absorbée est dépendante du dimensionnement de la membrane d'échange et des électrodes, tandis que l'énergie stockée est dépendante du volume des électrolytes. A ce jour, seuls des projets expérimentaux sont en cours de développement.

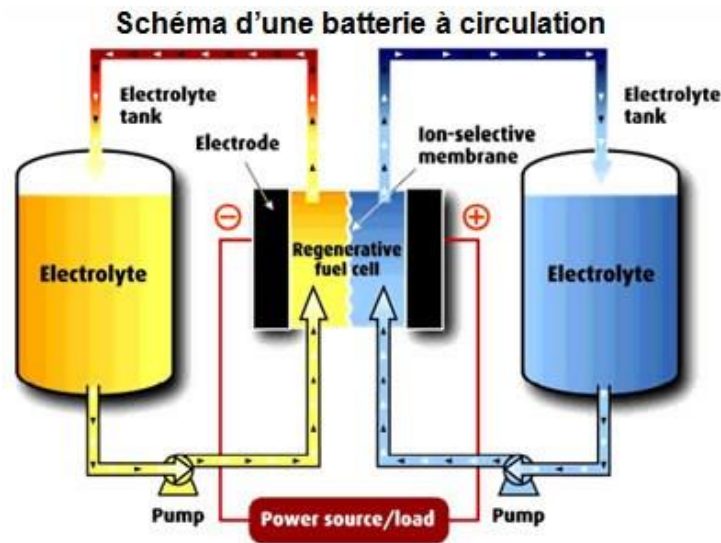
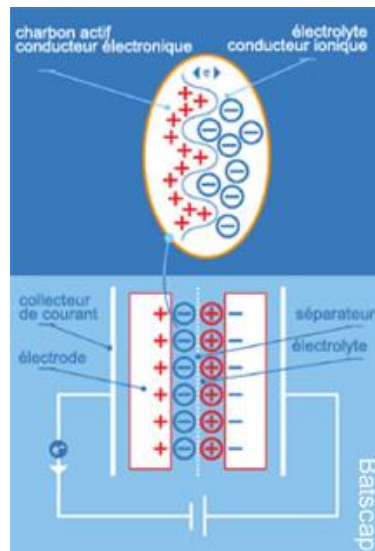


Schéma d'une batterie à circulation Source : Regenesys

3. Stockage électromagnétique

Le principe des super-capacités repose sur la création d'une double couche électrochimique par l'accumulation de charges électriques à l'interface entre une solution ionique (électrolyte) et un conducteur électronique (électrode). A la différence des batteries, il n'y a pas de réaction d'oxydo-réduction.

L'interface entre les charges joue le rôle d'un diélectrique. L'électrode contient du charbon actif de surface spécifique très élevée. La combinaison d'une surface conductrice élevée et d'une épaisseur de diélectrique très faible permet d'atteindre des valeurs de capacité extrêmement élevées en comparaison des condensateurs traditionnels. L'électrolyte limite la tension des éléments à quelques volts. Ces dispositifs de stockage sont utilisés dans certaines installations électriques afin d'améliorer la qualité. Cependant, son développement ne se fait pas à grande échelle.



4. Stockage thermique (chaleur et froid)

Les installations de stockage thermique (chaleur et froid) concernent majoritairement les marchés industriels et tertiaires avec des réalisations de l'ordre de 1 à 10 MW, les réseaux de chaleur, et, dans un autre contexte, des volumes unitaires bien moindres mais à bien plus grande échelle, le marché résidentiel par le biais des ballons d'eau chaude sanitaire (ECS).

Ces installations ont un potentiel important en termes de compétitivité pour les activités tertiaires et industrielles et en matière d'impact sur la demande en électricité à la pointe. En effet, en stockant la chaleur ou le froid en période de faible demande d'électricité, le potentiel de décalage des appels de puissance est important. Sur les réseaux de chaleur, le stockage de chaleur permet d'optimiser le dimensionnement des installations, notamment dans le cadre d'extension de réseaux existants.

Le stockage de chaleur dans les ballons d'eau chaude sanitaire mobilise aujourd'hui un parc de plusieurs millions d'installations, ce qui représente un appel de puissance de plusieurs gigawatts. Cet appel de puissance est prédictible et commandable, ce qui permet de le décaler de manière programmée et à des heures auxquelles le réseau électrique n'est pas en situation contrainte.

Schéma d'une installation de stockage thermique

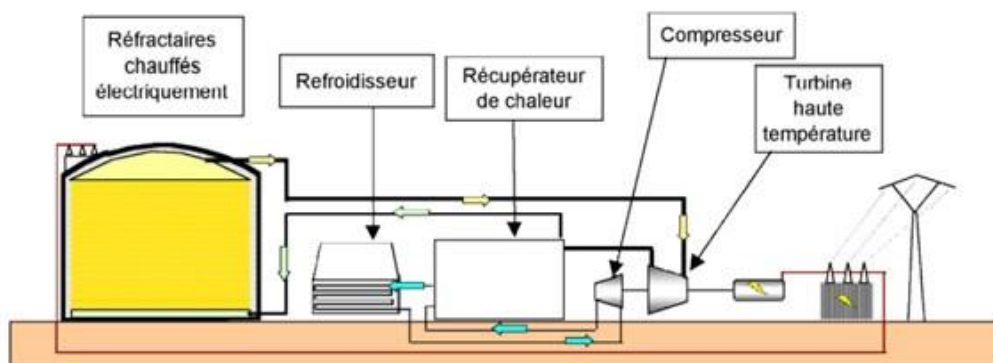
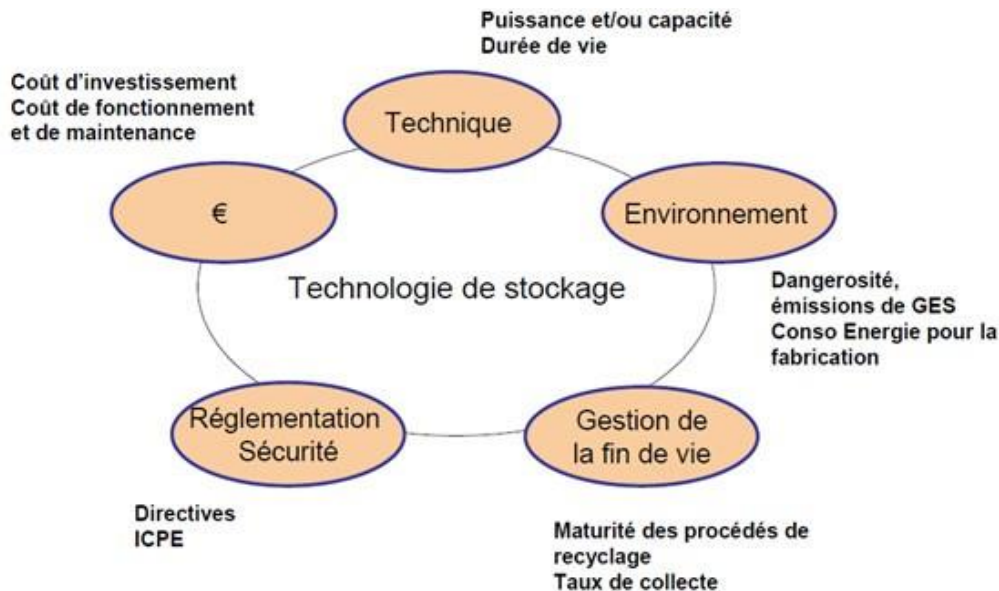


Schéma d'une installation de stockage thermique

Source : Bernard Multon et Jacques Ruer – Stocker l'électricité : oui c'est indispensable et c'est possible

5. Comparaison des différentes technologies de stockage

Les technologies de stockage existantes sont nombreuses et d'autres, encore au stade de la recherche ou de l'expérimentation, se développent. Leur intégration dans les systèmes électriques soulève des interrogations quant au choix de la technologie la plus adaptée aux besoins. En effet, chaque technologie a ses spécificités en termes de taille, de puissance délivrée, de coût, de nombre de cycles et donc de durée de vie, de densité énergétique, de maturité technologique, etc.



Axes de comparaison des différentes technologies de stockage Source : CEA Liten

Ainsi, pour comparer les technologies de stockage et choisir le procédé et le dimensionnement d'un usage particulier, plusieurs facteurs techniques doivent être pris en compte, selon les services que devra précisément rendre l'installation de stockage et en fonction du contexte économique.

En premier lieu, il s'agit de déterminer la localisation et le volume du stockage nécessaire. Faut-il une technologie de stockage diffus (intégration de nombreuses unités de stockage de petite taille sur le réseau de distribution au niveau de la production décentralisée et au plus près de la consommation, dimensionné pour une maison ou un groupe de maisons) ou une technologie de stockage centralisée (quelques unités de stockage de grande dimension type STEP, au niveau des réseaux de transport) ?

Ensuite, différents critères peuvent être utilisés pour choisir la bonne technologie de stockage :

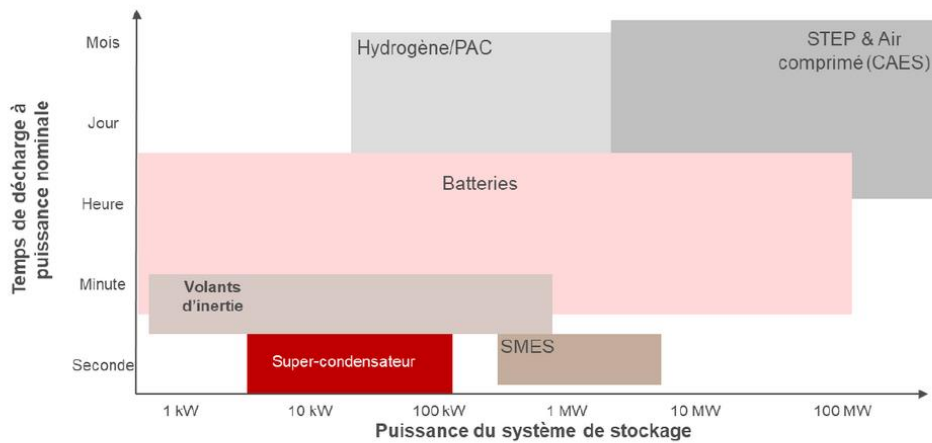
- la puissance disponible et la capacité énergétique. La combinaison de ces deux critères permet de définir le ratio énergie/puissance correspondant au temps de décharge réalisable, souvent caractéristique d'une application particulière ;
- le temps de réaction est un indicateur de la réactivité du moyen de stockage. Il est parfois préférable de définir la vitesse de montée et de descente en charge qui caractérise de manière plus fine le comportement réactif du système ;
- l'efficacité, définie comme rapport entre l'énergie stockée et l'énergie restituée (en MWhOUT/MWhIN) ;
- la durée de vie, qu'il est parfois préférable de définir en nombre de cycles de charge/décharge admissibles pour des technologies comme les batteries ;

- pour d'autres usages, d'autres critères sont à prendre en compte, comme la densité énergétique (en MWh/kg ou en MWh/m³) pour la mobilité par exemple.

D'autres critères sont également à prendre en compte tels que les coûts d'investissement et d'exploitation, les performances et contraintes environnementales et la localisation géographique optimisée pour limiter les pertes induites par l'acheminement de l'électricité. Certaines fois, l'optimum peut même résider dans l'association de plusieurs technologies.

6. Comparaison des différentes technologies de stockage de l'électricité

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

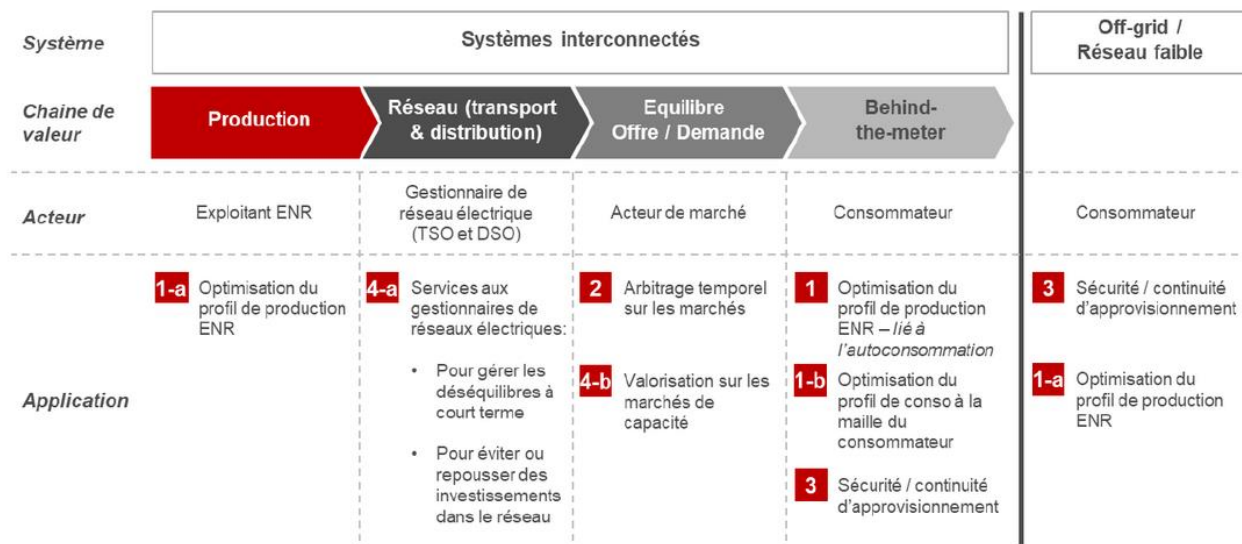


Source : Analyses E-CUBE Strategy Consultants

Comparaison des différentes technologies de stockage
(source : Analyse E-Cube Strategy Consultants pour le Comité de prospective de la CRE)

7. Les services que peut rendre le stockage par batteries au système électrique

Les dispositifs de stockage, de différentes natures, répondent à des besoins de flexibilité variés. Ainsi, au-delà de leur fonction principale de report de charge, qui permet par exemple à un producteur EnR de lisser sa courbe d'injection, ou à un consommateur d'optimiser son profil de consommation en faisant du *Vehicle-to-home*, les dispositifs de stockage d'énergie sont capables de rendre des services au système électrique et aux gestionnaires de réseaux qu'il s'agisse de l'équilibre offre-demande, du réglage de fréquence et de tension, de l'équilibrage ou de la résolution de congestions.



Source : Analyses E-CUBE Strategy Consultants

Services pouvant être rendus par le stockage

(source : Analyse E-Cube Strategy Consultants pour le Comité de prospective de la CRE)

7.1. Pour les producteurs et les consommateurs

En participant à l'équilibre entre l'offre et la demande d'électricité sur les marchés, le stockage peut permettre de lisser les pointes de prix très élevées ou très faibles.

Le stockage peut également être une opportunité pour lisser la courbe d'injection ou de soutirage du réseau, permettant de réduire la puissance de raccordement et d'optimiser le dimensionnement des installations.

7.2. Pour les gestionnaires de réseaux

Les stockeurs d'électricité peuvent rendre des services aux réseaux :

- optimiser les infrastructures en alternative à certains investissements de renforcement du réseau ;
- intégrer davantage de production d'énergie intermittente en s'assurant d'une fourniture stable d'électricité ;
- contribuer à la stabilité du fonctionnement des réseaux : sécuriser les prévisions d'équilibre d'offre / demande en optimisant les capacités de pointe et d'effacement ;
- résoudre certaines congestions ;
- contribuer à la sécurité et la qualité de la fourniture d'électricité aux consommateurs ;
- disposer de services système plus efficaces mettant à profit les performances des moyens de stockage.

7.3. L'utilisation du véhicule électrique comme moyen de stockage

Le développement de la mobilité électrique est un élément clé pour le système électrique. Une voiture est inutilisée 95 % de son temps de vie et l'utilisation moyenne d'un véhicule électrique nécessitera moins de 80 % de la capacité de la batterie pour les trajets quotidiens.

Il sera donc possible pendant les périodes où le véhicule sera branché au réseau électrique d'utiliser l'électricité stockée pour l'injecter sur le réseau en période de forte demande ou, inversement, de charger la batterie du véhicule en heures creuses. Il s'agit du concept du « *vehicle-to-grid* », ou V2G, qui consiste à utiliser les batteries des véhicules électriques comme une capacité de stockage mobile.

Les véhicules électriques pourraient donc représenter une capacité additionnelle de stockage d'énergie, sous réserve que cet usage soit technologiquement et économiquement pertinent : contrairement au stockage de masse de l'énergie, cet usage de la batterie nécessite des cycles de charge et décharge rapides et nombreux, ainsi qu'une forte densité d'énergie.

Pour évaluer la faisabilité de ce concept, plusieurs projets ont pour objectif de définir les futurs cas d'usage du V2G. mesurer en pratique la capacité de stockage qu'offre un parc de voitures électriques pour compléter une production éolienne intermittente. Il s'agit notamment d'étudier le comportement des utilisateurs de véhicules électriques et de les sensibiliser au bon comportement pour recharger leur véhicule.

En pratique, certaines entreprises commercialisent déjà des services de pilotage de la recharge et de V2X.