

STOCKAGE DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

RÉSUMÉ

L'énergie électrique ne se stocke pas facilement, ceci oblige à concevoir un système de production et un réseau de distribution où l'équilibre entre la production et la consommation doit être permanent. Toutefois la possibilité de développer des moyens de stockage revêt une grande importance en particulier pour trois causes principales :

- l'intégration, à grande échelle, dans la production d'électricité des sources renouvelables intermittentes que sont l'énergie solaire et l'énergie du vent,
- le développement du transport électrique routier,
- l'effacement des pointes journalières, en particulier celle du soir en période hivernale.

L'électricité, vecteur énergétique de flux, dont les moyens de stockage direct sont limités doit être transformée en énergie de stock¹ qui pourra être stockée. L'objet de la fiche est de décrire les différents moyens de stockage existants et en cours de développement.

Les différents moyens de stockage sont présentés :

- stockage direct de l'électricité : supercondensateurs, supraconducteurs ;
- stockage de l'électricité sous forme d'énergie chimique : accumulateurs, hydrogène ;
- stockage de l'électricité sous forme d'énergie mécanique : STEP, air comprimé, volant d'inertie.

Les paramètres des différents systèmes de stockage sont évoqués. À partir de ceux-ci il sera nécessaire de faire un choix pertinent du moyen de stockage en fonction de l'utilisation prévue de l'électricité, d'autres caractéristiques auront également leur importance : coût, encombrement, durée de vie...

Les solutions pour développer le transport électrique, stockage embarqué, et celles pour faciliter l'intégration des énergies intermittentes fatales dans la production d'électricité, stockage stationnaire, ne sont pas les mêmes.

Une conclusion s'impose : les solutions de stockage sont multiples et, comme pour la production d'électricité, il est nécessaire d'avoir une diversité de solutions de stockage.

1. INTRODUCTION

L'énergie électrique ne se stocke pas facilement, ceci oblige à concevoir un système de production et un réseau de distribution où l'équilibre entre la production et la consommation doit être permanent. Toutefois la possibilité de développer des moyens de stockage revêt une grande importance [Réf. 1].

Il est important de distinguer deux objectifs distincts pour le stockage : le stockage stationnaire et le stockage embarqué.

- Le stockage stationnaire, connecté au réseau électrique, permet :
 - o la participation à l'équilibre du réseau en fréquence,
 - o l'intégration, à grande échelle, dans la production d'électricité des sources renouvelables intermittentes que sont l'énergie solaire et l'énergie du vent en « lissant » leurs productions et en envisageant un stockage inter-saisonnier,
 - o l'effacement des pointes journalières, en particulier celle du soir en période hivernale.
- Le stockage embarqué permet :
 - o le développement du transport électrique routier,
 - o le développement des objets connectés nomades.

¹ Énergie contenue dans la matière ou sous forme d'énergie cinétique ou potentielle.

Selon les applications les critères de choix seront différents : échelle de temps du stockage (journalier, hebdomadaire, inter-saisonnier), densité d'énergie, priorité à l'énergie ou à la puissance...

L'électricité, vecteur énergétique de flux, dont les moyens de stockage direct sont limités, doit être transformée en énergie de stock qui sera pilotable.

L'objet de cette fiche est de décrire les différents moyens de stockage existants et en cours de développement.

La figure 1 illustre les différentes possibilités de stockage, soit sous forme directe, soit sous forme d'énergie de stock, chimique ou mécanique.

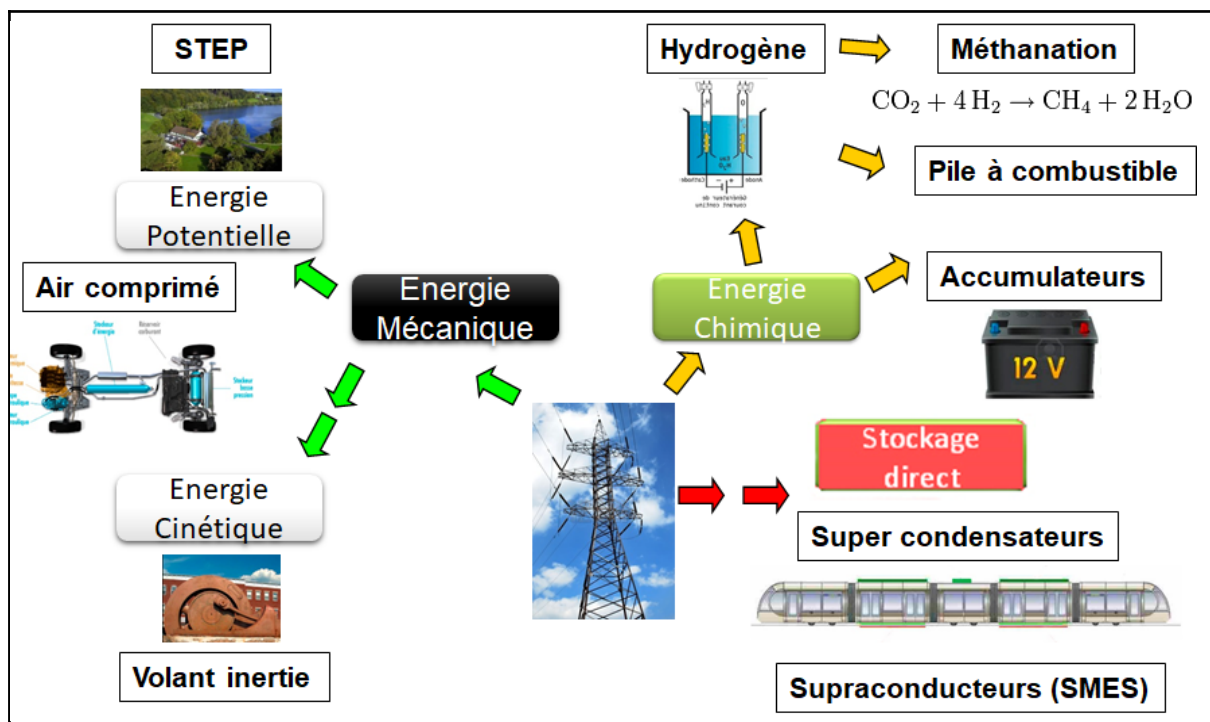


Figure 1 : Stockage de l'énergie électrique

Une notion importante à prendre en compte est l'équivalence d'énergie, pour stocker 11,6 kWh (1/1000^{ème} de tep²) il faut :

- 300 kg de batterie au plomb,
- 50 kg de batterie lithium,
- 8,2 l d'hydrogène gazeux à 700 bars ou 4,8 l d'hydrogène liquide,
- une masse de 80 t lancée à 116 km/h,
- un stock de 43 t d'eau qui ferait une chute de 100 m,
- 2 t de supercondensateurs.

Tout système de stockage est caractérisé par plusieurs paramètres :

- la capacité de stockage en Wh (kWh, MWh ou GWh selon la taille),
- la puissance délivrable en W (kW ou MW selon la taille),
- le temps nécessaire au stockage lié à la puissance de charge disponible et admise par le système,
- le temps possible de déstockage lié à la puissance de décharge désirée et admise par le système,
- le nombre de cycles du système de stockage (durée de vie),
- le rendement du système de stockage : énergie restituée par rapport à l'énergie fournie au système,
- la densité énergétique du système de stockage d'où découle son encombrement (volume, masse),
- le coût du stockage du kWh qui doit être calculé à partir des coûts d'investissement et de fonctionnement du système, de la capacité totale du stockage sur sa durée de vie et du rendement du système de stockage³,
- l'impact environnemental des installations et leur acceptabilité.

² tep : tonne équivalent pétrole.

³ Ce paramètre n'est pas traité dans cette fiche.

La figure 2 ci-dessous illustre différents moyens de stocker l'électricité sous forme d'énergie de stock. Elle permet de situer les différents moyens en fonction de deux caractéristiques :

- la puissance nominale en abscisse (échelle logarithmique)
- le temps de décharge en ordonnée (échelle logarithmique)

Cette figure met en évidence la nécessité d'un choix pertinent du moyen de stockage en fonction de l'utilisation prévue de l'électricité, d'autres caractéristiques auront également leur importance : coût, encombrement, durée de vie, impact environnemental...

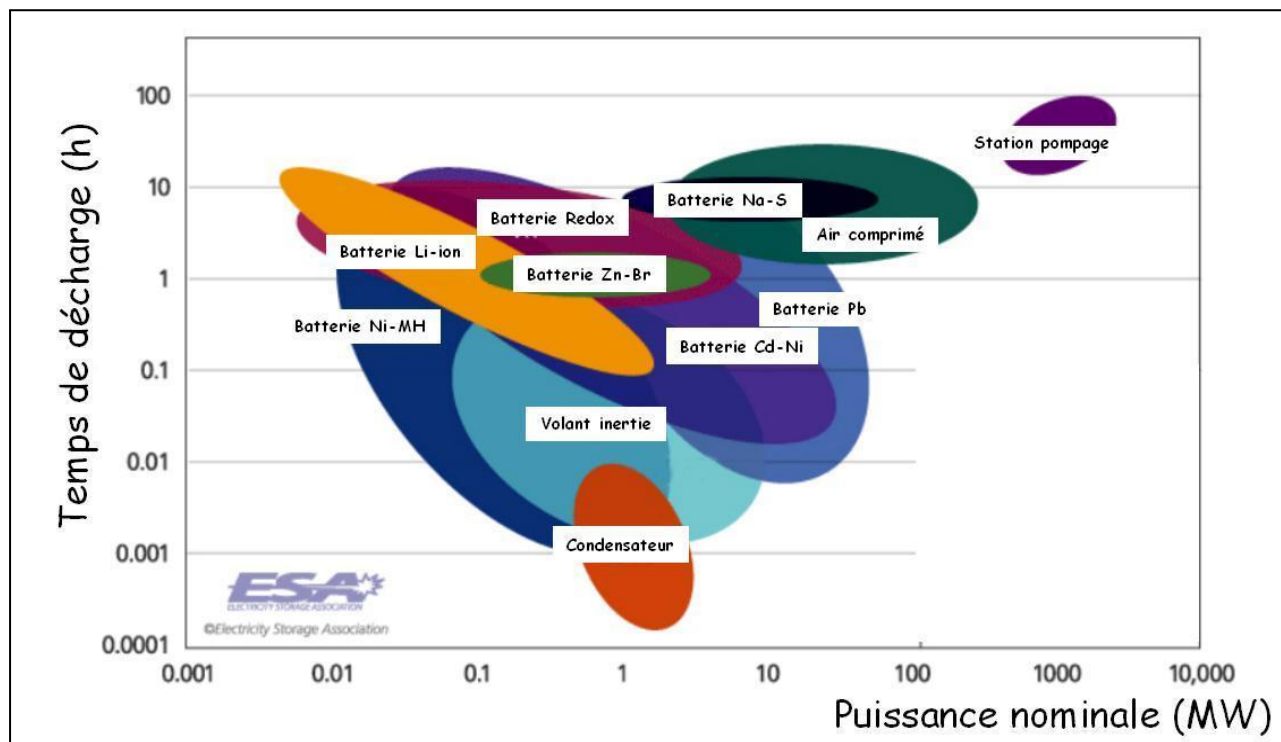


Figure 2 : Différents modes de stockage de l'électricité

2. STOCKAGE DIRECT DE L'ÉLECTRICITÉ

Certains systèmes permettent de stocker directement l'énergie sous forme électrique. Il s'agit principalement des super condensateurs, composants électriques constitués de deux armatures conductrices stockant des charges électriques opposées et capables de délivrer une forte puissance pendant un temps très court.

À la différence des batteries électrochimiques, ils peuvent se décharger en un temps de l'ordre de la seconde ou moins avec un rendement compris entre 80 % et plus de 90 %. Toutefois, ces dispositifs ne stockent pas de grandes quantités d'énergie.

Ces caractéristiques peuvent permettre de les utiliser, par exemple, pour des bornes de recharge rapide à destination des véhicules électriques.

Ce mode de stockage⁴ ne peut concerner que des applications très spécifiques. La figure 3 ci-après présente un exemple d'utilisation de ce mode de stockage.

Une autre piste est celle du stockage électromagnétique (ou SMES pour « Superconductor Magnetic Energy Storage ») à base de matériaux supraconducteurs.

Ce système est destiné au stockage de grandes quantités d'énergie, dont 50% peuvent être restituées en moins d'une seconde. De plus, un tel dispositif bénéficie d'un rendement qui se situe entre 75 % et 90 %.

⁴ Des améliorations importantes ont été possibles grâce aux nanotechnologies, en particulier l'utilisation de nanotubes de carbone.

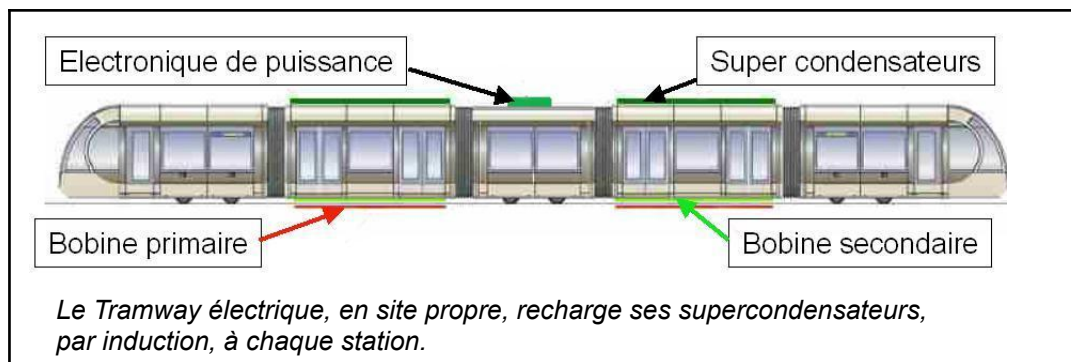


Figure 3 : Stockage direct de l'électricité sous forme électrique

Toutefois, les applications de SMES, aux coûts encore très élevés, sont encore limitées et doivent démontrer leur faisabilité à grande échelle, du fait de la nécessité, pour les matériaux supraconducteurs actuels, de leur fonctionnement à une température très basse.

Elles sont développées essentiellement aux États-Unis.

3. STOCKAGE DE L'ÉLECTRICITÉ SOUS FORME D'ÉNERGIE CHIMIQUE

3.1. STOCKAGE ÉLECTROCHIMIQUE

Les accumulateurs⁵ et les piles sont des systèmes électrochimiques servant à stocker de l'énergie chimique et la restituer sous forme d'énergie électrique. Les accumulateurs sont basés sur un système électrochimique réversible contrairement aux piles.

Le courant est produit par la circulation d'électrons entre deux plaques ou électrodes :

- une plaque positive composée d'un corps oxydant, capable d'attirer des électrons
- une plaque négative composée d'un corps réducteur, capable de céder des électrons.

Un accumulateur ou une pile se caractérise donc tout d'abord par un couple «oxydant-réducteur», (par exemple Plomb/Oxyde de plomb, Nickel/Cadmium,...) échangeant des électrons. Les deux plaques baignent dans une solution électrolytique (ou électrolyte) sous forme de liquide ou de gel.

C'est la réaction entre la solution et les électrodes qui est à l'origine du déplacement des électrons et des ions dans la solution. Ainsi, l'électrolyte a pour fonction d'assurer la conduction ionique (circulation des ions) et généralement de participer à la réaction chimique.

Un isolant poreux (ou séparateur) permet de séparer les deux plaques tout en autorisant le passage des ions.

De nombreux types d'accumulateurs⁶ ont été développés, ils se différencient par :

- la tension fournie, de l'ordre de quelques volts,
- les éléments qui les constituent : couple «oxydant-réducteur», électrolyte, matériaux constituant les plaques,
- leurs conditions d'utilisation⁷ : vitesse de charge⁸ et de décharge (puissance disponible), mode de chargement (décharge complète ou pas avant recharge), nécessité ou pas d'un système électronique de contrôle de la charge,
- leur comportement dans le temps, vitesse d'autodécharge,
- densité d'énergie par unité de volume ou de masse,

La figure 4 ci-après illustre ce dernier paramètre qui est très important pour le stockage embarqué.

⁵ L'accumulateur constitue un élément de base. Plusieurs accumulateurs associés, la plupart du temps en série, constituent une « batterie d'accumulateurs » couramment appelée « batterie » ou « accus ».

⁶ Les piles non rechargeables à usage unique ne sont pas traitées dans ce document.

⁷ « Une batterie ne meurt pas, on l'assassine en ne respectant pas les bonnes conditions d'utilisation ! » dit Marion Perrin responsable du laboratoire de stockage de l'électricité (CEA/Liten).

⁸ Le temps de charge d'une batterie n'est pas uniquement lié aux caractéristiques de la batterie mais aussi à la puissance disponible, par exemple il n'est pas envisageable de recharger rapidement chez soi un véhicule électrique dont la batterie a une capacité de l'ordre de 25 kWh, car cela nécessiterait une puissance disponible de 25 kW.

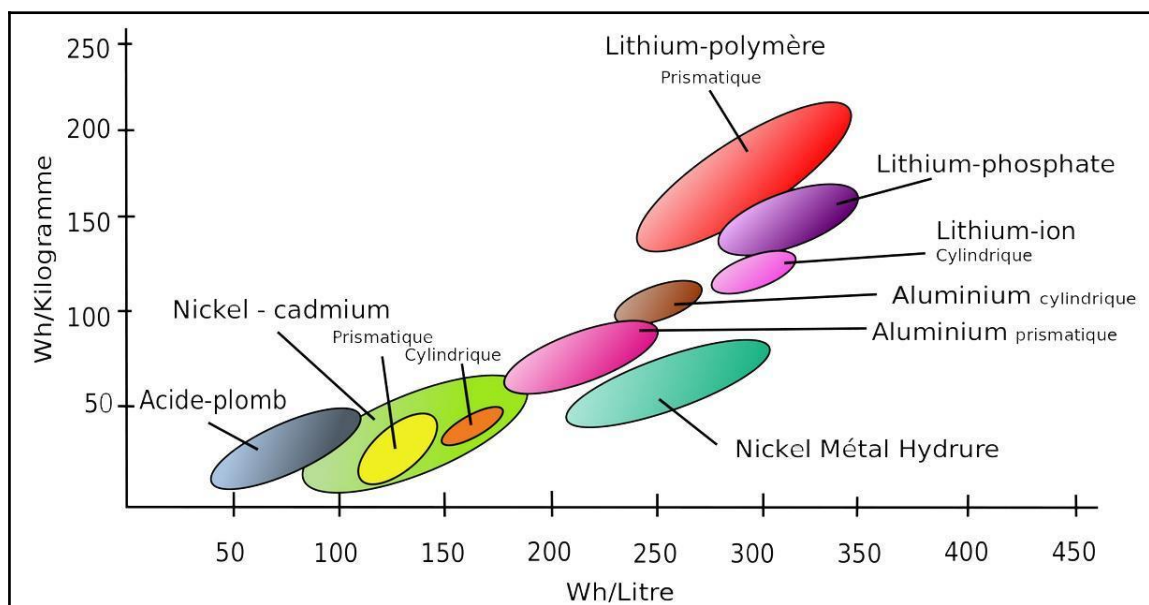


Figure 4 : Densité d'énergie des accumulateurs

Chacune des technologies développées présentent des caractéristiques différentes qui les rendent plus adaptées à certains domaines d'utilisation.

Trois principaux types d'accumulateurs ont été développés.

Les plus anciens accumulateurs sont ceux à « technologies aqueuses » : plomb-acide, nickel-cadmium (NiCd), nickel-hydrure métallique (NiMH).

Les batteries plomb-acide (voir figure 5) sont une technologie mature et peu chère, elles ont deux inconvénients :

- ❖ leur faible densité énergétique et leur rapidité d'autodécharge,
- ❖ elles sont utilisées pour des stockages stationnaires de moyenne capacité et dans les véhicules thermiques,
- ❖ mais leur faible densité énergétique ne permet pas de les utiliser pour les véhicules électriques.

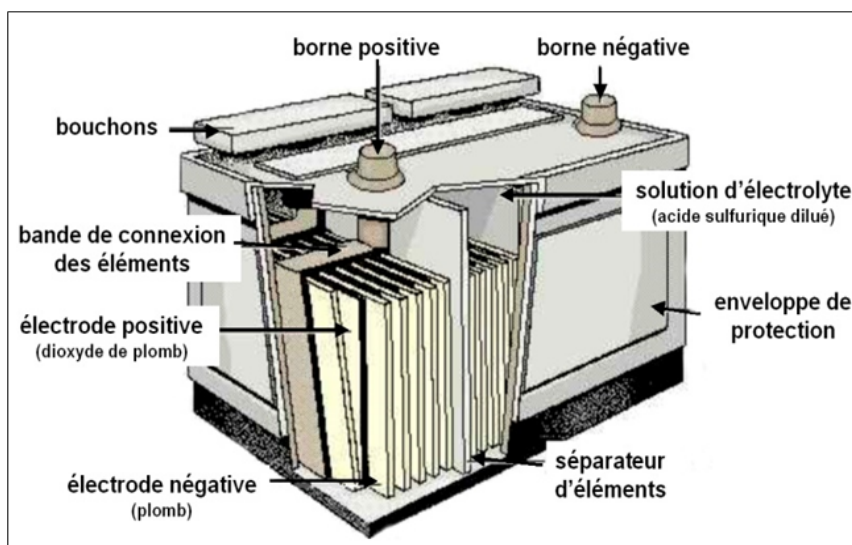


Figure 5 : Batterie plomb-acide

Les batteries NiCd et NiMH ont été principalement utilisées pour les applications mobiles nécessitant une faible quantité d'énergie, leur inconvénient majeur est la nécessité de faire des cycles de décharge complète avant recharge afin de garder leur capacité initiale ce qui a entraîné leur abandon au profit des batteries Li.

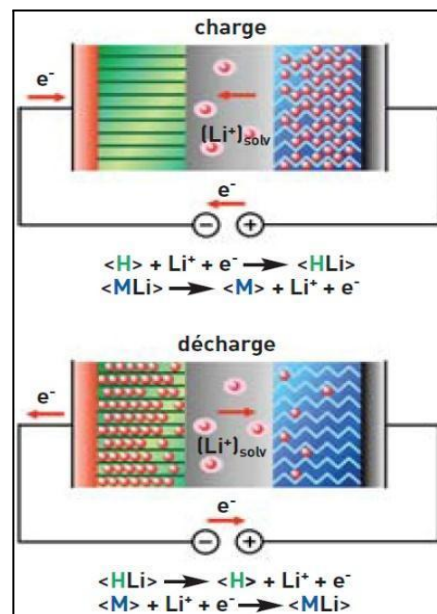
La technologie à base de lithium, d'abord lithium-métal puis lithium-ion (Li-ion) est relativement récente et en plein essor.

Les batteries Li-ion (voir figure 6) sont une grande famille dans la mesure où les ions mis en œuvre sont très différents. De nouvelles variantes voient le jour : lithium-phosphate, lithium-polymères.

Une des caractéristiques importantes est leur densité d'énergie, elles nécessitent un système électronique de contrôle. Ce système leur permet un mode d'utilisation plus tolérant.

Deux domaines d'applications sont les objectifs principaux de ces batteries : les appareils mobiles de faible puissance (téléphones, tablettes...) et les véhicules électriques. Leur développement industriel important aboutit à une utilisation de plus en plus importante en stockage stationnaire (voir ci-dessous).

Figure 6 : Batterie Li-ion ►



La technologie à circulation d'électrolyte (Redox) est surtout destinée aux stockages stationnaires de moyenne et grande capacité (voir figure 7).

Certaines de leurs caractéristiques les rendent aptes à ces utilisations : absence d'autodécharge, possibilité d'extension de la capacité moins onéreuse en augmentant la taille du réservoir, stabilité de fonctionnement, absence d'effet mémoire.

Les domaines d'application sont le stockage des productions intermittentes et la régulation du réseau en tension et fréquence.

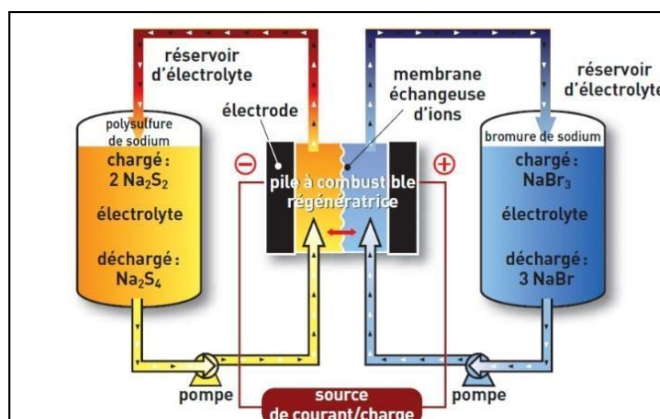


Figure 7 : Batterie Redox

De nombreux travaux de recherche sont en cours dans le domaine des batteries [Réf. 2], on peut citer :

- les batteries lithium (Li-ion, Li-phosphate, Li-polymère) pour leur utilisation dans le transport, les recherches portent principalement sur leur capacité, leur sécurité, leur encombrement et le temps de recharge. Certaines de ces batteries apparaissent sur le marché telles que :
 - les batteries NCA (Ni-Co-Al) et NMC (Ni-Mn-Co) qui ont une forte densité d'énergie (240 Wh/kg),
 - les batteries LFP ($LiFePO_4$), elles ont l'avantage de relâcher les contraintes sur le nickel et le cobalt, mais leur densité d'énergie est plus faible (160 Wh/kg),
 - les batteries Na-ion et K-ion permettent de se s'affranchir de la contrainte du lithium mais leur synthèse est complexe et leur densité d'énergie est faible (130 Wh/kg),
 - les batteries Redox dont deux technologies arrivent à maturité (zinc-brome et vanadium).

Quelques exemples de stockage stationnaire récents utilisant des batteries :

o **Australie :**

Suite à l'arrêt des dernières centrales à charbon et à plusieurs « black-out » et délestages l'Australie du Sud a installé un site de stockage, mis en service en décembre 2017 (voir figure 8), dont les caractéristiques sont :

- o Capacité de stockage : 129 MWh,
- o Puissance : 100 MW,
- o Installation réalisée en moins de 3 mois à partir de 788 Powerpack Tesla (équivalent de 1000 VE),
- o Emprise 1 ha,
- o Une extension de 50 MW et 64,5 MW est en cours.

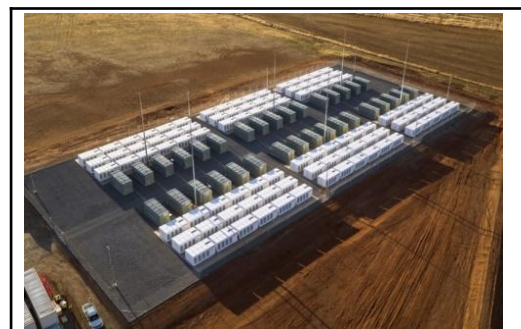


Figure 8 : Stockage en Australie

Cette installation est adossée à des parcs de production éolienne. Un autre projet, adossé à de la production solaire de caractéristiques semblables est en cours d'installation.

o Etats-Unis :

Une installation de stockage d'une puissance de 1,3 GW et d'une capacité de 3,3 GWh a été installée dans le comté de Kern en Californie (voir figure 9).

Elle est constituée de 120 000 batteries d'origines diverses (LG Chem, Samsung et BYD).

Cette installation est c L'ensemble de l'installation occupe une surface de 1 860 ha couplée à un site de production solaire de 875 MW.



Figure 9 : Stockage aux Etats Unis ►

o France :

RTE a mis en service, en 2022, l'expérimentation « RINGO » qui a pour objectif, à partir de trois sites de stockage par batterie, d'éviter des transferts d'énergie sur le réseau en pouvant stocker sur un site et déstocker sur un autre en même temps. [L'article GAENA N° 63](#) « Expérimentation RINGO » décrit ce système [Réf. 3].

3.2. HYDROGÈNE

La production de l'hydrogène fait l'objet de la [fiche argumentaire GAENA "Hydrogène"](#) en particulier celle-ci peut être faite par électrolyse de l'eau c'est-à-dire en utilisant de l'électricité disponible.

L'hydrogène est un vecteur d'énergie qui peut être stocké et réutilisé de différentes manières.

La figure 10 illustre les différentes possibilités d'utilisation de l'hydrogène :

- pile à combustible,
- centrale à gaz,
- méthanation.

Certaines utilisations ne relèvent pas à proprement dit du stockage de l'électricité.

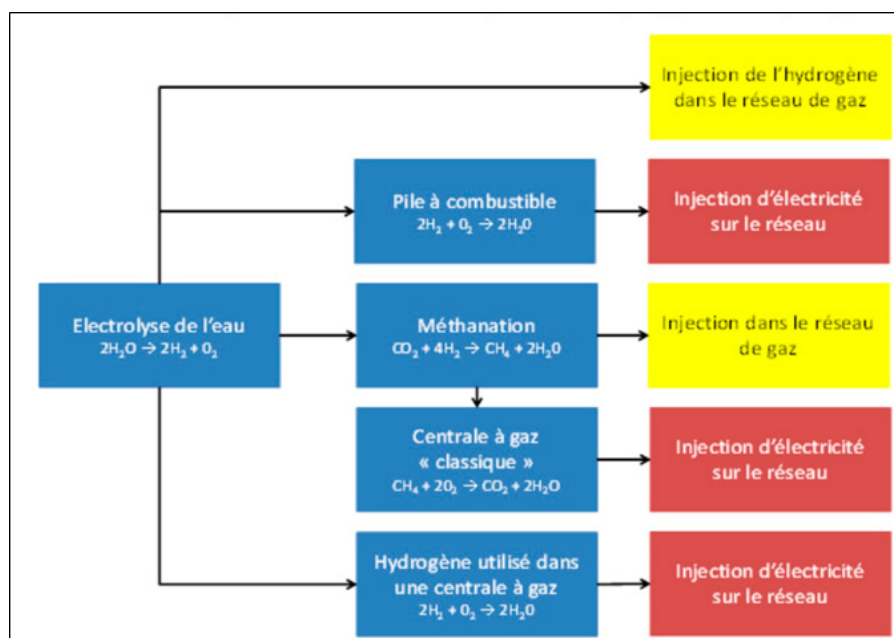


Figure 10 : Utilisation de l'hydrogène

Les utilisations de l'hydrogène pour produire de l'électricité sont principalement :

- la pile à combustible
- la méthanation

La pile à combustible (PAC) fonctionne à l'inverse de l'électrolyse de l'eau.

Au lieu de décomposer l'eau en hydrogène et oxygène sous l'action d'un courant électrique, la PAC recombine, en présence d'un catalyseur, l'hydrogène et l'oxygène en créant un courant électrique.

La figure 11 décrit le principe de fonctionnement d'une PAC.

Si le principe de la PAC est simple, sa mise en œuvre est complexe et coûteuse.

Aujourd'hui des progrès ont été réalisés ; ils permettent de nombreuses applications depuis la microPAC de quelques watts pour alimenter un téléphone mobile ou les piles embarquées pour les transports, jusqu'à la pile de 1 MW pour fournir de l'électricité à un immeuble collectif.

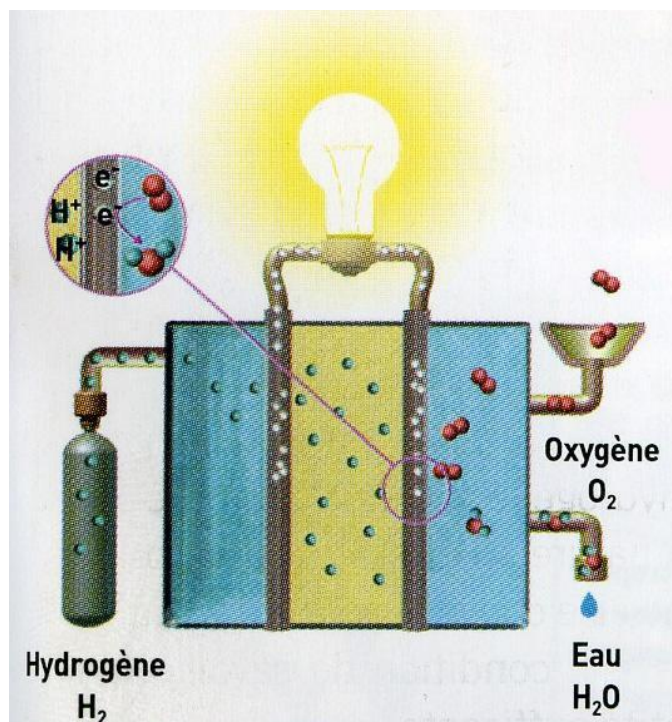


Figure 11 : Pile à combustible

La pile à combustible (PAC) se compose de multiples cellules électrochimiques composées de deux électrodes séparées par un électrolyte.

L'électrolyte est structuré de façon à laisser passer les ions H^+ et à bloquer le passage des électrons qui doivent emprunter un circuit externe.

Dans la cathode, les ions H^+ et l'oxygène se recombinent pour donner de l'eau.

Actuellement, il existe plusieurs types de piles à combustible qui diffèrent par leur électrolyte et leur température de fonctionnement :

- o la pile à membrane échangeuse de protons (PEMFC) (polymère / $80^\circ C$) prometteuse pour les transports,
- o les piles à méthanol (DMFC) ou à éthanol (DEFC) utilisant directement l'hydrogène contenu dans l'alcool, très compactes pour l'alimentation de la microélectronique,
- o enfin les piles à oxydes solides (SOFC) à températures de fonctionnement très élevées ($800^\circ C$) qui permettent d'utiliser le gaz naturel sans reformage et dont le rendement global atteint les 80 % pour des applications stationnaires.

Les travaux actuels de développement visent à améliorer le rendement et à trouver des composants moins onéreux.

La méthanation⁹ est basée sur la réaction de Sabatier : $4 H_2 + CO_2 \rightarrow CH_4 + 2 H_2O$

Cette réaction se produit à haute température et nécessite du CO_2 de grande pureté. La figure 12 ci-dessous présente le principe et les différentes possibilités de la méthanation.

La méthanation est souvent appelée « power to gas – gas to power »

Le méthane produit peut être stocké et utilisé soit dans le réseau gaz soit pour produire de l'électricité dans des centrales à gaz.

Actuellement il n'existe aucune installation industrielle du cycle complet (électricité $\rightarrow$ méthane $\rightarrow$ électricité) de méthanation, le rendement de ce cycle peut être estimé à 25 %.

Les travaux actuels de développement portent sur la partie aval du cycle. Un projet est en cours de réalisation, ce projet « Jupiter 1000 » implanté à Fos sur Mer a pour objectif la production de méthane à partir d'une puissance électrique de 1 MW qui devrait produire 200 m³/h d'hydrogène et 25 m³/h de méthane.

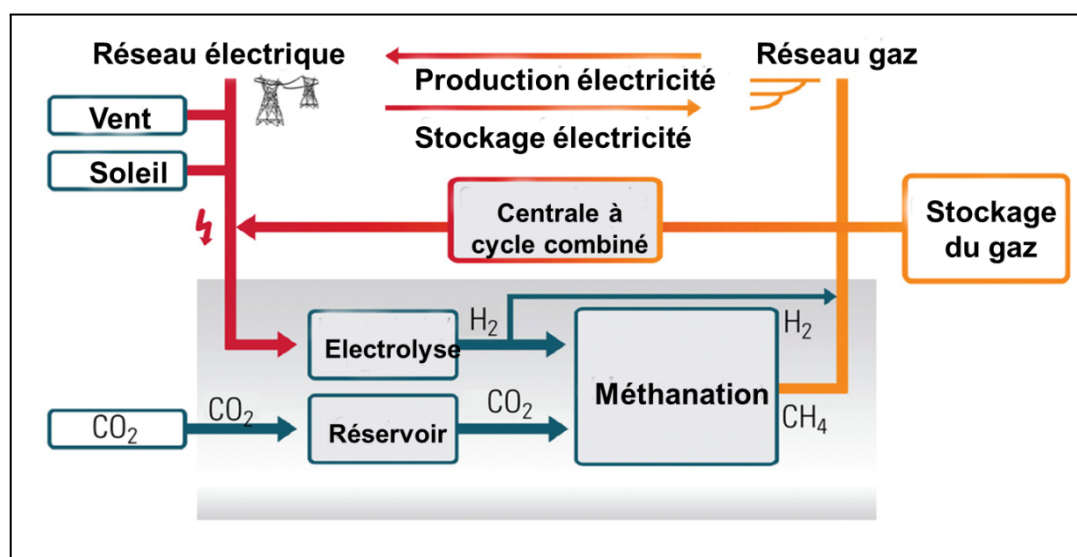


Figure 12 : Méthanation

⁹ A ne pas confondre avec la méthanisation qui est la production de méthane par décomposition de matières organiques.

4. STOCKAGE DE L'ÉLECTRICITÉ SOUS FORME D'ÉNERGIE MÉCANIQUE

4.1. STATION DE TRANSFERT D'ÉNERGIE PAR POMPAGE (STEP)

Les STEP (voir figure 13) sont composées de deux retenues d'eau situées à des hauteurs différentes reliées par un système de canalisations.

La centrale hydroélectrique réversible située en aval a deux modes de fonctionnement :

- **turbinage** : l'eau de la retenue amont se déverse dans la retenue aval, entraîne l'ensemble turbine/alternateur et produit de l'électricité,
- **pompage** : lorsque le réseau fournit un surplus d'électricité (heures creuses ou pic de production des énergies intermittentes) l'eau de la retenue aval est pompée vers la retenue amont. La masse d'eau ainsi pompée représente un stockage d'énergie potentielle pour une future production d'électricité par turbinage.

La taille importante des installations permet de stocker d'importantes 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 MW à plusieurs GW en fonction de la hauteur d'eau et du volume disponible.

Ces systèmes de stockage sont matures, la principale contrainte à leur développement est leur impact sur l'environnement provoqué par les grands volumes de retenues nécessaires.

Voir ci-dessous les informations sur le parc Français.

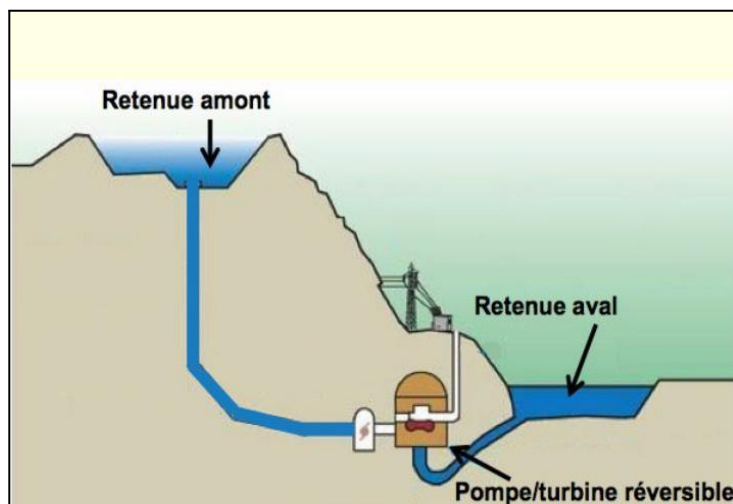


Figure 13 : Schéma de principe d'une STEP

Parc de STEP installées en France

Le parc français représente une puissance installée de 4,3 GW, il comprend 6 sites. La plus grande STEP (Grand Maison) a une puissance de 1 800 MW, la figure 14 est un exemple de son fonctionnement, périodes de production (turbinage) et de stockage (pompage), sur quelques jours (ouvrables et fériés) du mois de mai 2013.

Le parc français de STEP a une production annuelle de l'ordre de 5 TWh, ce qui représente de l'ordre de 1 % de la production d'électricité.

La centrale de Pragnères (Hautes Pyrénées), réalisée dans les années 50, est un ensemble original constitué de nombreux bassins de retenues situés à différentes altitudes de part et d'autre de la vallée du Gave de Pau.

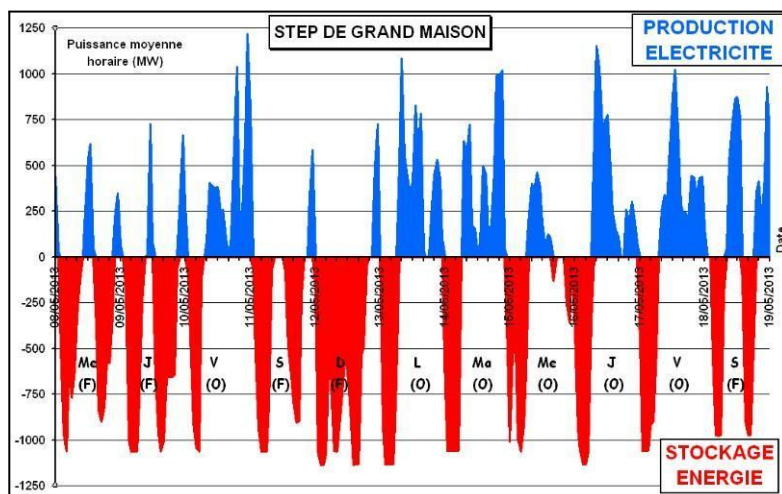


Figure 14 : Exemple de fonctionnement de la STEP de Grand Maison

Les STEP peuvent également être installées en façade maritime, avec la mer comme retenue inférieure et une retenue amont en sommet d'une falaise ou constituée par une digue. Une STEP marine est en exploitation au Japon.

Un projet a été étudié en Guadeloupe (voir figure 15), il a été abandonné car jugé non rentable.

Cette STEP aurait eu une puissance de 50 MW, une capacité de stockage de 1 GWh, le réservoir haut aurait eu une capacité de 6,5 millions de m³ et aurait occupé une superficie de 90 ha avec une hauteur de falaise de 50 m.

Des éoliennes auraient été implantées sur la côte.



Figure 15 : STEP « marine »

4.2. AUTRES MOYENS DE STOCKAGE

4.2.1. Air comprimé

Il est possible d'utiliser de l'air comprimé pour produire un travail mécanique, le stockage de l'énergie se fait en comprimant un gaz avec un compresseur mû par de l'énergie électrique disponible.

L'efficacité énergétique est médiocre car la compression s'accompagne d'un échauffement du gaz, ce qui aboutit à un rendement de stockage faible, sauf à récupérer la chaleur produite (cogénération air comprimé + chaleur). Des études sont en cours pour faire des systèmes adiabatiques qui améliorent le rendement de stockage.

Ce type de stockage peut être envisagé à plusieurs échelles :

- PSA a étudié des véhicules hybrides moteur thermique – moteur à air comprimé, la compression du gaz se faisant par récupération de l'énergie de freinage du véhicule (Voir figure 16). Ce projet initié en 2010 n'a pas eu de suite. A noter que cet exemple est un stockage d'énergie et pas un stockage d'électricité,
- À plus grande échelle, les systèmes utilisent des cavités souterraines ou d'anciennes mines de sel comme réservoirs et un ensemble moteur-générateur-turbine. La compression du gaz est faite lorsque la demande d'électricité est faible,

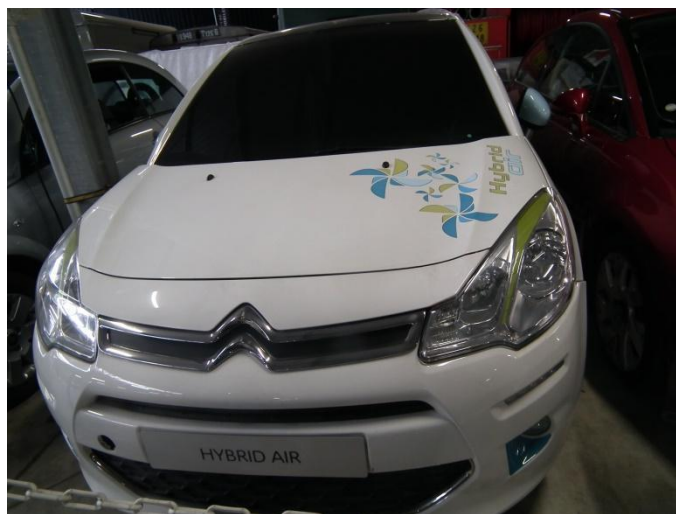


Figure 16 : Projet « Hybrid Air » Peugeot

4.2.2. Système inertiel de stockage d'énergie (SISE)

L'apport d'énergie électrique permet de faire tourner une masse (volant d'inertie) à des vitesses très élevées en quelques minutes. Une fois lancée, la masse continue à tourner.

L'énergie est alors stockée dans le volant d'inertie sous forme d'énergie cinétique, elle pourra ensuite être restituée instantanément en utilisant le moteur comme génératrice électrique, entraînant la baisse de la vitesse de rotation du volant d'inertie.

Ce mode de stockage présente des caractéristiques proches de celles des supercondensateurs, en particulier la récupération rapide de l'énergie stockée.

Deux exemples d'utilisation de stockage inertiel :

- la centrale de régulation électrique à stockage inertiel de Stephentown (État de New York - USA), centrale de 20 MW comprenant 200 volants d'inertie. Ce système à réponse rapide fournit 10 % de la puissance de régulation en fréquence pour la ville de New York (voir figure 17),
- la récupération de l'énergie de freinage du métro (Rennes Métropole). Le système de stockage par volant d'inertie (masse tournante de 2,5 t) permet d'économiser 230 MWh d'électricité par an soit 11 jours de consommation.



Figure 17 : Centrale de Stephentown

5. CONCLUSION

Une première conclusion s'impose : les solutions de stockage sont multiples et, comme pour la production d'électricité, il est nécessaire d'avoir un « mix » de solutions de stockage.

Les solutions pour développer le transport électrique et celles pour faciliter l'intégration des énergies intermittentes fatales dans la production d'électricité ne sont pas les mêmes.

Le domaine du stockage de l'électricité fait l'objet de nombreuses recherches.

À ce jour :

- le stockage de l'électricité à petite / moyenne échelle pour des durées très courtes est opérationnel (batteries),
- le développement rapide des batteries pour les véhicules électrique, de part leurs évolutions technologiques et financières, entraîne leurs utilisations pour le stockage stationnaire de plus en plus importantes,
- le stockage de l'électricité à moyenne / grande échelle pour des durées courtes à moyenne est opérationnel (STEP),
- le stockage de l'électricité à très grande échelle pour des durées longues (inter saisonnier) n'a actuellement aucune solution physiquement ou économiquement viable.

6. RÉFÉRENCES

[Réf. 1] Le stockage de l'électricité ouvrage collectif Éditions Lavoisier

[Réf. 2] https://www.sauvonsleclimat.org/images/sauvons-le-climat/universite-d-ete/UE2023/Presentations/UE_2023_06_D-Bloch_Les_besoins_de_la_mobilite_electrique.pdf

[Réf. 3] [Ringo, une expérimentation de stockage de l'électricité | RTE](#)