

STOCKAGE DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

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 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
- l'effacement des pointes journalières, en particulier celle du soir en période hivernale
- le développement du transport électrique routier.

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 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.

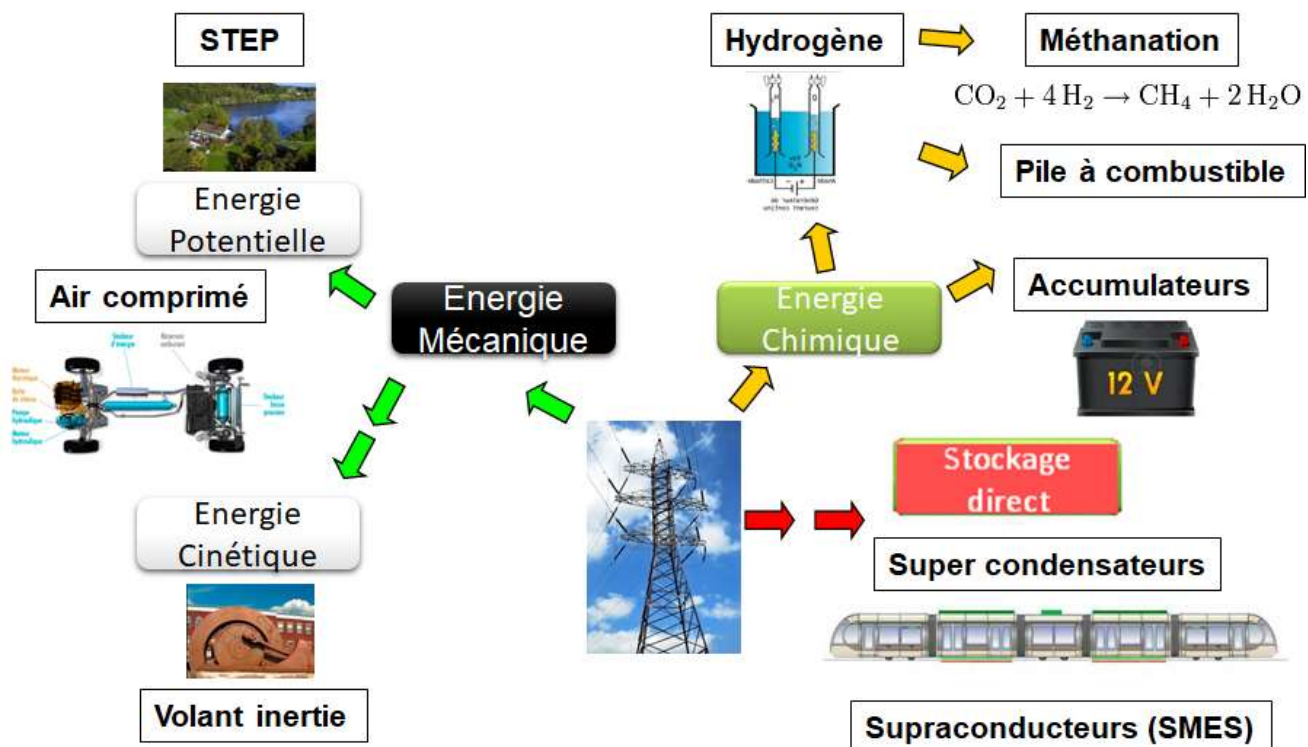


Figure 1 : Stockage de l'énergie électrique

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

Tout système de stockage est caractérisé par plusieurs paramètres :

- la capacité de stockage en Wh (kWh ou MWh 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 stockage².

La figure 2 ci-après 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...

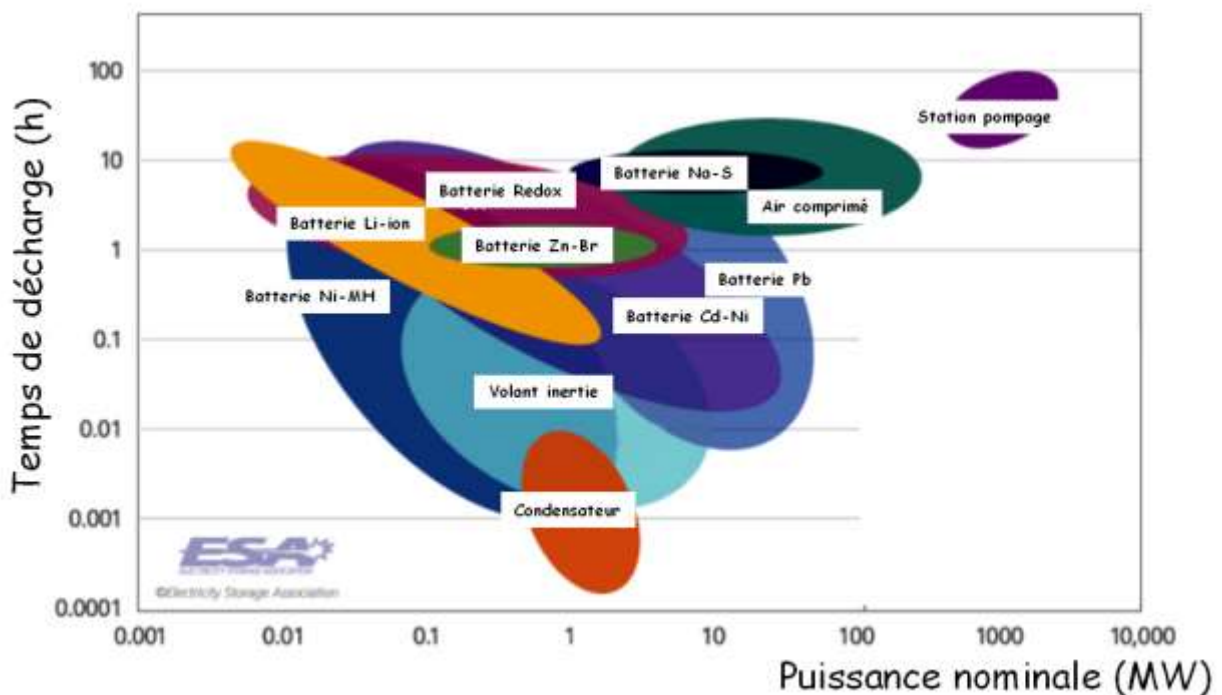


Figure 2 : Différents modes de stockage de l'électricité

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.

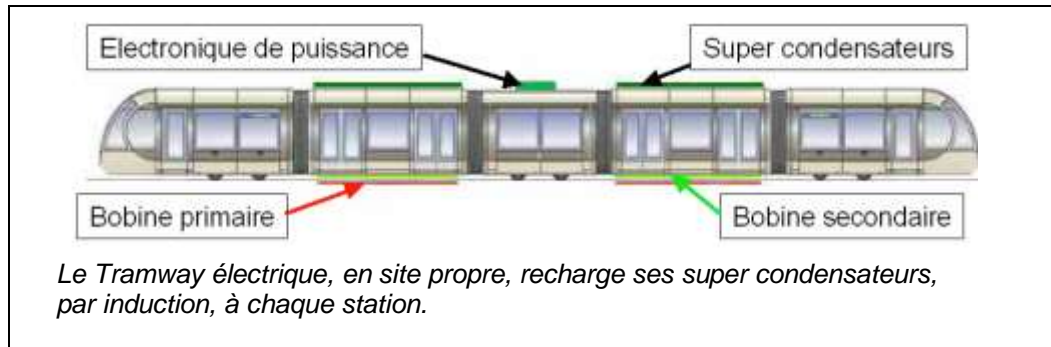
² Ce paramètre n'est pas traité dans cette fiche.

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 stockage³ ne peut concerner que des applications très spécifiques.

L'encadré ci-dessous 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 %.

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 de maintenir 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 accumulateurs⁴ et les piles sont des systèmes électrochimiques servant à stocker de l'énergie 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 liquide ou 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.

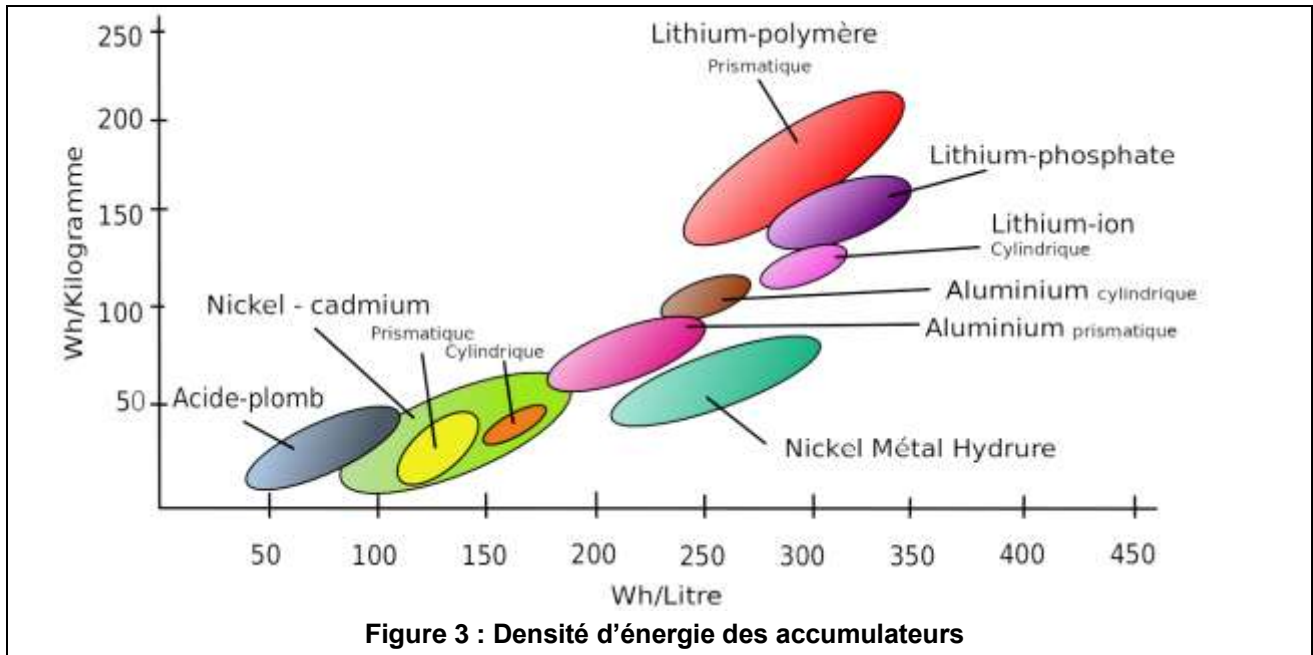
De nombreux types d'accumulateurs⁵ ont été développés, ils se différencient par :

³ Des améliorations importantes ont été possibles grâce aux nanotechnologies, en particulier l'utilisation de nanotubes de carbone

⁴ 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 »

⁵ Les piles non rechargeables à usage unique ne sont pas traitées dans ce document

- 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'utilisation⁶ : vitesse de charge⁷ 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 3 ci-dessous illustre ce paramètre qui est très important pour le stockage embarqué.

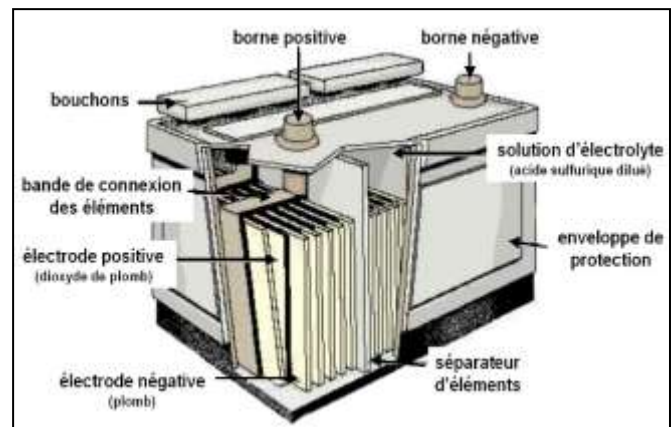


Chacune des technologies développées présentent des caractéristiques différentes qui les rendent plus adaptées à certains domaines d'utilisation.

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 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.



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 aboutit à leur abandon au profit des batteries Li.

⁶ « Une batterie ne meurt pas, on l'assassine en ne respectant pas les bonnes conditions d'utilisation ! » dicit Marion Perrin responsable du laboratoire de stockage de l'électricité (CEA/Liten)

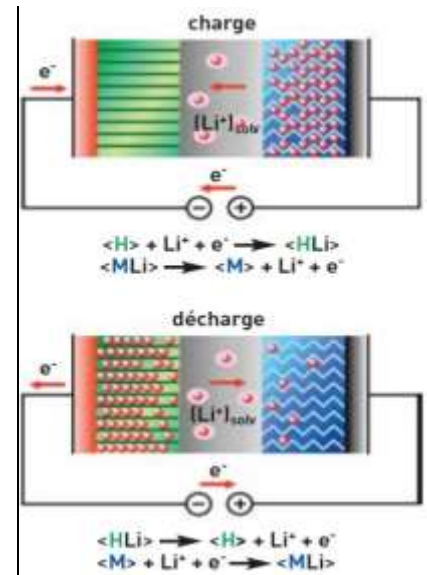
⁷ Le temps de charge d'une batterie n'est pas uniquement lié aux caractéristiques de la batterie mais aussi à la puissance disponible, par exemple il est envisageable de recharger rapidement chez soi un véhicule électrique dont la batterie a une capacité de l'ordre de 25 kWh, car cela nécessiterait une puissance disponible de 25 kW.

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 sont une grande famille dans la mesure où les ions mis en œuvre sont très nombreux. 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.

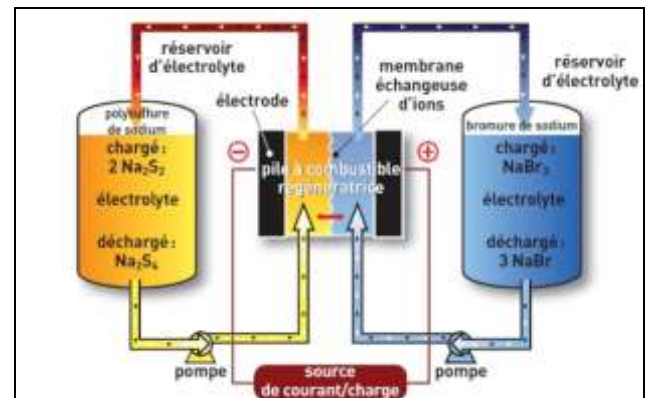
Deux domaines d'applications sont les objectifs principaux de ces batteries : les appareils mobiles de faible puissance (téléphones, tablettes..) et les véhicules électriques.



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

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.



De nombreux travaux de recherche sont en cours dans le domaine des batteries, 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
- les batteries Redox dont deux technologies arrivent à maturité (zinc-brome et vanadium).

3.2. HYDROGÈNE

La production de l'hydrogène fait l'objet de la [fiche GAENA n°36](#) 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 4 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.

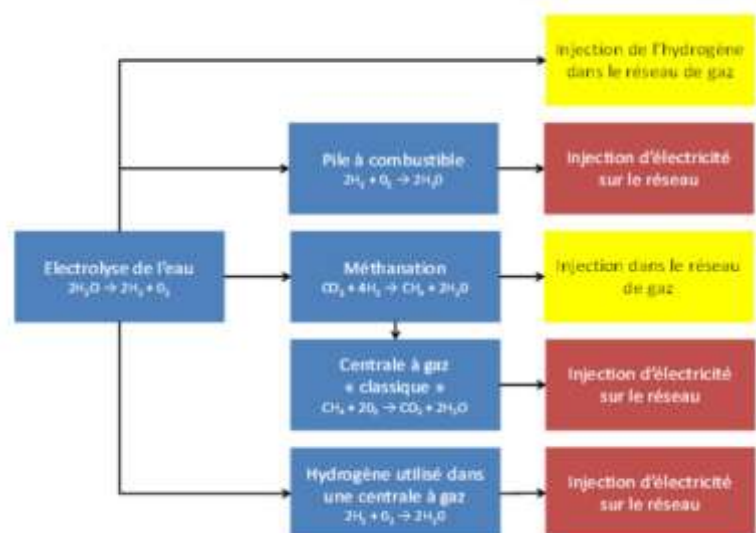


Figure 4 : Utilisation de l'hydrogène

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 l'hydrogène et l'oxygène en créant un courant électrique. La figure 5 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.

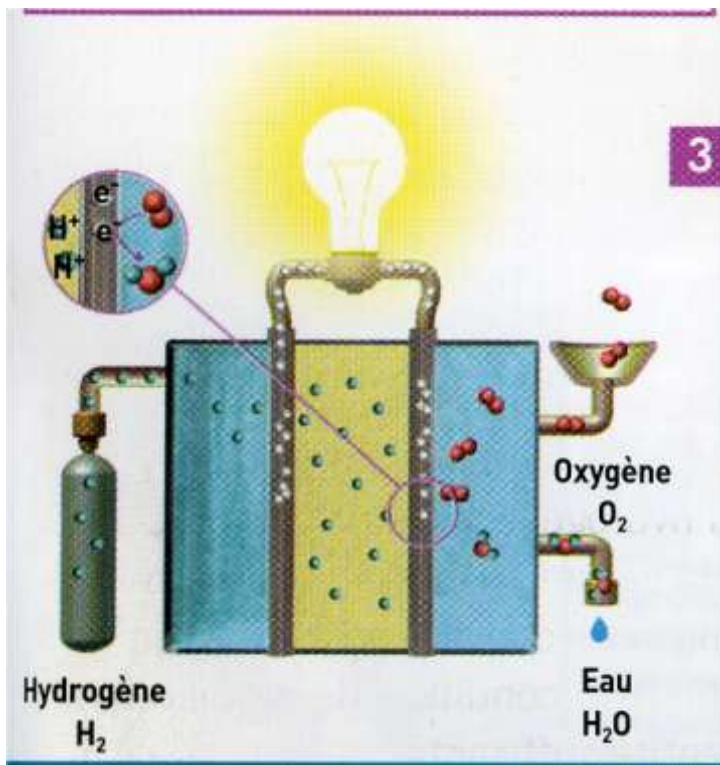


Figure 5 : Pile à combustibles

La pile à combustible 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 se différencient par leur électrolyte et leur température de fonctionnement :

- la pile à membrane échangeuse de protons (PEMFC) (polymère / 80°C) prometteuse pour les transports,
- 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 ;
- enfin les piles à oxydes solides (SOFC) à températures de fonctionnement très élevées (800°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 méthanation⁸ est basée sur la réaction de Sabatier : $4 \text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$

Cette réaction se produit à haute température et nécessite du CO₂ pur. La figure 6 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 → méthane → 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.

⁸ A ne pas confondre avec la méthanisation qui est la production de méthane par décomposition de matières organiques.

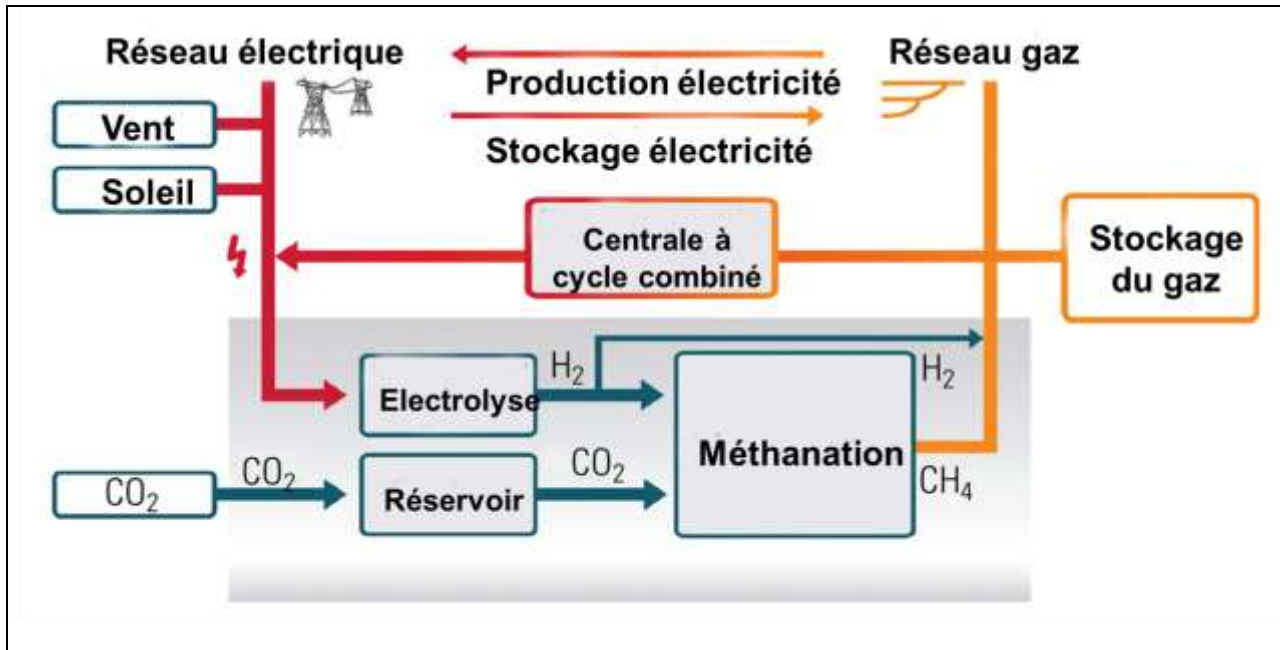


Figure 6 : Méthanation

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

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

Les STEP (figure 7) 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 encadrés sur le parc Français.

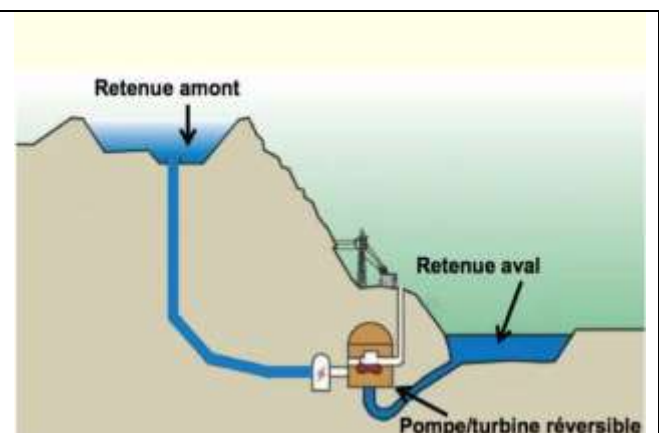


Figure 7 : Schéma de principe d'une STEP

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 8 est un exemple de son fonctionnement, périodes de production et de stockage, 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 près 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.

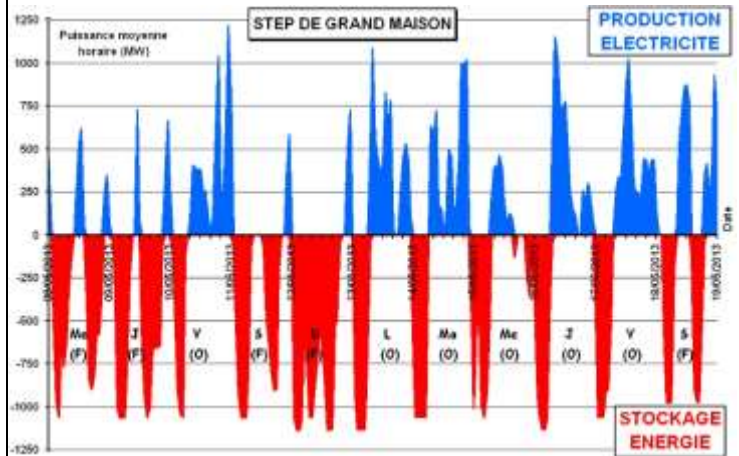


Figure 8 : Exemple de la STEP de Grand Maison

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 (figure 9), 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 9 : 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 (en général avec un compresseur mu par de l'énergie électrique disponible). L'efficacité énergétique est médiocre car la compression s'accompagne d'un échauffement du gaz, sauf à récupérer la chaleur produite (cogénération air comprimé + chaleur).

Ce type de stockage peut être envisagé à plusieurs échelles :

- Peugeot 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. Ce projet ne paraît pas avoir de suite
- 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

4.2.2. Système inertiel de stockage d'énergie (SISE) [1]

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 super condensateurs, 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
- 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

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 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

[1] http://www.ecosources.info/dossiers/Stockage_energie_volant_inertie