



*Liberté • Égalité • Fraternité*

**RÉPUBLIQUE FRANÇAISE**

AMBASSADE DE FRANCE AU JAPON  
SERVICE POUR LA SCIENCE ET LA TECHNOLOGIE

# Principales technologies du stockage d'énergie au Japon

---

Rédacteur :

**Ibrahim AYED**

Stagiaire

Ambassade de France au Japon

Sous la responsabilité de :

**Sébastien CODINA**

Attaché pour la Science et la Technologie

Chef du pôle Sciences et technologie de l'environnement et des matériaux

## Contenu

Introduction.....	3
I- Stockage d'énergie par pompage-turbinage (ou <i>Pumped Hydroelectric Storage</i> , abrégé PHS) .....	3
1. Principe.....	3
2. Caractéristiques et utilisations .....	4
3. Le stockage PHS au Japon.....	5
a. Installations existantes .....	5
b. Perspectives.....	6
II- Batteries .....	7
1. Batteries au plomb ( <i>lead-acid batteries</i> ).....	8
2. Accumulateurs Nickel-Hydrure métalliques ( <i>NiMH batteries</i> ).....	9
a. Fonctionnement et caractéristiques .....	9
b. Recherche actuelle et perspectives.....	9
3. Batteries Lithium-Ion.....	9
a. Fonctionnement et caractéristiques .....	9
b. Recherche actuelle et avenir des batteries Lithium-Ion .....	10
4. Batteries Sodium-Soufre ( <i>NaS batteries</i> ) .....	13
5. Batteries à flux ( <i>flow batteries</i> ) .....	14
6. Bilan .....	16
III- Flywheels Energy Storage (ou batteries à volant d'inertie) .....	17
1. Principe.....	17
2. Caractéristiques et utilisations .....	17
3. Les batteries à volant d'inertie au Japon.....	18
a. La Centrale de l'île de Dogo.....	18
b. Projet de <i>Flywheel</i> à supraconduction .....	19
c. Publications académiques.....	19
IV- Autres technologies.....	19
1. Stockage d'énergie sous forme d'hydrogène .....	19
2. Stockage d'énergie thermique .....	21
3. Stockage d'énergie à air comprimé ( <i>Compressed Air Energy Storage</i> , abrégé CAES).....	22
Conclusion .....	23

## Introduction

Le stockage de l'énergie est un enjeu majeur des politiques énergétiques contemporaines. En effet, un stockage efficace et distribué permettrait non seulement au réseau électrique une plus grande flexibilité face aux variations de la demande et une plus grande robustesse en cas d'endommagement du réseau (par exemple dans une situation de catastrophe naturelle) grâce à une décentralisation des sources d'énergie mais il offrirait également une solution à l'incertitude entourant la productivité des principales sources d'énergie renouvelable.

L'amélioration des technologies de stockage d'énergie menacerait selon de nombreux analystes la forme actuelle des marchés énergétiques (et notamment les grandes unités de production électrique centralisée) et le Japon est très avancé dans la mise en œuvre de ces technologies et dans la recherche sur le sujet, avec une politique volontariste d'investissement public et un parc de stockage d'énergie déjà important. Pour ne citer qu'un exemple, le lancement d'un projet expérimental de Centrale Électrique Virtuelle de grande envergure par 14 grandes entreprises japonaises en juillet 2016, projet financé à hauteur de 3 milliards de yens par le Ministère japonais de l'Économie, du Commerce et de l'Industrie (METI), a été ainsi accompagné par la mise en place d'un important système de batteries, montrant ainsi à la fois la capacité du gouvernement à fédérer les efforts de grands acteurs industriels autour de son projet énergétique et l'importance du stockage d'énergie dans ce type de projets.

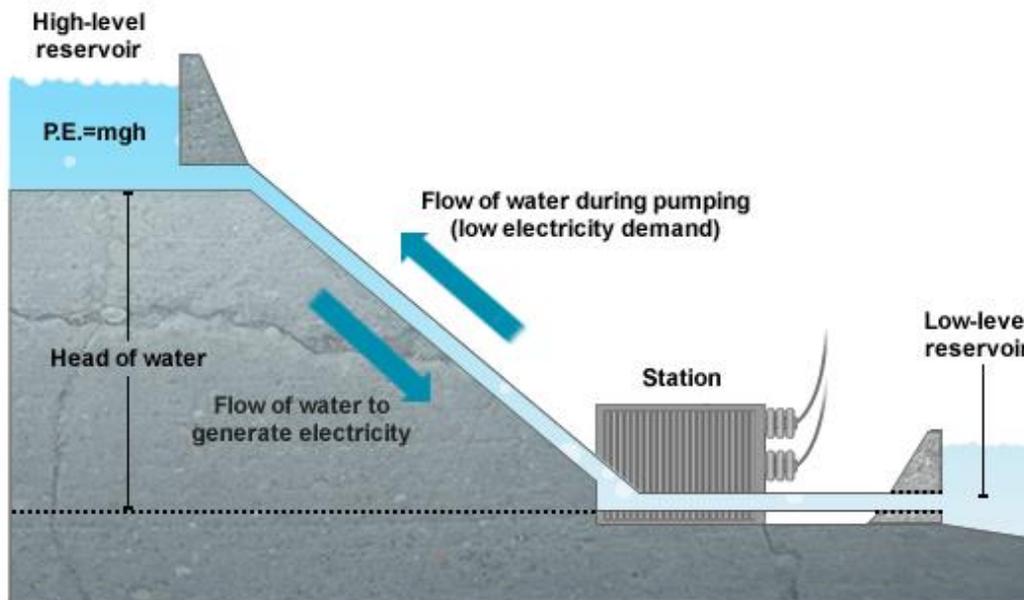
Ce rapport présentera un tour d'horizon de plusieurs des principales technologies de stockage d'énergie connues, employées et étudiées au Japon. Il ne s'agit pas de dresser une liste exhaustive de ces technologies mais plutôt de parcourir le paysage japonais du stockage de l'énergie en décrivant les plus utilisées de ces technologies au Japon mais aussi celles au sujet desquelles la recherche académique et industrielle est la plus active et prometteuse et celles qui pourraient présenter un fort potentiel de développement au Japon. Nous en donnons ainsi à chaque fois le principe de fonctionnement en évitant autant que faire se peut les détails techniques mais en précisant néanmoins les caractéristiques majeures et en explicitant les données qui nous ont semblé les plus pertinentes pour situer ces technologies les unes par rapport aux autres tout en indiquant les acteurs académiques et industriels importants du secteur au Japon.

## I- Stockage d'énergie par pompage-turbinage (ou *Pumped Hydroelectric Storage*, abrégé PHS)

### 1. Principe

Le dispositif consiste généralement en deux réservoirs d'eau situés à deux hauteurs différentes. Le fonctionnement des PHS est plutôt simple et peut se décomposer en deux phases : durant la phase de pompage, qui est une phase de recharge, l'électricité produite en excès par le réseau auquel la centrale de PHS est reliée est consommée par des moteurs permettant de pomper l'eau du réservoir situé à une hauteur inférieure vers le réservoir supérieur. Dans un deuxième temps, durant la phase

de turbinage, qui est une phase de décharge, quand le réseau est en déficit énergétique, l'écoulement de l'eau à travers des turbines du réservoir supérieur vers le réservoir inférieur permet de générer de l'énergie électrique.



*Fonctionnement d'une centrale PHS (Source : BBC Bitesize)*

Deux principaux types de centrales PHS existent : les centrales dites pures et celles dites hybrides. Les premières n'utilisent que le procédé décrit ci-dessus pour produire l'électricité, les secondes, installées le long de cours d'eau voire au bord de la mer, exploitent aussi l'énergie mécanique des courants naturels.

Aujourd'hui, avec plus de 352 installations générant près de 184 Gigawatts de puissance électrique à travers le monde (selon le DOE Global Energy Storage Database), le PHS est la technologie la plus utilisée pour le stockage d'énergie à grande échelle dans le monde. De plus, depuis la mise en place des premières centrales dans les Alpes dans les années 1890, plus d'un siècle d'expérimentations en font une technologie mature et robuste.

## **2. Caractéristiques et utilisations**

Le principal défaut du stockage hydroélectrique est sa faible densité énergétique. En effet, l'énergie potentielle de l'eau emmagasinée dans le réservoir supérieur étant proportionnelle à la masse d'eau stockée et à la hauteur à laquelle se situe le réservoir supérieur par rapport au réservoir inférieur, pour avoir une capacité de stockage conséquente, il faut avoir deux larges réservoirs séparés par un

dénivelé important. Si ces conditions sont parfois réunies dans un cadre naturel, il est fréquent de devoir aménager au moins un des deux réservoirs, ce qui entraîne un coût important, tant en capitaux qu'en dommages environnementaux dus à la transformation importante que suppose un projet d'une telle envergure.

De plus, si l'expérience montre que peu d'incidents sont liés à cette technologie, la moindre défaillance, particulièrement celles touchant un des deux réservoirs, peut avoir des conséquences considérables, comme le montre l'accident survenu à Taum Sauk (États-Unis) qui a notamment détruit plus de 1 km<sup>2</sup> de forêt entourant la centrale.

Malgré toutes ces réserves, le stockage d'énergie par pompage-turbinage est aujourd'hui la technologie la plus répandue pour le stockage à grande échelle grâce à sa fiabilité et ses coûts opérationnels et de maintenance relativement peu élevés. Le dénivelé utilisé est en général de 200 à 300 mètres, pour des réservoirs dont le volume est de l'ordre de la dizaine de millions de mètres cubes. De plus, si les anciennes installations atteignent difficilement 60 % d'efficacité énergétique sur un cycle complet, les centrales les plus modernes dépassent aujourd'hui les 80 %.

Notons enfin également que les coûts ainsi que la durée de construction de ces centrales sont importants et nécessitent donc, en plus d'un important investissement financier, un environnement réglementaire et législatif stable pour assurer la rentabilité du projet, ce qui explique une présence étatique forte, directement ou indirectement, autour de la mise en place de ces centrales.

### 3. Le stockage PHS au Japon

#### a. Installations existantes

Depuis les années 1960, le Japon a construit et entretenu ce qui est aujourd'hui la deuxième plus grande capacité de stockage hydroélectrique du monde après la Chine avec une puissance totale de près de 29 Gigawatts en 2016 (selon le DOE Global Energy Storage Database). Le secteur est notamment porté par la présence d'acteurs régionaux forts qui construisent, possèdent et gèrent le fonctionnement des installations PHS. De plus, avec la montée des préoccupations écologiques, les installations « pures » ont été de plus en plus privilégiées ces dernières années comme le montre le tableau ci-dessous regroupant l'ensemble des installations PHS du Japon.

Nom de l'installation	Type	Puissance (MW)	Date de commande du projet
Ikejirigawa	Hybride	2	1934
Omorikawa	Hybride	12	1959
Morotsuka	Hybride	50	1961
Hatakenagi No. 1	Hybride	137	1962
Mio	Hybride	36	1963
Ikehara	Hybride	350	1964
Ananaigawa	Hybride	13	1964
Shiroyama	Pure	250	1965
Yagisawa	Hybride	240	1965

Shinnaruhagawa	Hybride	303	1968
Nagano	Hybride	220	1968
Kagetaira	Hybride	47	1968
Azumi	Hybride	623	1969
Takane No. 1	Hybride	340	1969
Midono	Hybride	245	1969
Kisen'yama	Pure	466	1970
Shintoyone	Hybride	1125	1972
Numappara	Pure	675	1973
Okutataragi	Pure	1932	1974
Niikappu	Hybride	200	1974
Ohira	Pure	500	1975
Namwon	Pure	620	1976
Mazekawa No. 1	Hybride	288	1976
Futai Dam	Pure	1000	1978
Shin-Takasegawa	Hybride	1280	1979
Okuyoshino	Pure	1206	1980
Okuyahagi No. 1	Pure	780	1980
Okuyahagi No. 2	Pure	323	1980
Tamahara	Pure	1200	1981
Motokawa	Pure	615	1982
Daini Numazawa	Pure	460	1982
Takami	Hybride	200	1983
Matanoagawa	Pure	1200	1986
Tenzan	Pure	600	1986
Imaichi	Pure	1050	1988
Shimogo	Pure	1000	1988
Okawachi	Pure	1280	1992
Okumino	Pure	1500	1994
Shiobara	Pure	900	1994
Futai Dam No. 2	Pure	600	1996
Kazunogawa	Pure	1200	1999
Okinawa Seawater Pumped Hydro	Pure	30	1999
Kannagawa	Pure	940	2005
Omarugawa	Pure	1200	2007
Shumarinai	Hybride	1	2013
Kyogoku	Pure	200	2014

*Liste des installations PHS au Japon (Source : Pumped Hydroelectric Storage, Chi-Jen Yang, Center on Global Change, Duke University)*

## **b. Perspectives**

Bien que déjà doté d'une capacité de stockage hydraulique très importante, le Japon continue à avoir de nombreux projets pour de nouvelles centrales. De plus, la rénovation et la modernisation des anciennes installations pourraient permettre d'augmenter encore fortement cette capacité de stockage à l'avenir.

Par ailleurs, le Japon est aussi un des leaders mondiaux dans le développement de nouvelles technologies dans le domaine du stockage hydraulique et notamment à travers la recherche active

autour des centrales PHS utilisant l'eau de mer et des centrales à vitesse variable (*variable speed PHS*).

La plupart des installations existant aujourd'hui sont à vitesse fixe dans le sens où, durant la phase de pompage, celles-ci ne peuvent utiliser qu'une certaine fréquence électrique ce qui limite fortement leur utilisation directe pour le stockage d'énergie provenant de sources renouvelables, généralement hautement instables, et entraîne également une perte d'efficacité dans le pompage. Le Japon est pionnier dans ce domaine depuis les années 90 notamment avec la construction de la centrale d'Okawachi qui est une des plus grandes du Japon avec une puissance totale de 1 280 MW et dont deux des quatre unités de génération/pompage sont à vitesse variable et ont été fournies par Hitachi. Une des autres entreprises japonaises leaders dans ce domaine est Toshiba qui a construit en 1990 la première centrale de ce type, à la Yagisawa Pumped Storage Power Plant en collaboration avec TEPCO. Cette innovation se généralise aujourd'hui peu à peu, et ce particulièrement en Europe.

Les plus grandes difficultés liées aux installations PHS sont dues aux contraintes environnementales qui imposent un cadre particulier pour la construction de telles centrales. Utiliser la mer comme réservoir inférieur permettrait alors de contourner en partie cette difficulté. Le Japon a ainsi construit à Okinawa la première centrale de ce type au monde en 1999, montrant la faisabilité de l'idée. Le projet a été financé par l'Agency for Natural Resources and Energy (ou Enecho), une agence du METI, et construit par l'Electric Power Development Company (EPDC). Aujourd'hui des projets similaires voient le jour partout dans le monde et particulièrement en Europe. Notons aussi l'existence du très ambitieux Dead Sea Power Project qui utiliserait l'eau de la mer morte et de la mer Méditerranée qui générerait une puissance allant jusqu'à 2 500 MW une fois opérationnel, même si les obstacles à ce projet, tant techniques que géopolitiques, sont nombreux.

Notons toutefois le faible nombre de publications académiques japonaises sur le sujet dû au fait que cette technologie est scientifiquement mature et bien comprise.

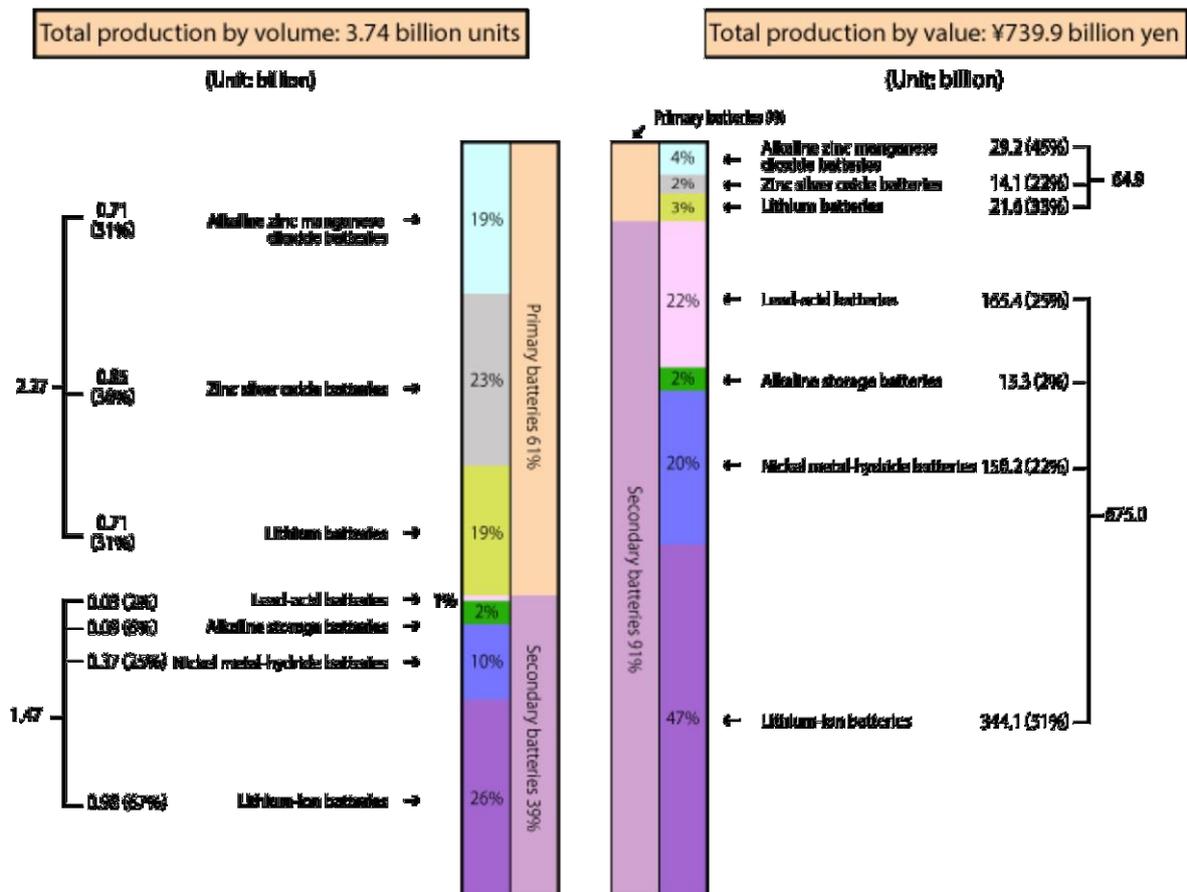
## II- Batteries

Les batteries, connues et utilisées depuis la deuxième moitié du 19<sup>ème</sup> siècle, sont aujourd'hui encore une des technologies essentielles de stockage d'énergie. Les batteries sont constituées d'unités généralement appelées piles (*cell* en anglais) générant du courant électrique à partir de réactions chimiques entre ses constituants. Chaque pile est constituée de deux demi-piles, une demi-pile étant l'association d'un électrolyte et d'une électrode. Les caractéristiques des piles dépendent évidemment largement de l'association utilisée pour le couple électrolyte-électrode. Nous nous intéressons dans ce qui suit aux batteries dites rechargeables (*secondary batteries*), à savoir celles dont le sens de la réaction peut être inversé grâce à l'injection de courant dans la batterie.

Un des grands avantages des batteries rechargeables est leur rendement charge-décharge (*energy efficiency*) qui approche souvent, pour les technologies les plus avancées, des 100 %, la plupart ayant un rendement supérieur à 90 %, ce qui est bien meilleur que la plupart des autres méthodes de stockage d'énergie. Ces batteries sont cependant généralement plus coûteuses et mettent en jeu une

dépendance par rapport à certains matériaux, tels que les terres rares pour les batteries Lithium-Ion par exemple.

Dans ce qui suit, nous décrivons les principaux types de batterie utilisés au Japon d'après les chiffres avancés par le METI ainsi que deux technologies voisines au développement prometteur.



*Chiffres de production de batteries au Japon (Source : Machinery Statistics du METI)*

## 1. Batteries au plomb (*lead-acid batteries*)

L'accumulateur au plomb se caractérise par l'utilisation des deux électrodes de plomb et de dioxyde de plomb qui se transforme en sulfate de plomb (qui est une espèce toxique) en libérant du courant électrique. En raccordant en série plusieurs accumulateurs, il est alors possible d'obtenir la tension souhaitée.

Les batteries au plomb sont capables de générer une forte puissance de 180 W/kg, ce qui les rend très utiles pour des applications nécessitant l'utilisation d'une grande quantité d'énergie sur une courte période, et sont donc notamment très utilisées dans le démarrage des voitures, ce qui constitue d'ailleurs leur application la plus courante. Mais ces batteries, avec leur coût plutôt faible,

trouvent de nombreux autres emplois tels que la propulsion de petits véhicules électriques, comme source d'énergie de secours dans les systèmes d'alimentation sans interruption, le stockage d'énergie distribué, etc. et ce malgré une densité énergétique assez faible ne dépassant guère les 110 Wh/L.

## **2. Accumulateurs Nickel-Hydrure métalliques (NiMH batteries)**

### **a. Fonctionnement et caractéristiques**

D'abord étudiés pour leur capacité à stocker de grandes quantités d'hydrogène dans de petits volumes, les alliages métalliques à base de lanthane (et autres terres rares) et de Nickel, alliages dits hydrurables pour leur capacité à s'associer à des atomes d'hydrogène, ont été associés dès 1986 à une électrode positive d'oxyhydroxyde de nickel, le tout baignant dans une solution d'hydroxyde de potassium pour former les accumulateurs NiMH.

Dotés d'une plus grande densité énergétique que les batteries au plomb (deux fois plus importante) et que les accumulateurs NiCad (Nickel-Cadmium) avec des composants à la toxicité relativement faible, ces batteries sont de plus relativement faciles d'utilisation dans la mesure où les taux de charge et de décharge faibles comme élevés sont acceptés, ce qui n'est pas le cas des batteries Lithium-Ion par exemple (voir la partie suivante) nécessitant alors l'utilisation de systèmes complexes de gestion de batterie. De plus, si les premières versions de ces batteries avaient un important « effet mémoire », consistant en une perte de la capacité de charge après une décharge incomplète, ce défaut a été progressivement corrigé au cours des dernières années, faisant de cette technologie une véritable alternative moins onéreuse aux batteries Lithium-Ion malgré une densité énergétique moins importante, notamment pour la plage de températures de fonctionnement plus étendue de ces batteries ainsi que leurs composants présentant moins de danger en cas de fuite.

### **b. Recherche actuelle et perspectives**

De nombreux constructeurs automobiles japonais tels que Honda ou Toyota utilisent ces batteries pour leurs modèles électriques ou hybrides, souvent comme batteries de traction et ces batteries sont communément utilisées pour les produits de consommation courante. D'autres grands acteurs industriels japonais tels que Kawasaki et Mitsubishi misent également sur cette technologie. Par ailleurs, le Japon est troisième mondial pour ce qui est du nombre de publications sur le sujet et parmi les chercheurs japonais faisant autorité en la matière on peut notamment citer Eiji HIGUCHI et Hiroshi INOUE de l'université de la Préfecture d'Osaka, Kazuya NISHIMURA de Kawasaki Heavy Industries ou encore Tetsuo SAKAI et Tomoaki TAKASAKI du National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST).

## **3. Batteries Lithium-Ion**

### **a. Fonctionnement et caractéristiques**

Les électrodes des premières batteries Lithium-Ion, commercialisées par l'entreprise japonaise Sony, étaient constituées de graphite pour la cathode (électrode positive) et de dioxyde de Cobalt et de Lithium pour l'anode  $\text{LiCoO}_2$  (électrode négative), entre lesquelles circulent des ions Lithium, ces ions

étant piégés dans l'une ou l'autre électrode (selon si on est en phase de charge ou de décharge) par intercalation. D'autres matériaux ont par la suite été utilisés pour les électrodes des batteries Lithium-Ion, dans le but d'en améliorer les caractéristiques et notamment la densité énergétique ainsi que la dépendance par rapport à des composés rares ou coûteux (le cobalt pour le  $\text{LiCoO}_2$  par exemple).

Une des grandes problématiques entourant le développement des batteries Lithium-Ion est la sécurité. En effet, le lithium est très instable et réagit de manière particulièrement violente avec l'eau, réaction résultant en la formation d'hydroxyde de lithium et de dihydrogène gazeux, ce qui rend difficile l'utilisation d'électrolytes aqueux et nécessite une isolation parfaite de la batterie, notamment par rapport à l'humidité. Les batteries Lithium-Ion sont donc particulièrement contraignantes du point de vue de la sûreté, ce qui se traduit par des coûts de fabrication et de test plus élevés. De plus, les batteries Lithium-Ion nécessitent un important dispositif électronique de contrôle et de gestion de la charge, de la décharge, du voltage, etc. de chacune des piles de la batterie, celles-ci étant particulièrement dangereuses (risques d'explosion notamment) en cas de non-respect des procédures de charge et de décharge, ce qui résulte, là encore, en des coûts supplémentaires par rapport aux technologies concurrentes. Par ailleurs, la durée de vie des batteries Lithium-Ion dépend fortement des conditions d'utilisation. Ainsi, une charge ou une décharge en dehors de la plage des 0 à 45 degrés Celsius est préjudiciable au nombre de cycles que peut effectuer la plupart des batteries Lithium-Ion. De plus, il a été observé que ces batteries durent plus longtemps quand elles ne sont soumises qu'à des recharges partielles.

Cependant, la technologie des batteries Lithium-Ion est incontestablement celle qui génère le plus d'enthousiasme aujourd'hui, tant chez les investisseurs que dans les milieux académiques (le mot-clé lithium est ainsi celui qui est ainsi le plus associé aux articles traitant de batteries rechargeables dans les publications des cinq dernières années). La promesse d'importantes réductions de coûts, permises par les économies d'échelle réalisées grâce à une augmentation de la production, à travers des projets tels que celui de Tesla par exemple<sup>1</sup>, et grâce au perfectionnement des méthodes de production et des architectures des batteries, rendent en effet cette technologie particulièrement attractive.

En attendant ces progrès attendus, les batteries Lithium-Ion ont déjà la densité énergétique la plus élevée parmi les batteries actuelles grâce aux propriétés physico-chimiques du lithium avec une densité massique allant jusqu'à 250 Wh/kg, une densité volumique allant jusqu'à 620 Wh/L et une puissance massique allant jusqu'à 2 600 W/kg (pour le modèle *High Power Lithium Ion ANR26650 M1 A*), ce qui est largement au-delà des performances des autres systèmes de batteries. De plus, les batteries Lithium-Ion ne présentent pas d'effet mémoire contrairement aux batteries au Nickel et leur autodécharge (phénomène où la batterie se décharge même si non connectée à un circuit externe à cause de réactions internes) est de l'ordre de quelques pourcents par an pour les modèles récents. Ces caractéristiques, auxquelles on peut ajouter un besoin de maintenance inexistant, en font des batteries très utiles pour les systèmes embarqués, particulièrement dans le domaine des véhicules électriques mais aussi dans les appareils électroniques mobiles ainsi que dans certains produits nécessitant une grande puissance.

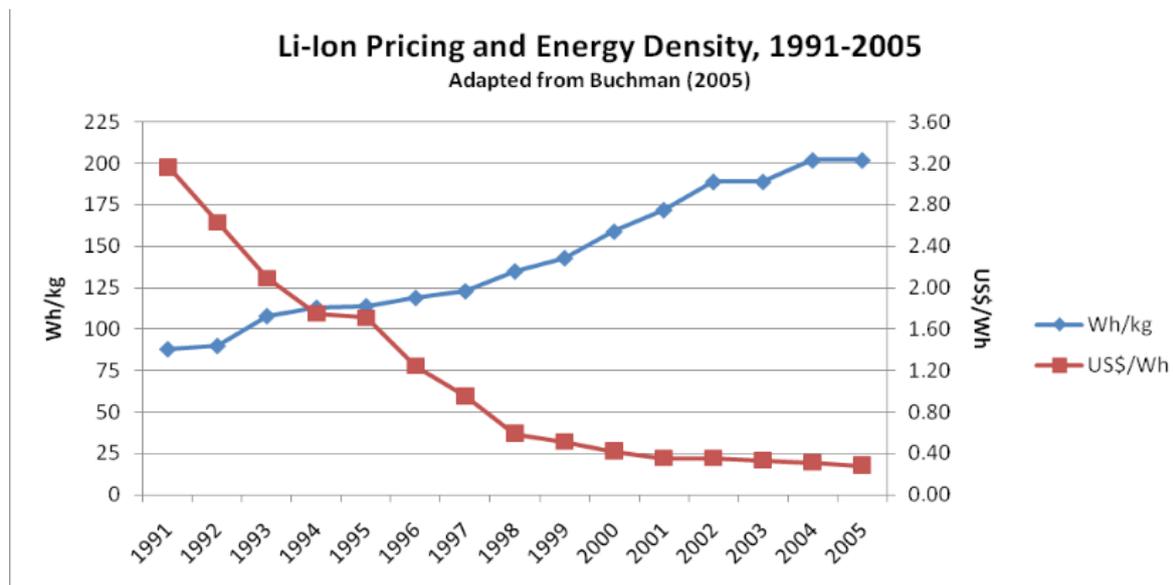
## **b. Recherche actuelle et avenir des batteries Lithium-Ion**

Notons tout d'abord que les batteries Lithium-Ion ont connu des progrès considérables dans leurs performances au cours des vingt dernières années tant pour la vitesse de charge que pour la densité énergétique ou pour le coût. Ainsi, de 1991 à 2005, la capacité énergétique rapportée au coût a ainsi

---

<sup>1</sup> Pour plus d'informations, voir ce lien : [https://www.tesla.com/fr\\_FR/gigafactory](https://www.tesla.com/fr_FR/gigafactory)

été multipliée par 10, passant de 0,3 Wh par dollar à 3 Wh par dollar (voir graphique ci-dessous). Aujourd'hui, on situe le coût des batteries Lithium-Ion entre 300 et 500 dollars/kWh.



*Prix et densités des batteries Lithium-Ion (Source : David L. Anderson, Duke University, 2009)*

Cependant, étant donné l'intérêt suscité par ces batteries, la recherche n'en demeure pas moins soutenue et de nombreux efforts sont faits pour améliorer, entre autres, la sûreté, la densité énergétique, le temps de recharge et la durée de vie des batteries Lithium-Ion. Ces efforts s'orientent vers les possibilités offertes par l'utilisation de nouvelles structures et matériaux pour les différents éléments constituant les batteries Lithium-Ion, à savoir les deux électrodes et l'électrolyte. Notons également le recours de plus en plus fréquent aux nanomatériaux dans ces travaux de recherche.

Ainsi, de nombreux chercheurs se penchent sur l'incorporation à l'anode de matériaux autres que le graphite traditionnellement utilisé pour l'anode tels qu'un alliage de dioxyde de titane et d'aluminium, qui permettrait, selon le MIT (Massachusetts Institute of Technology) qui est à l'origine de la tentative, de multiplier par quatre la densité énergétique de la batterie, ou encore une anode contenant du lithium, qui aurait permis à une équipe de Stanford d'obtenir des résultats similaires. Le silicone est également un matériau prometteur, sa densité énergétique étant connue pour être importante, le principal obstacle pour leur utilisation dans les batteries Lithium-Ion étant la grande variation de volume que connaissent les électrodes à base de silicone lors de l'insertion de lithium.

D'intenses travaux sont aussi menés au sujet des cathodes. Dans ce domaine, l'industrie japonaise s'est distinguée ces dernières années par de nombreuses percées, malgré la concurrence sud-coréenne de LG-Chem. Citons notamment la batterie conçue par Subaru en 2007 pour sa voiture G4e munie d'une cathode en vanadium qui se charge à 80 % en moins de 15 minutes pour une portée de 200 km ou encore la cathode à l'oxyde de Nickel Manganèse Cobalt (NMC) utilisée par les chercheurs de Nissan en 2009 pour atteindre le double de la densité énergétique des batteries Lithium-Ion conventionnelles, suivis en 2014 par une équipe de chercheurs de la *School of Engineering* de l'Université de Tokyo et de *Nippon Shokubai* qui ont mis au point une cathode à la densité énergétique sept fois supérieure à la densité usuelle en injectant du cobalt dans la structure cristalline de l'oxyde de lithium. En 2014, Nissan a aussi annoncé l'aboutissement du développement

d'une méthode d'analyse du fonctionnement des cathodes et notamment de l'activité des électrons lors des phases de charge et de décharge, ce qui constitue, d'après les chercheurs de la firme japonaise, une étape indispensable vers l'amélioration des batteries actuelles. Sony, entreprise pionnière dans l'industrie des batteries Lithium-Ion dans les années 90, oriente ses équipes vers des électrodes à base de soufre, donnant comme objectif à ses batteries Mg-S (électrodes Soufre et Magnesium) et Li-S (électrodes lithium métallique et soufre) de dépasser la densité symbolique de 1 000 Wh/L dès 2020, en ciblant de manière prioritaire le marché des batteries pour appareils mobiles.

La recherche s'intéresse aussi à d'autres sources d'améliorations potentielles, notamment la gestion de la charge des batteries qui pourrait en améliorer considérablement la durée de vie et la vitesse de charge comme l'ont montré plusieurs projets, dont celui de Qnovo déjà commercialisé par certains constructeurs de smartphones, ou encore le type d'électrolyte utilisé. Pour cette dernière voie de recherche, la piste la plus stimulante est celle consistant à remplacer les électrolytes liquides par des électrolytes sous forme solide pour former une *solid state battery* qui, en plus de laisser espérer des performances bien meilleures que les batteries conventionnelles, donnent la possibilité de concevoir des batteries plus sûres puisque ne contenant plus de substance inflammable susceptible de provoquer de graves accidents en cas de fuite et pouvant être utilisées sur une plage de température plus grande que les batteries actuelles. Le constructeur automobile japonais Toyota a ainsi identifié ces batteries comme une part essentielle du développement futur de ses véhicules électriques, les efforts de ses équipes de recherche, en collaboration avec le *Tokyo Institute of Technology* et le *High Energy Accelerator Research Organization Japan*, résultant, comme annoncé en mars 2016, en l'obtention d'électrolytes solides pour des batteries fonctionnant normalement à des températures allant de -30 à 100 degrés Celsius tout en conservant une densité énergétique similaire aux batteries classiques avec un faible temps de charge et une durée de vie plus longue<sup>2</sup>. Hitachi Zosen et NGK Insulators travaillent également sur des prototypes de batteries du même type, la première firme ayant réussi à obtenir des performances similaires à celles de la batterie de Toyota avec une densité énergétique annoncée comme plus élevée et une commercialisation annoncée à l'horizon 2025 pour les véhicules électriques et la deuxième consacrant ses efforts à des batteries de plus petite taille pour des usages domestiques tout en promettant des modèles fonctionnels dès 2017. Un autre groupe de recherche, mené par Atsushi Unemoto et Shinichi Orimo de l'*Advanced Institute for Materials Research* (AIMR) de l'université du Tohoku, en collaboration avec l'*Institute for Materials Research* (IMR) et *Mitsubishi Gas Chemical*, travaillent également sur des électrodes en soufre pour des batteries Li-S entièrement solides avec une densité énergétique annoncée supérieure à 1 410 Wh/kg et un fonctionnement stable jusqu'à 120 degrés Celsius durant 45 cycles de charge-décharge.

Des travaux de recherche se sont aussi penchés sur les batteries dites Li-Air qui combinent l'utilisation d'une anode de Lithium métallique et d'une cathode associant atomes de lithium et molécules de dioxygène. Les études théoriques montrent que ces batteries pourraient fournir une densité énergétique allant jusqu'à 12 kWh/kg, ce qui est très proche de la densité de l'essence (13 kWh/kg). Cependant, seule une densité de 1,7 kWh/kg a pu être implémentée en technologie Lithium-Air et ce seulement au niveau de la pile, une application commerciale au niveau de la batterie étant encore très éloignée. En effet, les défis technologiques et scientifiques sont encore

---

<sup>2</sup> Selon le Tokyo Institute of Technology (<http://www.titech.ac.jp/english/news/2016/033769.html>)

nombreux, notamment au niveau du choix de l'électrolyte et de la structure de la cathode, et, si cette voie offre de grandes promesses, la plupart des chercheurs considère que les applications industrielles de cette technologie sont inenvisageables à court et à moyen terme.

Par ailleurs, pour ce qui est de la recherche académique, le Japon est quatrième mondial derrière les États-Unis, la Chine et la Corée du Sud pour ce qui est du nombre de publications sur le sujet des batteries Lithium-Ion et occupe la même position sur le sujet des batteries Lithium-Air, le pays étant troisième sur celui des *Solid State Batteries*, devancé seulement par la Chine et les États-Unis. Parmi les chercheurs japonais, on peut citer :

- Pour la recherche sur les batteries Lithium-Ion en général, Zenpachi OGUCHI et Yoshiharu UCHIMOTO de l'université de Kyoto mais aussi Haoshen ZHOU du National Institute of Advanced Industrial Science and Technology et Kiyoshi KANAMURA de la Tokyo Metropolitan University ;
- Pour la recherche sur les batteries Lithium-Air, Nobuyuki IMANISHI et Yasuo TAKEDA de la Mie University ;
- Pour la recherche sur les Solid State batteries, Akitoshi HAYASHI et Masahiro TATSUMISAGO de l'université de la préfecture d'Osaka ou encore Yasutoshi IRIYAMA de l'université de Kyoto.

#### **4. Batteries Sodium-Soufre (NaS batteries)**

Munies d'électrodes de sodium sous forme de sel fondu et de soufre séparés par des électrolytes BASE (Beta Alumina Solid Electrolyte) et fonctionnant à très hautes températures (350 degrés Celsius pour les premières versions, certains modèles actuels fonctionnent à des températures aussi basses que 100 degrés), les batteries NaS permettent d'atteindre des densités énergétiques de 750 Wh/kg et 151 W/L ainsi qu'une puissance de 200 W/kg. Cette haute densité énergétique ainsi que le faible coût de fabrication de ces batteries et l'absence de contraintes géographiques pour leur installation (par opposition à d'autres formes de stockage comme le stockage par pompage-turbinage) en font un outil de stockage idéal pour le réseau électrique, les conditions de températures élevées et le haut risque d'accident en cas de contact avec l'air extérieur ou avec de l'humidité les rendant particulièrement peu adaptées aux utilisations domestiques.

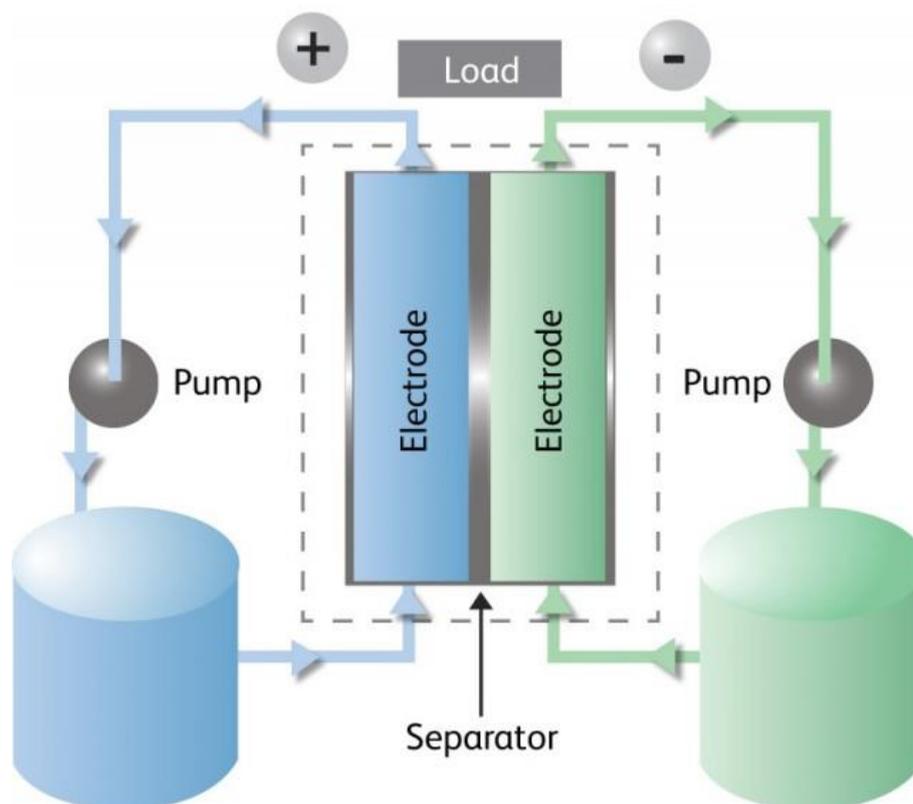
Si le principe de ces batteries est américain et a vu le jour dans les laboratoires de Ford Motors à la fin des années 60, le Japon est le seul pays à avoir développé cette technologie de manière considérable et à grande échelle dès les années 80, le développement des batteries NaS étant même considéré en 1980 par le METI comme une des quatre voies de recherche prioritaires pour le stockage d'énergie dans le cadre du Moonlight Project. À travers une collaboration entre la Tokyo Electric Power Company (TEPCO) et NGK Insulators, le pays a ainsi mis en place le réseau de batteries le plus important au monde avec plus de 17 centrales et une capacité dépassant les 250 MW en 2013 d'après NGK, principalement comme stockage de support pour le réseau électrique ou pour des centrales éoliennes.

La recherche académique continue également à être active puisqu'une collaboration entre Sumitomo Electric Industries et des chercheurs de l'université de Kyoto a permis la conception d'une batterie NaS fonctionnant à basse température (100 degrés Celsius) avec une densité de 290 Wh/kg et un

coût qui serait dix fois inférieur à celui d'une batterie Lithium-Ion. Par ailleurs, de nombreuses publications japonaises influentes sur le sujet continuent à voir le jour, notamment par des chercheurs de l'université de Kyoto tels que Toshiyuki NOHIRA ou Rika HAGIWARA, par des chercheurs de Sumitomo Electric Industries tels qu'Akitoshi HAYASHI ou Atsushi FUKUNAGA ou encore des chercheurs de l'université de la préfecture d'Osaka tels que Masahiro TATSUMISAGO ou Akitoshi HAYASHI.

## 5. Batteries à flux (*flow batteries*)

Une batterie à flux est constituée de deux réservoirs reliés à une cellule électrochimique formée de deux solutions électrolytiques séparées par une membrane. Le liquide est pompé à travers la cellule électrochimique où les échanges ioniques à travers la membrane permettent d'établir un courant électrique tout comme pour une batterie classique, la différence majeure étant que l'énergie est stockée dans des réservoirs qui contiennent les deux solutions électrolytiques plutôt que dans les électrodes. La quantité totale d'énergie électrique que peut générer la batterie est alors fonction de la taille des réservoirs.



*Fonctionnement d'une batterie à flux (Source : [www.extremetech.com](http://www.extremetech.com))*

On peut distinguer deux types de batteries à flux, celles dites « pures » et celles dites « hybrides ». Les batteries pures fonctionnent selon le schéma décrit plus haut et font généralement intervenir

une réaction d'oxydoréduction. Les batteries les plus courantes de ce type sont celles à vanadium et celles à acier-chromium (*iron-chromium flow batteries*). Le principal avantage de ces batteries est dans la séparation entre source d'énergie et production énergétique (à savoir les réservoirs d'électrolytes et la cellule électrochimique) ce qui permet notamment d'augmenter la capacité des batteries simplement en augmentant la taille de leurs réservoirs, de les recharger très rapidement en en changeant les réservoirs (et en ré-électrifiant les réservoirs déchargés en parallèle par exemple, sans qu'il y ait besoin de déconnecter la batterie du réseau) mais aussi de pouvoir facilement interrompre la décharge en cas de défaillance, ce qui n'est pas le cas des batteries classiques (où l'électrode baigne directement dans la solution électrolytique). La durée de vie de ces batteries est aussi particulièrement longue, tant en nombre de cycles charge-décharge, plus de 10 000 en général, qu'en temps, plus de 10 ans. De plus, l'efficacité énergétique de ces batteries est appréciable puisqu'elle est de plus de 75 % dans les systèmes actuels. Les inconvénients de cette technologie résident dans la complexité des installations utilisées, comparées à celles des batteries classiques, mais aussi dans la densité volumique relativement faible de leur capacité énergétique.

Les systèmes hybrides ont un fonctionnement similaire si ce n'est qu'une des espèces chimiques entrant en jeu dans la réaction est sous la forme d'une électrode solide. La capacité de ces batteries est alors fonction de la taille du réservoir ainsi que de celle de la surface de l'électrode. Les batteries Zinc-Bromine sont les plus courantes et offrent une densité énergétique et un voltage élevés par rapport aux autres batteries à flux tout en ayant une efficacité comparable de plus de 75 %. Les inconvénients sont cependant nombreux avec une durée de vie plus limitée, la nécessité de matériaux coûteux et la présence de composants toxiques entre autres.

D'autres technologies de batteries à flux sont actuellement en cours de développement et offrent des alternatives prometteuses à celles citées ci-dessus. Citons notamment les batteries à flux sans membranes qui utilisent le phénomène d'écoulement laminaire pour avoir une cellule électrochimique sans membrane (qui est un des composants les plus coûteux des systèmes actuels). Des batteries utilisant des composants organiques sont aussi étudiées, ces composants présentant l'avantage d'être plus faciles à synthétiser<sup>3</sup>. Notons également que de nombreux efforts de recherche s'orientent vers la conception de batteries à flux Lithium-Ion.

La principale caractéristique des batteries à flux est de pouvoir dimensionner puissance et capacité énergétiques indépendamment, ce qui permet d'avoir des batteries pouvant se décharger durant plusieurs heures voire plusieurs jours à n'importe quelle puissance (ce qui n'est pas le cas des batteries classiques par exemple). Ceci les rend donc particulièrement adaptées au lissage des pics de demande du réseau électrique, à l'équilibrage de charge et au stockage de l'énergie générée irrégulièrement par les centrales solaires et éoliennes. Des recherches autour de leur utilisation pour les véhicules électriques sont aussi en cours, la faible densité énergétique par unité de volume des principaux types de batteries à flux étant un des obstacles majeurs pour le moment.

Aujourd'hui, deux des trois plus grandes installations de batteries à flux pour le stockage à grande échelle sont japonaises. Les deux ont une puissance de 15 MW chacune et sont à Hokkaido. Dans cette technologie au marché encore naissant (les plus grandes installations avaient une puissance de l'ordre de 5 MW il y a moins d'une dizaine d'années), l'entreprise japonaise Sumitomo est un des leaders mondiaux. Par ailleurs, les professeurs Tatsumi ISHIHARA et Kaname TAKEYA de la Kyushu University ont mis au point, au sein des équipes de Power Japan Plus (une start-up japonaise) une batterie organique à base de coton dont le carbone est restructuré pour servir d'électrode et qui a donc un coût très faible comparé aux autres batteries. Ces batteries, actuellement en phase de test, seraient vingt fois plus rapides à recharger que les batteries Lithium-Ion et pourraient équiper les

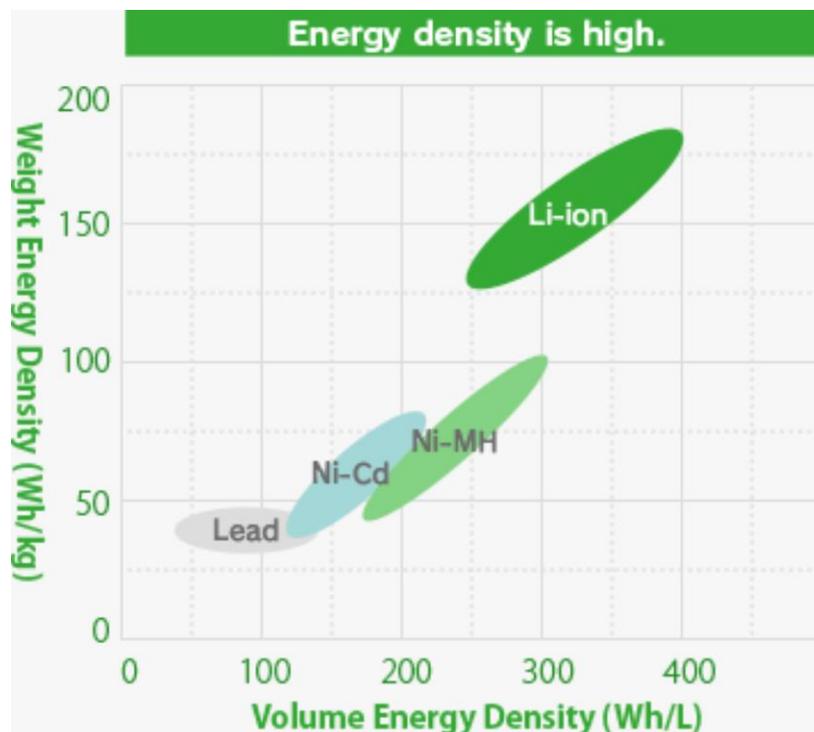
---

<sup>3</sup> Pour plus d'informations <http://arpa-e.energy.gov/?q=slick-sheet-project/organic-flow-battery-energy-storage> ou <http://aziz.seas.harvard.edu/electrochemistry#electrochem-energy>

véhicules électriques leur permettant, d'après Power Japan Plus, d'avoir une portée de plus de 480 km.

## 6. Bilan

Le graphique ci-dessous résume bien les forces relatives en termes de densités massiques et volumiques des différentes technologies de batteries évoquées ici. Rappelons toutefois que ces densités ne suffisent pas à expliquer l'intérêt de ces différentes batteries et que d'autres considérations telles que leur coût, la complexité technique de leur conception, la rareté des matériaux utilisés et la nature même de la technologie employée (qui joue dans le potentiel de développement de la batterie) doivent être prises en compte au moment de les comparer.



*Densités massiques et volumiques des différents types de batteries (Source : Automotive Energy Supply Corporation)*

Enfin, même si l'industrie des batteries, et celle des batteries Lithium-Ion plus particulièrement, est sujette à de nombreux effets d'annonce non suivis de commercialisation, la scène de la recherche japonaise en la matière semble très dynamique et déterminée à conserver (ou à reprendre) son leadership en matière de batteries rechargeables alors que celles-ci semblent, aujourd'hui plus que jamais, au cœur de la question énergétique. Cette importance stratégique de l'innovation autour des batteries se traduit depuis quelques années par une volonté claire du gouvernement japonais d'appuyer toute initiative dans le domaine, à travers les financements directs accordés par le METI (annoncés à hauteur de 93 milliards de Yens en 2015), de la formation d'une équipe de réflexion en 2012 sur la stratégie à adopter au niveau national pour les batteries, la Storage Battery Strategy

Project Team, et le rôle, scientifique et financier, joué par des agences gouvernementales telles que la *New Energy and Industrial Technology Development Organization* (NEDO) ou la *Japan Science and Technology Agency* (JST).

### III- Flywheels Energy Storage (ou batteries à volant d'inertie)

#### 1. Principe

Les *Flywheels* sont constitués d'un rotor, accéléré par un moteur électrique, qui tourne dans une enceinte sous vide (pour minimiser les pertes d'énergie par frottements). Pour y stocker de l'énergie, il suffit d'accélérer le rotor grâce au moteur. Pour utiliser l'énergie stockée, il faut faire tourner, grâce au rotor, une turbine générant alors de l'énergie électrique, ce qui fait aussi baisser la vitesse de rotation du rotor. La position du rotor peut être maintenue grâce à un dispositif mécanique, ce qui entraîne une perte rapide de l'énergie stockée, ou à une sustentation magnétique active, généralement plus efficace mais aussi plus coûteuse.

#### 2. Caractéristiques et utilisations

Les caractéristiques des *Flywheels*, à savoir une densité énergétique relativement faible (100 à 130 Wh/kg pour les systèmes les plus efficaces là où certaines batteries Lithium-Ion vont jusqu'à 250 Wh/kg) et une perte d'énergie importante dès que le temps de stockage devient long (à partir de quelques heures), en font des batteries peu adaptées au stockage de grandes quantités d'énergie pendant de longues durées notamment dans le cadre du *load shifting* (à savoir le stockage d'excès d'énergie pour un usage futur en cas de pic de demande voire de défaillance du réseau).

De plus, les *Flywheels* ont un coût de fabrication important notamment à cause des matériaux utilisés. En effet, le rotor doit avoir une résistance importante pour permettre de grandes vitesses de rotation et donc le stockage de grandes quantités d'énergie. Aujourd'hui, la meilleure solution consiste à employer des matériaux composites à base de carbone, même s'il existe, notamment aux États-Unis, des projets essayant des matériaux moins résistants, comme l'acier, qui offrent l'avantage d'un coût bien moindre.

Cependant, les coûts de maintenance des *flywheels* sont très faibles voire inexistantes (souvent le système est fourni comme une boîte noire) pour une durée de vie s'étendant sur des décennies et un nombre de cycles de rechargement complets allant jusqu'à 10 000 000. Ajoutons également que ces systèmes sont peu sensibles aux variations de température, contrairement à d'autres formes de stockage (dont les batteries Lithium-Ion).

De plus, les *Flywheels* permettent de délivrer un courant très régulier et très stable à partir d'une énergie stockée sur de courtes durées, ce qui permet, par exemple, de lisser les flux erratiques (en

intensité et en fréquence) issus de certaines sources d'énergie renouvelables comme les énergies solaire ou éolienne. Les *Flywheels* ont aussi un temps de rechargement et surtout un temps de réponse très courts ce qui les rend très utiles pour les Alimentations Sans Interruption (ou *Uninterruptible Power Supply*) où ils peuvent couvrir le laps de temps entre la défaillance du réseau et la mise en route de la source d'énergie de secours. De manière générale, les *Flywheels* permettent donc d'assurer une plus grande stabilité et robustesse du réseau électrique.

Une autre utilisation possible des *Flywheels* consiste à les employer pour accumuler et concentrer progressivement de grandes quantités d'énergie. En effet, certaines activités, comme l'industrie minière ou les laboratoires de physique des hautes énergies, nécessitent une très grande puissance de courant sur un court laps de temps et utiliser directement le réseau électrique peut souvent provoquer une défaillance, d'où l'intérêt des *Flywheels*, particulièrement adaptés à ce type d'usage.

Enfin, certains constructeurs automobiles envisagent d'employer cette méthode pour les voitures hybrides. Dans la plupart des modèles actuels, l'énergie cinétique récupérée par la voiture (lors des freinages typiquement) est stockée dans des batteries Lithium-Ion, ce qui nécessite une conversion en énergie électrique qui sera ensuite de nouveau convertie en énergie mécanique par un moteur, avec les pertes qu'impliquent de telles conversions. Or les *Flywheels* permettent de stocker directement l'énergie cinétique sous forme d'énergie mécanique, ce qui permettrait de minimiser ces pertes.

### **3. Les batteries à volant d'inertie au Japon**

Le déploiement des *Flywheels* est relativement récent au Japon mais cette voie est de plus en plus explorée. Par rapport au stockage hydraulique, le stockage d'énergie grâce à ces batteries permet en effet, entre autres avantages, de passer de 70 % à 85 % d'efficacité énergétique (soit le taux d'énergie réutilisable après conversion). Nous donnons ici deux exemples de projets japonais utilisant cette technologie illustrant les promesses de cette technologie au Japon.

#### **a. La Centrale de l'île de Dogo**

L'île Dogo est une petite île au large du Japon dont l'isolement rend sa liaison avec le réseau électrique difficile, ce qui est compensé par l'utilisation de générateurs diesel. En 2003, Fuji Electric a mis en place un petit parc éolien sur l'île conjugué à un stockage d'énergie à base de *Flywheels*. Ces *Flywheels* ont pour objectif de rendre possible la suppression des générateurs diesel en stabilisant le courant issu du parc éolien et en conservant les excès d'énergie dus à des vents brusques.

Les résultats sont pour le moment prometteurs et les *flywheels* ont ainsi permis d'étendre le déploiement du parc éolien en agissant à la fois pour le stockage de l'énergie éolienne et pour en rendre le flux de courant plus régulier, ce qui est d'autant plus essentiel que le réseau de l'île est particulièrement fragile. Face au succès de cette installation, Fuji Electric envisage ainsi d'employer des *flywheels* dans d'autres lieux pour faire du déploiement de l'éolien une alternative viable aux sources d'énergie présentes.

## **b. Projet de *Flywheel* à supraconduction**

En avril 2015, le *Railway Technical Research Institute*, en collaboration avec Kubotek Corporation, Furukawa Electric, Mirapro et le Bureau d'Entreprise Publique de la préfecture de Yamanashi, a mis au point, dans le cadre d'un projet soutenu et financé par la New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) depuis 2012, le plus grand *Flywheel* à supraconduction au monde. Le rotor ainsi que la base de sustentation sont en matériau supraconducteur à haute température (la sustentation est opérationnelle à 50 K, à comparer aux 20 K usuels) ce qui permet de faire diminuer le coût de la réfrigération et d'avoir une sustentation magnétique à moindre dépense énergétique.

Le rotor, de deux mètres de diamètre, d'un poids de quatre tonnes et effectuant 6 000 révolutions par minute, délivre ainsi une puissance de 300 kW pour une capacité de 100 kWh. Ce système est aujourd'hui utilisé pour stabiliser le courant électrique de l'énergie solaire produite par Tokyo Electric Power Company dans la préfecture de Yamanashi et pourrait aussi être employé dans le réseau ferroviaire japonais pour améliorer l'efficacité énergétique de ses lignes (en stockant notamment l'énergie de freinage des trains). De manière plus globale, la généralisation de cette nouvelle technologie à supraconduction permettrait, dans l'hypothèse du déploiement de 1,2 millions de kW de batteries *Flywheel* (ce qui est l'objectif annoncé à moyen terme), de faire une économie annuelle de 400 millions kWh (soit l'équivalent de 200 000 tonnes de CO<sub>2</sub>).

## **c. Publications académiques**

Le Japon est troisième mondial pour ce qui est du nombre de publications sur le sujet du stockage d'énergie grâce aux *Flywheels*, devancé seulement par la Chine et les États-Unis. De nombreux chercheurs continuent ainsi à avoir des publications influentes et parmi ceux-ci on peut citer Junichi ITOH, Kenta TANAKA et Noboru YAMADA de la *Nagaoka University of Technology* qui font partie des auteurs les plus prolifiques d'Asie et du monde, mais aussi Yuuki ARAI et Ken NAGASHIMA du *Railway Technical Research Institute*.

# **IV- Autres technologies**

## **1. Stockage d'énergie sous forme d'hydrogène**

D'après le METI, un des grands axes de la politique énergétique japonaise est la recherche autour de l'utilisation de l'hydrogène. Le gouvernement compte ainsi, d'ici 2020, faire de l'hydrogène la principale source d'énergie des voitures électriques avec le déploiement prévu de 40 000 véhicules carburant à l'hydrogène. Un des autres objectifs à moyen terme est de faire considérablement

baisser le coût de l'énergie hydrogène notamment en réalisant des économies d'échelle en généralisant son utilisation et en intensifiant l'effort de recherche.

Aujourd'hui, le stockage d'énergie grâce à l'hydrogène, au-delà des méthodes d'extraction d'hydrogène grâce aux hydrocarbures (qui restent cependant largement utilisées pour leur faible coût et malgré le fait que ces méthodes soient plus polluantes que l'utilisation directe des hydrocarbures), se fait principalement par électrolyse de l'eau. Il s'agit simplement, sous diverses conditions de température et de pression en fonction de la technologie utilisée, de faire passer un courant électrique dans l'eau la décomposant ainsi en dioxygène et dihydrogène. La ré-électrification de l'hydrogène, généralement grâce à une pile à combustible (ou *fuel cell*), permet ensuite d'utiliser l'énergie électrique ainsi stockée. Certaines technologies, connues sous le nom de *photoelectrochemical water splitting* et actuellement en cours de développement, utilisent directement l'énergie solaire pour générer l'hydrogène et fourniraient une source d'hydrogène parfaitement propre mais sont encore trop peu performantes pour constituer une alternative immédiate aux technologies plus polluantes actuellement utilisées.

Un des grands défauts des technologies de stockage utilisant l'hydrogène est leur faible efficacité énergétique. En effet, la phase de charge, à savoir celle où l'hydrogène est généré, ne conserve qu'entre 50 % et 80 % de l'énergie électrique fournie. La phase de décharge, ou ré-électrification de l'hydrogène, a un taux de conversion atteignant les 50 % pour les systèmes les plus performants, donnant ainsi une efficacité globale ne dépassant guère les 40 % ce qui est très faible comparé à d'autres technologies de stockage.

Une autre problématique est celle du stockage de l'hydrogène produit. Plusieurs alternatives existent aujourd'hui : le stockage sous forme gazeuse, qui présente une très faible densité volumique d'énergie, sous forme liquide, qui est coûteuse à atteindre et à maintenir (la température d'ébullition de l'hydrogène est d'environ 20 K) ou encore dans des cavités souterraines pour le stockage à grande échelle avec des capacités de l'ordre de 100 GWh (qui peuvent permettre par exemple de compenser les variations saisonnières de certaines énergies renouvelables). D'autres méthodes sont l'objet de recherches actives parmi lesquelles on peut notamment citer les tentatives prometteuses de stockage par adsorption dans des nanotubes de carbone.

Cependant, l'enthousiasme engendré par les technologies à hydrogène est bien réel et s'explique, d'une part, par la volonté, grâce à l'amélioration des techniques actuellement utilisées, d'avoir une efficacité dépassant les 50 % d'ici quelques années et, d'autre part, par des atouts qu'aucune technologie connue ne possède. En effet, l'hydrogène présente une très haute densité énergétique massique (même si rapportée au volume cette densité est faible pour l'hydrogène gazeux non comprimé). De plus, l'utilisation d'hydrogène permet d'avoir une source d'énergie parfaitement propre dans son utilisation - ce qui est particulièrement avantageux pour les moyens de transport dans les grandes villes étant donnés les niveaux de pollution très élevés (notamment aux particules fines, en plus des dégagements de gaz à effet de serre) que certaines connaissent actuellement - facilement transportable et dont l'échelle d'utilisation est très modulable.

Au Japon, outre le développement très important du stockage hydrogène pour l'industrie automobile, 2016 a vu Toshiba commercialiser une entité autonome fonctionnant uniquement grâce aux énergies renouvelables, l'énergie solaire en l'occurrence, et à un stockage hydrogène de 1,8 MWh qui permet, par exemple, de subvenir à tous les besoins énergétiques (électricité et chauffage) de 12 chambres

de l'hôtel Henna tout au long de l'année. D'autres commandes ont suivi dont celle pour le port de Yokohama qui est utilisée pour réguler la demande des installations portuaires et qui peut, en cas de désastre, leur fournir 72 heures d'autonomie énergétique et celle pour la *Japan Railways Company* dans le but, ici encore, de garantir le bon fonctionnement des installations ferroviaires en cas de dysfonctionnement du réseau électrique. Par ailleurs, l'effort de recherche publique sur l'hydrogène continue à être très important au Japon et on peut notamment citer l'existence d'un département entier consacré au transport d'énergie sous forme d'hydrogène au sein de l'AIST.

## **2. Stockage d'énergie thermique**

Cette partie est consacrée aux technologies de stockage d'énergie reposant sur l'utilisation de l'énergie thermique comme support de stockage. Ces technologies peuvent être réparties en deux principales catégories : celle regroupant les méthodes destinées à un usage local, domestique ou industriel, et où l'énergie thermique est utilisée sous cette forme directement et celle regroupant les méthodes destinées à un usage à grande échelle au niveau du réseau électrique et où l'énergie thermique stockée est transformée pour être consommée sous forme d'énergie électrique.

Pour le stockage d'énergie lié au chauffage, les technologies de la première catégorie consistent à utiliser de l'énergie thermique (notamment solaire) ou électrique (notamment celle produite en excès par des sources d'énergie renouvelable) pour chauffer un matériau à forte capacité thermique (eau, roches, béton,...) qui, thermiquement isolés, pourront conserver cette chaleur qui sera réutilisée lors des périodes de forte demande pour réduire la consommation énergétique, notamment lors des périodes de froid en hiver. Le stockage lié au refroidissement se fait sur un principe similaire et ce notamment en gelant un réservoir d'eau par l'utilisation d'énergie électrique bon marché durant les périodes de plus faible demande (souvent dans la nuit donc) pour une utilisation de la glace ainsi produite lors des périodes de forte demande pour diminuer la consommation énergétique des systèmes de climatisation.

La plupart des technologies évoquées ci-dessus ont vocation au stockage à court terme de l'énergie thermique, soit typiquement sur une durée d'une journée à une semaine. Cependant, il existe des systèmes dits saisonniers (*Seasonal Thermal Energy Storage*) qui permettent de stocker de l'énergie thermique sur des durées plus longues et donc, par exemple, de stocker l'énergie thermique récupérée en été pour l'hiver. L'exemple le plus fameux de ce type de systèmes est celui de la *Drake Landing Solar Community* au Canada qui permet de fournir 97 % des besoins énergétiques de la communauté pour le chauffage grâce à de l'énergie solaire.

La deuxième catégorie concerne principalement les technologies de stockage électrique par pompe à chaleur. Le principe est celui d'une pompe à chaleur classique (telle que celles utilisées dans les systèmes de réfrigération par exemple) qui stocke l'énergie électrique en transférant de la chaleur d'une source froide vers une source chaude, ce qui constitue la phase de charge. La phase de décharge consiste alors à laisser la chaleur s'écouler dans le sens naturel, à savoir de la source chaude vers la source froide, produisant ainsi un travail mécanique qui sert ensuite à produire de l'électricité. Cette technologie est encore à un stade expérimental et peu de projets opérationnels existent à travers le monde (le plus avancé étant celui d'Isentropic Ltd., entreprise britannique qui rencontrerait actuellement des difficultés financières, qui avait annoncé une efficacité énergétique entre 70 % et 80 %). L'avantage de cette méthode est sa flexibilité qui permet, en assemblant de petites unités, de faire varier la capacité de stockage de quelques dizaines à plusieurs milliers de

Mégawatts, ce qui permettrait à cette technologie de couvrir plusieurs échelles d'utilisation. Un autre avantage de cette technologie est que les matériaux utilisés sont peu coûteux.

D'autres technologies sont également à l'étude. Citons notamment celle stockant l'énergie thermique dans du sel fondu, employée notamment en Espagne, ou encore celle utilisant une pompe à chaleur à dioxyde de carbone transcritique<sup>4</sup> qui viserait un rendement de 60 % pour des unités dont la capacité irait de 1 à 100 MW en puissance sur une autonomie de 4 à 8 heures. Une autre piste prometteuse est celle du stockage d'énergie thermique par la modification des liaisons de certaines molécules<sup>5</sup>.

Au Japon, une agence gouvernementale existe pour étudier l'impact de ces dispositifs et financer des projets de recherche autour de ces technologies, la *Heat Pump and Thermal Storage Technology Center of Japan*. D'après cette agence, en 2013, les unités recourant au stockage thermique auraient allégé les pics de demande d'énergie électrique de 1 940 000 kW. Il est également prévu que le déploiement généralisé de ces technologies permette une économie annuelle de près de 80 000 GWh en 2020 et de plus de 250 000 GWh en 2040.

### **3. Stockage d'énergie à air comprimé (*Compressed Air Energy Storage*, abrégé CAES)**

Dans les turbines à gaz classiques largement répandues dans la génération d'énergie électrique (notamment en cas de pic de demande), il y a deux phases : une première où l'air (dont le dioxygène est utilisé comme comburant) est comprimé avant une phase de détente où, après injection de combustible puis combustion, les gaz chauds ainsi obtenus traversent une turbine, fournissant une énergie mécanique qui peut alors être transformée en énergie électrique. Le fonctionnement du CAES reprend le même schéma en découplant ces deux phases. Ainsi, l'énergie à stocker est utilisée pour comprimer l'air, souvent dans une cavité naturelle aménagée, air dont la détente permettra ensuite de produire de l'énergie électrique par le même procédé qu'une turbine à gaz.

Le stockage d'énergie à air comprimé peut permettre de stocker de grandes quantités d'énergie pendant de longues durées, ce qui en fait une alternative envisageable au stockage hydro-électrique. De plus, les coûts d'installation sont moindres que ceux de cette dernière technologie, même si les tests de sûreté nécessitent souvent des moyens importants et que, tout autant que le stockage hydro-électrique, le CAES demande généralement un environnement géographique particulier (cavités souterraines, aquifères,...) pour emmagasiner l'air comprimé (même si les méthodes de stockage au-dessus du sol sont de plus en plus étendues au stockage à grande échelle).

Une des principales problématiques du CAES est la chaleur dégagée par la compression de l'air qui élève sa température jusqu'à rendre son stockage impossible dans cet état et dont la récupération est essentielle pour garantir l'efficacité du procédé de stockage. Plusieurs méthodes sont alors possibles :

---

<sup>4</sup> *Turbomachinery for a Supercritical CO2 Electro-Thermal Energy Storage System*, R. Fuller, J. Hemrle, & L. Kaufmann, 2013

<sup>5</sup> *Azobenzene-Functionalized Carbon Nanotubes As High-Energy Density Solar Thermal Fuels*, Alexie M. Kolpak et Jeffrey C. Grossman, 2011

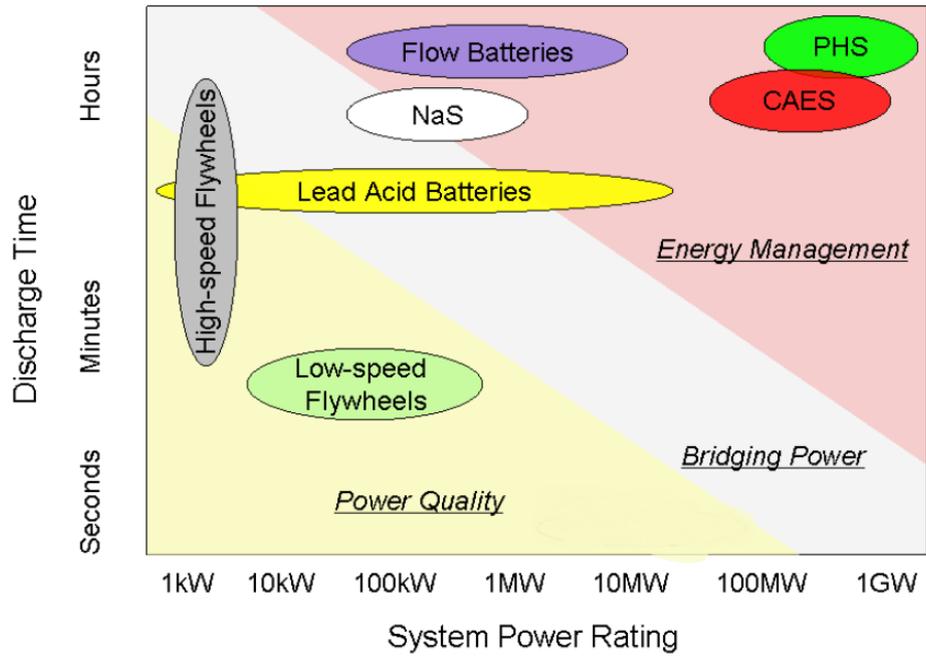
- Une compression diabatique où l'air comprimé est refroidi par une dissipation de la chaleur dans l'atmosphère, ce qui résulte en important gâchis énergétique et limite l'efficacité à moins de 30 % dans la plupart des modèles (les plus efficaces pouvant néanmoins atteindre 54 %) puisque l'air doit être réchauffé dans la phase de détente.
- Une compression adiabatique où la chaleur est récupérée pendant la phase de compression et conservée avant d'être utilisée dans la phase de détente, l'efficacité théorique du procédé de stockage atteint alors 100 % dans le cas d'une isolation thermique parfaite de la chaleur conservée, même si les experts estiment que, dans la pratique, un objectif de 70 % est plus raisonnable. Pour l'instant, aucune installation existante n'utilise une compression adiabatique mais le projet AA-CAES de l'Union Européenne en a démontré la faisabilité et plusieurs projets sont en cours dont notamment le projet ADELE en Allemagne pour la mise en œuvre de cette méthode.
- Une compression isotherme où l'air comprimé est maintenu à température constante tout au long de la compression et de la détente (en termes de thermodynamique, la compression-détente se fait le long de la courbe isotherme). Ce procédé serait le plus efficace mais aucune implémentation commerciale n'est opérationnelle pour le moment.

Au Japon, il n'y a pas encore d'installations majeures de CAES même si Chubu Electric Power est en train de rechercher un site adéquat. Ajoutons également que l'avance technologique du Japon dans le domaine des turbines à gaz, et notamment avec les *Advanced Humid Air Gaz Turbine*, couplée avec la volonté d'investir dans le stockage d'énergie et les avantages du CAES, pourrait permettre un développement rapide de cette technologie, même si, pour le moment, peu de publications académiques abordent le sujet (seulement trois sur les cinq dernières années).

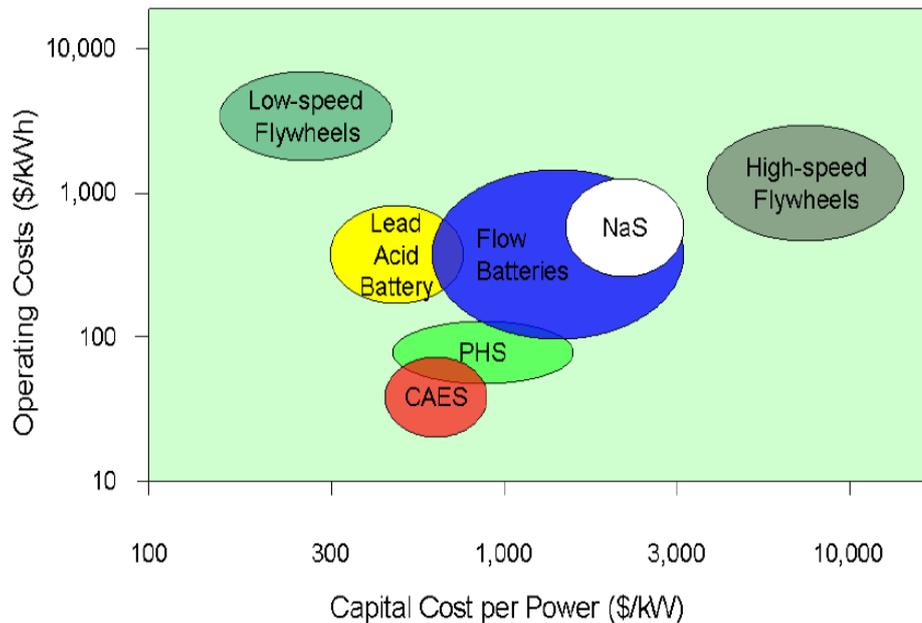
## Conclusion

Aujourd'hui, la question du stockage d'énergie revêt une importance stratégique pour tous les pays développés : à un moment où des sources d'énergie moins polluantes sont recherchées, des solutions de stockage performantes et peu coûteuses pourraient faire du solaire et de l'éolien de véritables alternatives aux hydrocarbures, en surmontant l'écueil que représentent leurs fluctuations journalières et saisonnières et en permettant la construction de réseaux électriques plus efficaces face aux variations de la demande. Le Japon est encore plus concerné par ces problématiques depuis l'arrêt de la majeure partie des centrales nucléaires du pays après l'accident de Fukushima en 2011 et ce d'autant plus que le pays a acquis une avance considérable en la matière avec l'introduction des batteries Lithium-Ion dans les années 90. Cependant, cette avance s'est peu à peu dissipée face aux concurrents américain, chinois voire sud-coréen et le gouvernement japonais affiche aujourd'hui son ambition de retrouver une position de leader sur les marchés du stockage d'énergie, par une politique d'investissements soutenue et organisée autour de grands instituts de recherche.

Pourtant, si une baisse générale des coûts paraît évidente, il semble peu probable, étant donné l'état actuel des connaissances scientifiques, de voir l'émergence à court terme d'une solution de stockage universelle. Comme le montrent les graphiques ci-dessous, les différentes technologies existantes présentent des profils de coûts et de capacités très différents et adaptés à des usages tout aussi différents, allant de l'amélioration de la qualité du courant électrique au stockage d'énergie de longue durée.



*Puissance délivrée et temps de décharge (Source : Compressed Air Energy Storage par Haisheng Chen, Xinjing Zhang, Jinchao Liu et Chungqing Tan)*



*Coûts de fabrication et de fonctionnement (Source : Compressed Air Energy Storage par Haisheng Chen, Xinjing Zhang, Jinchao Liu et Chungqing Tan)*

Au Japon, l'enjeu du stockage d'énergie est d'autant plus essentiel que des percées dans ce domaine permettraient de dynamiser l'industrie automobile japonaise, secteur important de l'économie japonaise, en donnant à ses constructeurs un avantage de taille dans la course vers des véhicules électriques performants, tout en assurant une plus grande indépendance énergétique du pays, ce qui est important dans le contexte économique et géopolitique actuel.