

LE STOCKAGE DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE MOYENS ET APPLICATIONS

Synthèse de la Journée d'Études SEE Clubs 13 et 11, du 1^{er} février 1996 au CNAM Paris

Bernard MULTON^① et *Jean-Marie PETER*^②

^①*École Normale Supérieure de Cachan Antenne de Bretagne* — *LÉSIR*, ^②*Président du club 13 de la SEE*

Introduction

Cet article donne une synthèse critique de la journée d'étude SEE du 1^{er} février 1996 dont l'objectif était de faire le point sur un problème fondamental du génie électrique : le stockage de l'énergie électrique. L'énergie électrique représente actuellement 12% de la totalité de l'énergie traitée par les hommes sur la terre. Cette proportion va encore croître considérablement au cours des prochaines années (34% prévus en 2025) dans un contexte de diminution des ressources combustibles fossiles, d'une plus grande utilisation des énergies renouvelables et d'un plus grand respect de l'environnement. Le stockage de l'énergie électrique devient plus que jamais une nécessité, or l'électricité se stocke difficilement. Depuis l'invention de la bouteille de Leyde en 1745, de la pile de Volta en 1799 puis de l'accumulateur de Planté en 1859, on est tenté de croire qu'il y a eu peu de progrès. Cependant, si l'on est attentif aux récentes réalisations, on peut observer une

amélioration sensible des performances des dispositifs de stockage de l'électricité. Et si aucun miracle n'est attendu, l'évolution est suffisamment prometteuse pour envisager de nouvelles applications. Les principaux moteurs de ce développement sont la forte croissance des applications portables (téléphones, micro-ordinateurs...), la demande en moyens de transport non polluants et, enfin, les besoins des réseaux de distribution d'énergie.

Ainsi, nous avons abordé, à travers huit exposés, les principaux moyens de stockage (électrochimique, électromagnétique, inertiel, capacitif) associés à leurs principales applications. La journée s'est terminée par un exposé de "synthèse à chaud" de Jean-François Fauvarque, Professeur titulaire de la chaire d'électrochimie du CNAM, puis autour d'une table ronde dont le thème de départ était les supercondensateurs.

Conférences :

[1] *André MARQUET (EDF-DER) : "Problèmes généraux du stockage de l'énergie électrique".*

[2] *Séverine LAURENT (EDF-DER) : "Intérêt économique des batteries dans les postes sources".*

[3] *Pierre-Guy THEROND (EDF-DER), Yves LAUMOND (GEC-Alsthom) : "Stockage électromagnétique"*

[4] *Michel BROUSSELY (SAFT) : "Stockage électrochimique pour le véhicule électrique".*

[5] *Jean-Paul YONNET (LEG, INP Grenoble) : "Le stockage par volant d'inertie".*

[6] *Michel BRAMOULLÉ (LCC) : "Évolution des technologies du stockage capacitif".*

[7] *Luc WUIDART (SGS-Thomson) : "Comment charger des batteries Li-Ion, NiCd ou NiMH en une heure". Exposé présenté par Jean-Marie PETER.*

[8] *Jean-François FAUVARQUE, au cours de la table ronde : "Les supercapacités".*

Bilan des exposés et des discussions avec les participants

L'électricité se stocke mal ce qui a pour conséquence des dispositifs encombrants et coûteux. Les moyens sont connus depuis longtemps : la batterie au plomb date de 1859, celle au cadmium-nickel de 1892. On peut ainsi s'étonner de voir encore des études sur ces sujets. La complexité des phénomènes ainsi que la durée de validation justifient ces longs délais de gestation. Un accroissement des performances rendra possibles la traction électrique automobile et l'adaptation de la production à la consommation qui semblait, naguère, impossible. Il existe de bonnes chances pour que l'on utilise un stockage "impulsionnel" afin d'assurer un certain découplage entre la demande et la production. Ce stockage requiert des systèmes d'accumulation mécaniques,

électrostatiques, magnétiques ou électrochimiques associés à des convertisseurs électroniques de puissance. Tout cela est aujourd'hui techniquement possible, il ne reste qu'à ce que les promesses de baisse des coûts se réalisent.

MOYENS DE STOCKAGE

Condensateurs [1, 6] :

L'énergie $W = \frac{1}{2} C \cdot V^2$ est limitée par le claquage diélectrique de l'isolant, elle sera d'autant plus grande que son champ disruptif E_d et sa permittivité sont élevés : $\frac{W}{\text{Volume}} = \frac{1}{2} \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot E_d^2$. Dans [6], seules les technologies film sont analysées en détail. La technologie électrolytique est limitée en tension

(600 V), en énergie unitaire (600 J) ainsi qu'en puissance de décharge (10 mA/ μ F à 40°C), l'énergie volumique maximale vaut environ 600 J/litre. Notons qu'elle constitue dans un certain nombre de cas une alternative à ne pas négliger. Les condensateurs céramiques de type II (baryum ou strontium) sont intéressants pour le stockage de faibles quantités d'énergie avec une densité de 600 J/litre environ. En ce qui concerne la technologie film, on atteint aujourd'hui, avec le polypropylène aluminisé environ 1000 J/litre (0,3 W.h/litre). L'utilisation de PVDF (polyvinyle bifluoré $\epsilon_r = 10,5$ et $E_d = 250$ V/ μ m) permet d'atteindre 1 W.h/litre (0,4 W.h/kg) mais son coût n'est pas acceptable. L'énergie volumique des condensateurs film est passée de 50 J/litre en 1965 à 650 voire 1000 J/litre en 1995. Les technologies au papier sont progressivement remplacées par la technologie film polypropylène métallisé. La sécurité en cas de claquage est assurée par une nouvelle conception multicellulaire de la métallisation dans laquelle chaque cellule est séparée de ses voisines par des zones fusibles (pour un condensateur 5600 μ F-1100 V, 2550 m² de film et 650 000 fusibles). On envisage, pour les années à venir, de nouveaux types de diélectriques (E_d multiplié par 3 et $\epsilon_r > 10$) ainsi qu'une réduction d'épaisseur des dépôts qui pourraient offrir des énergies volumiques de 5000 J/litre à condition que soient résolus les problèmes de champ électrique aux interfaces avec l'extérieur.

Supercapacités [1, 8] :

Le principe est voisin de celui du condensateur mais le film diélectrique est remplacé par un électrolyte conducteur ionique dans le quel le déplacement des ions s'effectue le long d'une électrode conductrice à très grande surface spécifique (grains de carbone percolants ou polymères conducteurs micro-fibreux : 1200 m² par gramme). On obtient ainsi de meilleures énergies volumiques que dans les condensateurs (5 W.h/kg voire 15 W.h/kg mais à un coût prohibitif) mais avec une constante de temps de décharge plus élevée à cause de la lenteur de déplacement des ions dans l'électrolyte (800 à 2000 W/kg). La tension par élément est limitée à 2,5 ou 3 V (modules jusqu'à 1500 F) et nécessite généralement une mise en série contrairement au condensateur. On peut craindre un risque de déséquilibre lors de cette mise en série : pratiquement il n'y a pas de problème, l'équilibre se fait bien car il y a peu de dispersions de caractéristiques. A la différence des dispositifs électrochimiques, il n'y a pas de réaction chimique ce qui accroît considérablement la cyclabilité.

Accumulateurs électrochimiques [1, 2, 4, 7] :

Ils sont constitués d'un couple électrochimique composé de deux électrodes séparées par un électrolyte et aux interfaces desquelles interviennent des réactions d'oxydation ou de réduction qui cèdent ou absorbent des électrons. Les ions ainsi générés circulent dans l'électrolyte. Pour avoir une grande énergie stockée, il

faut un grand nombre d'électrons échangés par mole ainsi qu'une réaction entre un élément très oxydant et un autre très réducteur (le couple Lithium-Fluor a une fem théorique de 6 V). Il faut en outre une parfaite réversibilité des processus électrochimiques et des matériaux à faible masse ou volume molaire. Mais la masse des matières actives (sans séparateurs ni électrolyte !) ne représente que 10 à 30% de la masse totale. Les réactions chimiques sont sensibles à la température, ainsi certains types d'accumulateurs sont inefficaces à basse température (< 0°C), d'autres requièrent des températures élevées (300°C). La puissance (rapidité à délivrer l'énergie) est limitée par le plus lent des nombreux processus de conduction. Pour accroître la puissance, il faut augmenter les surfaces d'électrodes, augmenter leur porosité... Pratiquement, il existe toujours un compromis énergie/puissance.

Les grandes familles d'accumulateurs sont celles :

- Au *plomb-acide*, bon marché mais lourds (30 W.h/kg et 80 W/kg, objectifs : 50 W.h/kg et 150 W/kg).

- Au *nickel à électrolyte alcalin* (NiCd, Ni-métal-hydrure NiMH, Ni-Fe) moins lourds (pour le NiCd : 50 W.h/kg et 200 W/kg, objectif : 65 W.h/kg, 66 W.h/kg pour le NiMH) mais plus chers. Elles possèdent également un autre inconvénient, le fameux effet mémoire dont la conséquence est la suivante : si la batterie n'est pas totalement déchargée avant sa recharge, elle ne retrouve pas sa pleine capacité. Il est ainsi nécessaire de la décharger complètement avant la recharge. Actuellement, les batteries NiCd pour véhicule électrique nécessitent une surveillance du niveau d'électrolyte tous les 50/100 cycles. Les batteries portables NiCd et NiMH se rechargent de la même façon : le courant est régulé, la charge est arrêtée dès que l'on observe un point d'inflexion sur la courbe de croissance de la tension. Une sécurité de température à 50°C permet d'assurer la survie de la batterie en cas de surchauffe.

- Au *métal* (zinc ou fer ou magnésium)/*air*.

- Au *sodium à électrolyte d'alumine β* (soufre ou chlorure de nickel) fonctionnant à haute température (environ 300°C).

- Au *lithium à électrolyte sel fondu* à 450°C.

- Au *lithium-carbone (électrode positive insérée dans un oxyde métallique à électrolyte organique* liquide ou solide en fil mince polymère). Le lithium est très léger et très énergétique (environ 10 kW.h/kg de masse active) mais il est très réactif et il a fallu d'intenses recherches pour arriver à un nombre de cycles satisfaisant (environ 1000). Les accumulateurs au lithium sont produits au Japon pour les applications électroniques portables. Leur recharge nécessite une surveillance très précise (1%) de la tension, en début de charge l'alimentation s'effectue en courant puis lorsque la tension maximale est atteinte, la tension est régulée.

La durée minimale de décharge des accumulateurs électrochimiques descend difficilement en dessous du quart d'heure. Mais on n'arrive, pour

certaines applications, à quelques 100 W/kg voire quelques kW/kg en quelques secondes ou quelques minutes.

Volants d'inertie [1, 5] :

On stocke l'énergie cinétique dans un volant d'inertie : $W = \frac{1}{2} J \cdot \Omega^2$, il faut alors des matériaux à haute résistance à la traction σ_{\max} (due à la force centrifuge) capables de vitesses périphériques élevées. Les meilleurs sont les composites à fibres de carbone (structures bobinées) capables d'atteindre 1500 m/s correspondant à 100 voire 150 W.h/kg. L'énergie

massique vaut : $\frac{W}{M} = K \cdot \frac{\sigma_{\max}}{\rho}$ où ρ est la masse

volumique du matériau et K est un facteur dépendant de la forme du volant (K=0,5 pour un cylindre à paroi mince). Seulement, il faut adjoindre au volant des auxiliaires (paliers magnétiques, enceinte sous vide, moteur/générateur...) qui conduisent à des valeurs plus proches de 25 W.h/kg. Le moteur/générateur est l'interface électromécanique permettant la charge et la décharge. La puissance impulsioneuse de ces dispositifs peut être élevée : 2 kW/kg mais leur coût est encore prohibitif. Les paliers magnétiques utilisables pour les volants d'inertie n'ont pas à supporter des charges importantes aussi peuvent-ils se réduire à leur plus simple configuration à un seul axe actif. Un exemple de volant pour véhicule électrique hybride est présenté [5], il permet de stocker 0,8 kW.h à 35000 tr/mn avec un rotor en fibres de carbone (diamètre 40 cm) pour une masse totale de 30 kg.

L'utilisation du stockage d'énergie cinétique peut poser des problèmes de sécurité. En pratique, si le volant éclate, l'essentiel de l'énergie libérée est absorbé dans la dislocation de la structure lorsqu'elle est en fibres. Quant à l'effet gyroscopique, ses effets peuvent être minimisés grâce à un assemblage de plusieurs volants tournant en sens inverses.

Inductances [1, 2, 3] :

L'énergie magnétique $W = \frac{1}{2} L \cdot I^2$ est avantageusement stockée dans l'air. L'énergie volumique est proportionnelle au carré de l'induction $\frac{W}{V} = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu}$, en outre les pertes Joule ne permettent pas

de la conserver au delà de quelques fractions de seconde. Aussi a-t-on recours à des bobinages supraconducteurs. Les deux types de bobinages envisagés sont le solénoïde et le tore (tous deux à air). Le premier permet un meilleur stockage à volume donné de matériau supraconducteur mais il rayonne beaucoup et engendre une pollution inadmissible dont la compensation est coûteuse et encombrante. Le tore se révèle, malgré un volume plus important, la solution la plus souvent retenue.

Avec les supraconducteurs basse température à base de niobium (Nb), on obtient environ 4 W.h/litre (à 6 T). Les caractéristiques du NbTi (largement industrialisé) sont : 3000 A/mm² sous 5 T à 4,2 K (max 10 T). Celles du Nb₃Sn sont : 1200 A/mm² à 10 T, 300 A/mm² à 16 T (max. 24 T).

Avec les nouveaux supraconducteurs céramiques dits "haute température critique", on peut espérer des améliorations. Le meilleur compromis (pour les applications de stockage) densité de courant, induction, température critiques semblerait se situer à environ 15 T et 30 K. A cette température, le gain sur le système de réfrigération est très substantiel. Mais ces matériaux n'ont pas encore atteint la maturité industrielle des alliages au niobium et il faudra attendre encore 5 à 10 ans pour dépasser leurs performances. Notons que même avec 30 T, on n'atteint pas les valeurs d'énergie volumique des accumulateurs au plomb. L'avantage des inductances supraconductrices réside dans leur très grande puissance (possibilité de décharge à 50% en moins de 1 s avec des brins multifilamentaires de très faible diamètre : quelques μ m voire submicroniques). La principale difficulté est liée au système de réfrigération qui, même s'il ne pose plus aujourd'hui de problème, accroît considérablement le coût et complique l'exploitation. De tels dispositifs sont commercialisés aux USA (jusqu'à 3 MJ-1 MVA).

Stockage hydraulique [1] :

Ce principe est utilisé pour les grandes énergies (quelques 10 GW.h, et 100 MW), il "suffit" de construire un réservoir à une hauteur h par rapport au système de pompage/"turbine" : $W = m \cdot g \cdot h$. Son coût est très faible (quelques F/kW.h). Malheureusement, on ne peut pas implanter ces dispositifs au voisinage des centres de consommation et ils sont difficilement transportables !

MISSIONS TECHNIQUES DU STOCKAGE ÉTUDIÉES AU COURS DE LA JOURNÉE

Le secours [1] :

On recherche, dans ce cas, de longues durées de vie ainsi qu'une faible autodécharge (ex. à EDF, plus de 5000 batteries, dont l'énergie stockée peut aller jusqu'à 400 kW.h, sont installées). Dans les alimentations ininterrompues qui n'interviennent que ponctuellement, on peut souhaiter une puissance importante sans une énergie stockée élevée. Pour l'instant, le secours est le domaine réservé des accumulateurs électrochimiques de type plomb-acide ou cadmium-nickel. Cependant, des recherches ont été effectuées avec des générateurs aluminium-air (secours longue durée, grande compacité) ainsi qu'avec des volants d'inertie (courte durée : quelques minutes, grande puissance).

La régulation de charge stationnaire (adaptation de la consommation à la production) [1, 2, 3] :

Il s'agit de stocker l'énergie fournie par la production pendant les creux de consommation pour la restituer pendant les pointes (nivellement de charge). Avec un stockage idéal (quantité d'énergie et sa répartition), les dispositifs de production n'auraient à être dimensionnés que par rapport à la puissance moyenne consommée. Pour le réglage de la fréquence, il est actuellement nécessaire de prévoir une marge de puissance suffisante (2,5% dans un réseau de très forte puissance comme le nôtre et allant jusqu'à 30% sur des réseaux isolés de faible puissance). Notons que si l'utilisation des énergies renouvelables (éoliennes, photovoltaïques) se développe, la production deviendra plus irrégulière, nécessitant par là même un accroissement de ce besoin de régulation. Les systèmes de stockage doivent alors être capables d'emmagasiner des énergies importantes et de les délivrer pendant des durées de l'ordre d'une à deux heures, l'électronique de puissance est, ici encore, l'interface la mieux adaptée avec le réseau. Une maintenance minimale est un critère très important. Cependant, on envisage, à court terme, l'utilisation des filières électrochimiques (batteries tubulaires au plomb ou batteries chaudes au sodium aux USA). De tels dispositifs commencent à devenir rentables pour les usagers industriels en France compte tenu de la tarification actuelle. Au Japon, de tels développements, fondés sur la filière lithium-carbone, sont envisagés au niveau de l'habitat individuel. Précisons que sont aussi étudiées des stations mobiles que l'on pourrait déplacer, selon les besoins, en différents points du réseau.

Qualité de tension [1, 2] :

Il s'agit ici de corriger les imperfections de la tension distribuée comme les distorsions (échelle de la période : ≈ 100 ms), les creux de tension et les micro-coupures (≈ 1 s à qq. 10 s). Actuellement le filtrage actif, qui utilise comme moyen de stockage des condensateurs (très grand nombre de cycles et rapidité), se développe fortement (jusqu'à 20 MVA au Japon). Il a également recours aux interrupteurs électroniques de puissance (IGBT et GTO). Pour la stabilisation transitoire des réseaux, le lissage des creux de tension ainsi que pour le lissage des charges fluctuantes (par exemple, les futurs aimants de fusion consommeraient des puissances de 600 MW à 200 MW/s), il est nécessaire de disposer de moyens de stockage capables de répondre très rapidement à la demande, on envisage alors la filière électromagnétique supraconductrice. Le projet Anchorage (en Alaska) prévoit un stockage inductif de 50 MW.h/50 MW et 50 MVAR en continu. Hydroquébec a fait une étude de faisabilité pour un stockage de 300 MJ-300 MVA réalisé avec un système modulaire à 9 tores supraconducteurs de 33,3 MJ chacuns.

Applications électriques portables [1, 7] :

Ce marché connaît depuis peu une croissance exceptionnelle (+ 30%/an actuellement). On recherche

des qualités de compacité, faible masse, énergie et puissance variables selon que les applications sont domestiques ou professionnelles. C'est encore la filière électrochimique qui a été retenue pour ses qualités d'énergie et de puissance massiques : d'abord le CdNi, puis le NiMH et maintenant, venu du Japon, le lithium qui suscite maintenant un engouement mondial. Aux USA, en remplacement des piles alcalines, on utilise les accumulateurs alcalins Zn/MnO₂ (zinc-dioxyde de manganèse) peu coûteux, à très forte énergie massique mais faiblement cyclables (quelques dizaines de cycles).

Traction électrique automobile [1, 4, 5, 8] :

On parle souvent de véhicule électrique au singulier, il existe en réalité plusieurs types de missions très différents correspondant à des besoins divers. L'une des plus sévères est celle du véhicule urbain pour lequel on recherche une autonomie élevée (200 à 300 km au lieu des 70 à 100 km actuels), donc une énergie et une puissance massiques importantes (l'*United State Advanced Battery Consortium* demande à long terme 200 W.h/kg et 400 W/kg), une cyclabilité assez élevée (> 600), une plage de température étendue (-40 à $+85^{\circ}\text{C}$) et un coût faible... Seules, les batteries électrochimiques sont capables de relever le défi mais leurs performances en décharge rapide sont insuffisantes (rendement et vieillissement), aussi envisage-t-on de les associer à des dispositifs complémentaires comme les volants d'inertie ou les supercapacités. Il faut cependant trouver des solutions électroniques d'association acceptables sur le plan du coût ; en effet la tension batterie varie peu avec l'état de charge contrairement aux autres dispositifs auxquels on souhaite l'associer. Actuellement, seules les filières plomb et Ni-Cd ont une maturité industrielle suffisante et continuent à subir des améliorations mais elles n'offrent pas le niveau de performances attendues. De gros programmes de recherche ont été initiés (notamment US-ABC : advanced battery consortium, LIBES au Japon et PREDIT en France). Au Japon, les investissements se focalisent sur les batteries lithium. La filière sodium (NaNiCl₂) reste envisagée (Allemagne et USA) malgré la nécessité de fonctionner à 300°C et la perte d'énergie correspondante. On peut estimer la quantité d'énergie à stocker en fonction de la masse et de l'autonomie requises en considérant une consommation d'environ 135 W.h/tonne/km et une puissance de 40 kW/tonne. Ainsi plusieurs analyses sont effectuées dans [4] pour montrer les effets du choix de la technologie de batteries et de leur masse embarquée sur l'autonomie, la durée de vie et le coût au km pour un véhicule de 800 kg (hors batteries). Le NiCd et le NiMH offrent la plus longue durée de vie (≈ 6 ans), le lithium-carbone conduit à la plus grande autonomie (≈ 200 km) et au meilleur coût kilométrique. Une autonomie de 300 km est envisageable à moyen terme, dans ces conditions, le véhicule électrique urbain deviendrait vraiment compétitif.

Conclusion générale

Les progrès de l'électrotechnique et de l'électronique ont complètement transformé le paysage industriel en moins d'un siècle. Seul dans ce domaine, le stockage de l'énergie électrique, qui a peu évolué, fait figure de parent pauvre. Cette journée nous a permis de faire le point et de voir les principales évolutions à venir.

Le principe ayant la plus grande capacité de stockage d'énergie électrique est, et restera, l'accumulateur électrochimique. Il n'y a que de faibles améliorations à attendre des technologies classiques, le progrès réel viendra des technologies nouvelles. L'accumulateur au lithium, grand espoir du stockage de l'énergie devrait permettre un gain dans un rapport 3:1. Aujourd'hui, il démarre dans les applications de très petite puissance (équipements électroniques portables) et sa faisabilité industrielle à un coût compatible avec les applications électrotechniques reste à démontrer. Au passif de l'accumulateur électrochimique, il faut citer ses inconvénients, faible puissance massique, durée de vie fonction de l'utilisation, durée de charge longue et maintenance pas toujours négligeable.

Dans un domaine très différent, le condensateur a des propriétés très complémentaires de celles de l'accumulateur électrochimique. Stable, avec une durée de vie élevée, il ne demande pas de maintenance, et il est capable de fournir des puissances considérables (plusieurs GW/kg) pendant des durées très courtes. Par contre, il est handicapé par une très faible capacité de stockage en énergie (moins du centième de celle des accumulateurs électrochimiques). Là aussi, on prévoit des progrès (gain de 1 à 5) pour ces prochaines années. Le progrès le plus important viendra d'un nouvel élément, la "supercapacité" qui, après avoir pénétré le domaine des très faibles puissances, commence à arriver dans celui des fortes puissances. Intermédiaire entre les condensateurs et les batteries électrochimiques, ces éléments ouvrent des champs d'application intéressants par leur capacité de surcharge alliée à une capacité de stockage non négligeable.

On voit se développer, plus au stade des études qu'à celui des réalisations industrielles, d'autres systèmes qui font appel aux capacités de stockage électromécanique (inertiel) ou électromagnétique supraconducteur. Ces systèmes qui peuvent délivrer des puissances massiques très importantes nécessitent des "accessoires" qui conduisent à des coûts très élevés. Dans le cas du stockage électromagnétique, il faut prendre en compte la maintenance des dispositifs de réfrigération des supraconducteurs. Les applications de ces systèmes de stockage sont donc très restreintes et ne concernent que des activités très particulières qui permettent d'en accepter le coût.

Dans certains cas il est nécessaire de pouvoir stocker l'énergie longtemps avec un faible

encombrement et/ou une faible masse, dans d'autres cas, il faut pouvoir délivrer rapidement cette énergie, se pose alors le problème de la puissance maximale de décharge. Il apparaît un compromis puissance maximale/rendement (théoriquement [8], de façon générale : à la puissance maximale délivrable par le dispositif, le rendement de conversion est égal à 50%, cependant, des phénomènes thermiques ou autres peuvent limiter la puissance maximale à des valeurs inférieures correspondant à un rendement moins mauvais). Dès que les énergies volumiques deviennent élevées, les contraintes mécaniques posent des problèmes de résistances des matériaux [3]. Le nombre de cycles de charge/décharge est un critère important. Dans les batteries électrochimiques, le nombre maximal de cycles est assez faible (quelques centaines à quelques milliers) à causes des dégradations dues aux réactions chimiques. Dans les inductances supraconductrices et les volants d'inertie, ce nombre est limité par la résistance à la fatigue mécanique. Les futurs condensateurs film à très haute énergie vont connaître également ces limites. Précisons enfin que la maturité industrielle est loin d'être la même pour toutes les technologies envisagées. Seule une exploitation longue permet de juger de la cyclabilité, c'est en particulier le cas des batteries électrochimiques. Hormis ces dernières, les différents moyens de stockage délivrent une "grandeur source" (tension, courant, vitesse...) plus ou moins variable avec l'état de charge (Dans le cas d'une relation quadratique : à 75% de décharge, la grandeur source est à 50% de sa valeur maximale). Se pose alors le problème du surdimensionnement en puissance du convertisseur électronique, dans le cas de systèmes à tension variable ou à courant variable devant être capable de délivrer leur puissance maximale sur une plage étendue (dans le cas du stockage inertiel : le problème se pose soit pour la machine électromagnétique soit pour le convertisseur électronique).

L'évolution de l'électronique de puissance est un facteur clé des applications du stockage en forte puissance. En effet les montages à thyristors réversibles en puissance active, consomment toujours de la puissance réactive, même s'ils sont très simples, on leur préfère maintenant des convertisseurs à commutation forcée capables de fonctionner dans les quatre quadrants du plan P-Q. L'évolution des thyristors GTO et des IGBT ainsi que les nouvelles structures de convertisseurs permettent d'envisager leur utilisation dans les interfaces sources de stockage réseau moyenne, voire haute, tension. Dans les applications portables très basse tension, c'est la technologie MOS à très haute densité d'intégration qui permet d'atteindre les très bons rendements requis.

L'un des problèmes associé au stockage de l'énergie électrique est la charge rapide qui requiert

beaucoup de puissance électrique installée (électronique de puissance) et une capacité intrinsèque du dispositif de stockage à emmagasiner rapidement l'énergie avec un bon rendement (même problème qu'à la décharge).

Le tableau comparatif suivant permet de récapituler les principales caractéristiques de quelques unes des technologies analysées. Il a été établi à partir des informations de la journée SEE et de celles extraites des publications [REIN_SD96] et [ANZ_TI89].

performances 1995	accumulateurs électrochimiques				inertiel	inductif	condensa- teurs	Super- capacités
	Pb-acide	Ni-Cd	LiC	NaS				
W.h/kg	30	50	150	120	25 ⚡	4	⊗ 0,25	⊗ 5.5 ⚡
W/kg crête	80	200	200	150	≈ 2000	28 10 ⁶	⊙ qq 10 ⁴	500 à 2000
densité	2.4	2	2.6*	1.1	2	2.1	1.39	2
cyclabilité	500 à 80% de PdD*	1500	≈ 1000	≈ 100	très élevé ⊙	très élevé ⊙	très élevé ⊙	élevé
maturité industrielle	oui	oui	oui : petits accu non : gros	débuts	non	oui pour les supra BT	oui	oui : petits accu non : gros
temps minimal de décharge	15 mn	15 mn	45 mn	45 mn	1 mn	< 1 ms	<< 1 ms	10 s
durée de stockage	> 1 mois	≈ 1 mois	> 1 an	qq jours	qq mn	> 1 h	qq s	qq mn
coût de l'énergie ou de la puissance	≈ 1000 F/kW.h	≈ qq 1000 F/kW.h	?	?	> 1000 F/kW	?	?	qq 100 F/kW

(*PdD : profondeur de décharge)

Comme l'indique le tableau ci-dessus, ce sont encore les batteries électrochimiques qui permettent de stocker la plus grande énergie volumique ou massique ce qui explique leur succès. Cependant leur longévité et leur rapidité de décharge sont insuffisantes dans certaines applications. Puisqu'aucun système de stockage ne possède les deux qualités de pouvoir stocker beaucoup d'énergie et de pouvoir la délivrer rapidement (puissance), on a intérêt, dans certains cas, à combiner deux dispositifs ayant des qualités complémentaires, par exemple, une batterie électrochimique et une supercapacité. Le stockage inertiel est très prometteur en termes de compromis puissance/énergie.

En résumé, nous voyons deux tendances se dégager ces prochaines années pour des progrès limités : de nouvelles technologies d'accumulateurs électrochimiques (en particulier, lithium) pour le

stockage de quantités importantes d'énergie et, pour leur bon compromis énergie/puissance massiques : les supercapacités et les volants d'inertie. En rêvant, la révolution viendra plus tard de la pile à combustible, grande absente de cette journée. Elle permettra peut-être, non pas demain, mais après demain d'obtenir pour l'énergie électrique, des capacités de stockage voisines de celles des hydrocarbures associées aux moteurs thermiques, cent fois plus élevées que celles des accumulateurs actuels et encore trente fois plus élevées que celle des nouveaux accumulateurs qui seront opérationnels, à grande échelle, dans quelques années. En tout cas il est important de rappeler que, selon les applications, les exigences fonctionnelles sont différentes et que dans l'état actuel des connaissances, toutes les solutions de stockage évoquées peuvent trouver leur place.

Bibliographie complémentaire

[REIN_SD96] G. REINER, "Energy and non conventional weapons", Conf. Sciences et défense 96, janvier 1996, pp.369-382.

[ANZ_TI89] J.P. ANZANO, P. JAUD, D. MADET, "Stockage de l'électricité dans le système de production électrique", Techniques de l'ingénieur, traité de Génie Électrique, D4030, 09/1989.