

# La lettre des Groupes Professionnels

## ENERGIES et PILES à COMBUSTIBLE



### ACTUALITES

L' énergie électrique représent actuellement 12% de la totalité de l' énergie utilisé 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 cette dernière 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 peut croire que peu de progrès ont été réalisés.

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.

La pile à combustible et les supercondensateurs sont deux axes de recherche et de développement.

### EDITO

Nous entamons un cycle de conférence sur un thème très sensible « Le Stockage de l' énergie » en cette période de libéralisation du marché de l' énergie et de forte fluctuation des cours sur les marchés boursiers.

Sont intervenus pour cette première partie, le 1<sup>er</sup> décembre 2003 à l' hôtel d' Iéna :

- ♣ Michel MEUNIER, SUPELEC « la problématique du stockage de l' énergie et de la production délocalisée »
- ♣ Pierre SERRE COMBE, CEA Grenoble « la Pile à Combustible et l' Hydrogène »
- ♣ Gianni SARTORELLI, MAXWELL TECHNOLOGIES « les Supercondensateurs »

dont les comptes rendus figurent dans les pages qui suivent. Cette première partie fut organisée par les Groupes Professionnels Energie, et Pile à Combustible des Arts & Métiers, auxquels nous devons associer les Groupes Professionnels d' Intermines, d' ETP, et de Sup' Elec.

Réservez dès à présent votre soirée du 15 mars 2004, pour la deuxième partie qui portera sur du stockage qui peut sembler plus conventionnel, mais pour lequel les ressources technologiques sont loin d' être épuisées.

Jean-Pierre FRÉGÈRE  
Président GP Energie Arts & Métiers

# Le stockage de l'énergie 1

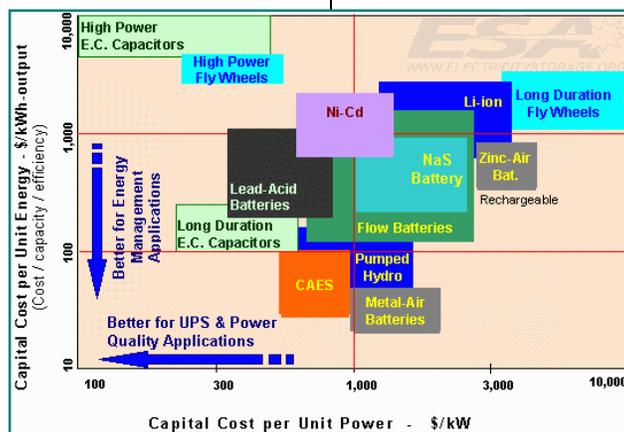
## La problématique du stockage et de la production délocalisée de l'énergie

L'électricité est un vecteur énergétique très pratique mais présente l'inconvénient d'être difficile à stocker. Or ce besoin de stockage croît avec le marché de l'autonomie très étendu et celui du réseau de distribution. Jusqu'à aujourd'hui, la distribution de l'électricité suivait une logique de service public. Cependant, avec la construction de l'Europe, l'énergie électrique est considérée comme un produit manufacturé qui peut circuler librement dans la communauté. Ainsi chacun a le droit de produire de l'énergie électrique acheminée jusqu'au client à travers un système de transport qui fonctionne comme un service public. Ce nouveau système n'est pas optimisé dans son ensemble et chaque acteur fonctionne de façon complètement indépendante en essayant de maximiser son profit. Le côté atypique de ce marché est marqué par la lenteur des retours sur investissement et la durée de vie longue des ouvrages. De plus, personne ne peut y intervenir en ignorant les collectivités locales. Cependant ce marché est ouvert et l'ambition serait d'acheter aux heures creuses et vendre aux heures pleines... Il faudrait ainsi stocker. Le stockage sur le réseau public pourrait être intéressant à deux niveaux : sur le **réseau local** pour optimiser son dimensionnement et pour le **grand transport européen** qui pourrait être ainsi décongestionné.

### Les procédés de stockage

- L'énergie potentielle : les barrages dont l'investissement est important.
- L'énergie thermique : emmagasinement de chaleur au moyen d'une enceinte calorifugée ou sous forme géologique. La récupération d'énergie permet un rendement de stockage de 90%.
- Les fluides comprimés : la vapeur d'eau est stockée dans une couche profonde fissurée.
- L'énergie magnétique : ce principe nécessite des bobines toroïdales d'un volume considérable.
- Les batteries et piles : les meilleurs éléments sont le lithium et le fluor. Le dimensionnement est fait en fonction de la puissance et de l'énergie. Pour la puissance, la surface des électrodes importe. L'énergie stockée est proportionnelle à la quantité de matière

contenue dans le système. Il existe ainsi une quantité de technologies (nickel-cadmium...) qui sont très performantes mais pour de petits systèmes. Les batteries au lithium sont utilisées dans les téléphones portables... Les batteries métal-air se rechargent mal car le métal est corrodé très rapidement mais leur énergie spécifique est intéressante. La zebra (sodium/ chlorure de nickel) à haute température (400 °C) est prometteuse.



- Le stockage mécanique : les volants d'inertie. La puissance disponible est importante mais la procédure de récupération de l'énergie n'est pas simple. Les pertes sont évitées en les plaçant dans

une enceinte à vide.

- Les piles à combustible
- Les supercondensateurs

## Les piles à combustible et l'hydrogène...

La pile à combustible, convertisseur d'énergie, pourrait être une solution par le stockage de l'hydrogène. Le paysage énergétique français est atypique car c'est essentiellement le transport qui apporte sa contribution aux gaz à effets de serre et 54% de la consommation nationale provient de l'énergie fossile. Mais le problème de l'énergie est fondamental dans nos économies avec le besoin de maintenir la sécurité d'approvisionnement, de disposer d'une indépendance industrielle et de respecter l'environnement. D'après le rapport Charpin, les besoins en électricité ont été multipliés par 12 en 40 ans alors que toute énergie confondue, les besoins ont été multipliés par 4. Les nouvelles normes dans l'automobile, vont nécessiter des générateurs électriques de plus en plus puissants (4 à 5 kW et bientôt 10 kW). Selon des experts européens, et malgré les peurs, l'hydrogène est une solution. Ce vecteur énergétique chimique peut être produit par différents moyens, est transportable, stockable et convertible en électricité. Ce peut être aussi une assistance pour les énergies intermittentes telles que l'éolien ou le solaire. La pile à combustible ne peut se développer sans la filière hydrogène et inversement.



Module PEMFC de 1 kW  
Pour véhicule sous-marin

# L'hydrogène

## Moyens de production

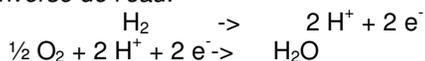
Ils sont plus ou moins polluants selon qu'on utilise le pétrole, la biomasse, l'électrolyse ou les centrales nucléaires. Le reformage est par exemple un moyen très utilisé mais la production de CO<sub>2</sub> le rend néfaste à l'environnement. Le bilan énergétique de l'électrolyse de NaCl (28 kg de H<sub>2</sub> par tonne de Cl<sub>2</sub>) ou de H<sub>2</sub>O montre qu'elle ne peut être satisfaite pour la production de grandes masses.

## Moyens de stockage

- Le stockage sous pression : le plus mature. Problème de compression du gaz ;
- Le stockage sous forme d'hydrure : alliage métal-hydrogène assimilable à un stockage solide car les molécules d'hydrogène vont s'insérer dans la poudre métallique.  
*Avantage* : très compact. *Inconvénient* : très lourd ;
- Les microbilles de verre : creuses de diamètre de 30 microns. Le verre a la propriété d'être totalement étanche jusqu'à 300 °C et totalement poreux au-delà. L'idée consiste à emprisonner l'hydrogène dans ces microbilles de verre. Chaque microbille représente un potentiel énergétique très faible. On obtient des performances très proches des réservoirs haute pression mais sans risque d'explosion.

## Fonctionnement de la pile

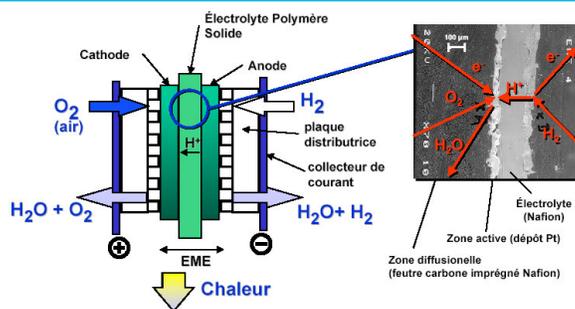
Elle est constituée d'une anode et d'une cathode mais les réactifs (hydrogène et oxygène) sont alimentés en continu. La réaction est l'électrolyse inverse de l'eau.



Point de fonctionnement : T=80 °C, i=600mA/cm<sup>2</sup>, V<sub>cell</sub>=0,6V  
ϕ=50%.

Les rendements de conversion sont de l'ordre de 50% mais les différents composants périphériques nécessaires (compresseur, système de contrôle, échangeurs de chaleur, système de reformage : désulfuration, reformeur, échangeur, purification des gaz) ont une consommation qui les baisse à 40%. Différents phénomènes font chuter le rendement :

- l'énergie d'activation : minimum d'énergie nécessaire avant de pouvoir produire un premier électron. Elle est liée à la structure, aux matériaux et au catalyseur utilisés. Elle fait chuter le rendement de 30%.
- la résistance interne : plus on produit de courant et plus la tension chute. Ceci est lié à la capacité des matériaux à conduire les électrons ou les protons.
- phénomène thermohydraulique : la quantité d'eau produite va limiter le fonctionnement car elle va empêcher la diffusion des gaz. C'est la limitation par la diffusion et le noyage.



Les progrès à faire sont d'ordre matériel, chimique et thermohydraulique. Cependant, même si l'utilisation des piles dans les voitures n'est pas prévue avant 2015, elles vont permettre de répondre à des besoins spécifiques tels que l'alimentation électrique pour les explorations des fonds sous-marins. Les limites à l'exploitation se posent en terme de coût (8.000 Euros/kW contre 1500 Euros/kW sur le marché), de robustesse et de durée de vie. Les autres problèmes sont liés à l'exploitation de l'hydrogène. Cependant, des évolutions pertinentes ont été faites : le besoin de platine a été divisé par 100 en 20 ans, les plaques bipolaires coûtent 100 fois moins chères qu'il y a 2

## Les super condensateurs

Beaucoup de domaines nécessitent une fiabilité en matière d'approvisionnement énergétique. Le supercondensateur est un composant qui permet d'emmagasiner de l'énergie électrique. L'introduction des supercondensateurs dans les applications de puissance est une réalité industrielle (Maxwell en produit 20 millions en 2003). Le stockage électrochimique conventionnel (forte densité d'énergie et faible puissance spécifique) et les condensateurs conventionnels (forte densité de puissance mais faible énergie emmagasinée) sont les deux domaines développés. Les supercondensateurs sont entre les deux et sont idéaux pour un besoin de stockage d'énergie à haute efficacité dans des temps brefs (1s à 10 s). Ils répondent donc aux applications avec un appel de puissance pendant un court instant.

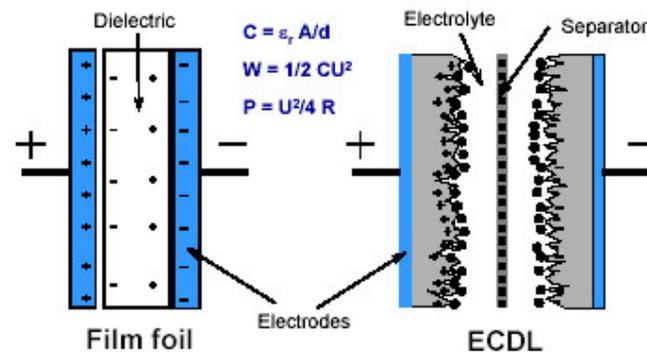


Caractéristiques du supercondensateur : Par rapport à un accumulateur, la durée de vie en terme de cycle est supérieure (1 million contre 1000 cycles). Le stockage de l'énergie se fait sous une forme électrostatique et non pas sous une forme électrochimique. Sa densité de puissance est considérable (10 fois supérieure à un accumulateur classique). Par contre son contenu énergétique est 10 fois plus petit. Les temps de charge sont très courts. Les rendements sont de l'ordre de 90%. Les supercondensateurs actuels qui vont jusqu'à quelques kilo

Farads, sont capables de travailler sur un domaine de températures qui va de  $-40$  à  $70^{\circ}\text{C}$  et jusqu'à  $2,8\text{ V}$ . Les tensions de cellule sont très basses mais la mise en série des supercondensateurs ne pose plus de problèmes.

Les applications et les marchés : Tout appareil d'énergie électrique a besoin d'une alimentation continue et d'absorber un pic de puissance rapidement. On peut donc séparer les moyens de stockage en ayant une source d'énergie primaire qui va servir d'alimentation continue (moteur à combustible...) et une source rapide sous forme de supercondensateur. Ainsi de nouveaux concepts d'applications et de produits sont en développement : dans l'automobile (véhicules hybrides) pour réduire la consommation et accéder au réseau  $42\text{ V}$ , dans les transports publics (projet SITRAS avec SIEMENS, MITRAC...) pour récupérer l'énergie au freinage des trains et métros ou pour développer des tramways sans caténaire, dans l'industrie, pour démarrer les groupes électrogènes, fournir les appels de puissance instantanée (sur les éoliennes, par exemple), remplacer les batteries des onduleurs et réduire les coûts de maintenance du parc de batteries, dans la grande consommation pour les appareils numériques, les jouets...

Le principe de base de la technologie du supercondensateur repose sur la théorie de la double couche d'Helmholtz qui décrit l'accumulation de charges électriques à l'interface entre un conducteur ionique (électrolyte) et un conducteur électronique de haute surface spécifique (électrode). Le condensateur ainsi créé se caractérise par une capacité de valeur très élevée, résultant d'une surface d'interface très élevée et d'une épaisseur d'extension de la double couche très faible ( $C = \Sigma S / e$ ).



Une couche de poudre de carbone est déposée sur un ruban d'aluminium. Un traitement permet d'obtenir l'activation du carbone et ainsi une surface équivalente de l'ordre de  $2000$  à  $3000\text{ m}^2$  par gramme de poudre de carbone utilisée sur les électrodes. On obtient une grande surface active à disposition pour stocker les charges. Les deux électrodes et le séparateur baignent dans un électrolyte à forte conductivité ionique. Le condensateur est symétrique et est aussi appelé condensateur électrochimique à double couche.

Les supercondensateurs rendent donc possibles les nouvelles technologies. Ils ont une durée de vie longue, une forte fiabilité, une gamme de température étendue, permettent de réaliser des systèmes de transport plus efficaces et propres. Ils coûtent aujourd'hui de  $0,01$  Euros/F et demain vers 2010, de  $0,005$  Euros/F.

## POUR EN SAVOIR PLUS

- L'Énergie pour le Monde de Demain - *Le Temps de l'action – Déclaration 2000 du Conseil Mondial de l'Énergie – Editions Technip*
- Fuel Cells: Reaching the era of Clean and Efficient Power Génération in the 21st century – Srinivasan, Mosdale, Stevens, Yang – Annual Reviews Energy Environment 1999
- CLEFS CEA N°44 « Nouvelles Technologies de L'Énergie »
- Les Perspectives offertes par la technologie de la Pile à Combustible – Galley, Gatignol – Office Parlementaire des Choix Scientifiques et Technologiques – Rapport n°3216
- L'état actuel et les perspectives techniques des énergies renouvelables – Birraux, Le Déaut - Office Parlementaire des Choix Scientifiques et Technologiques – Rapport n°3415
- [www.maxwell.com](http://www.maxwell.com)

## PROCHAINES DATES

15 mars 2004 : Deuxième volet de la conférence : les stockages sur les réseaux avec des accumulateurs de forte puissance ( $40\text{ MW}$ ) et les applications utilisant les volants d'inertie.

## LES SERVICES



L'AMJE est la Junior Entreprise ® de l'ENSAM. Elle réalise pour vous des missions dans des domaines aussi variés que la conception, le génie industriel, la fabrication ou le génie informatique.

<http://www.amje.net>

**Société des Anciens Elèves de l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers**  
**Groupe Professionnel ENERGIE**  
**Groupe Professionnel PILE A COMBUSTIBLE**  
 Tél : 01 40 69 27 41                      9, bis avenue d'Iéna  
 Fax : 01 47 20 58 48                      75783 Paris Cedex 16  
 e-mail : [mondam@arts-et-metiers.asso.fr](mailto:mondam@arts-et-metiers.asso.fr)



Édité par AMJE (Arts et Métiers Junior Etudes)