

Les accumulateurs électrochimiques : progrès et tendances

Guy Bronoel

Introduction

L'objectif de cette présentation n'est pas de donner une liste complète des caractéristiques de tous les accumulateurs électrochimiques commercialisés ou à l'étude, mais de souligner quelles sont les grandes tendances en discernant, notamment en ce qui concerne les systèmes encore non industrialisés, les espoirs des réalités. En effet, si pour le non-spécialiste le vocable d'accumulateur électrochimique évoque seulement les batteries Pb-PbO₂ et à la rigueur Ni-Cd, la réalité est tout autre, puisque l'on dénombre actuellement plus de vingt systèmes réalisés ou étudiés. Par ailleurs, il peut paraître surprenant que beaucoup de couples présentés comme très prometteurs il y a vingt ans ne soient toujours pas industrialisés et, cependant, fassent périodiquement l'objet de communications.

Nous limitant ici aux accumulateurs, il nous paraît néanmoins intéressant d'en élargir le strict domaine aux générateurs électrochimiques mécaniquement rechargeables compte tenu des espoirs que suscite ce type de générateurs. En revanche, les piles classiques et les piles à combustible traditionnelles ne seront évidemment pas traitées.

Les évolutions qui peuvent être décelées dans le domaine des générateurs électrochimiques découlent à la fois des découvertes effectuées par la recherche fondamentale et surtout des demandes des utilisateurs potentiels, demandes qui constituent un aiguillon puissant aux recherches.

Pour simplifier, on peut considérer que les demandes concernent trois grands secteurs d'applications et par conséquent trois types de produits :

- les petits accumulateurs portables dont l'énergie stockée est inférieure à 100 Wh,
- les générateurs de moyenne puissance (quelques kW ou dizaines de kW) pour des applications spéciales,
- les grands systèmes électrochimiques fixes d'accumulation de l'énergie.

Les petits accumulateurs portables "grand public"

Le développement durant la dernière décennie de l'électronique et de l'informatique a conduit à la conception d'un grand nombre

d'applications grand public, toutes caractérisées par l'autonomie énergétique (absence de fil) et la miniaturisation. Ces applications concernent des objets de première utilité et des gadgets. Ainsi, peut-on citer entre autres :

- les jouets et les modèles réduits,
- les outils électriques : perceuses, visseuses,
- le petit électroménager : aspirateur, mixer, ouvre-boîtes,
- les outils de télécommunication et audiovisuels : téléphone cellulaire, téléphone sans fil, magnétophones, balladeurs, postes de radio, postes de TV,
- les systèmes de bureautique : télécopie, PC,
- les caméras vidéo.

Dans beaucoup de cas coexistent encore les accumulateurs et les piles primaires. Ces dernières s'imposeront encore longtemps pour les objets où l'énergie totale demandée est très faible et lorsque la recharge apparaît contraignante. De plus, l'autodécharge des nouvelles générations de piles au lithium est beaucoup plus faible que celle des accumulateurs classiques. Néanmoins, la demande en petits accumulateurs s'est révélée extrêmement forte durant ces cinq dernières années. Ainsi, en 1988, le marché mondial des petits accumulateurs Ni-Cd était de l'ordre de 800.10⁶ unités alors qu'il n'était que de quelques millions d'unités en 1985. Face à cette demande globale, on observe le développement de deux produits industriels : les petites batteries étanches Pb-PbO₂ ou Ni-Cd.

Dans les deux cas, la réalisation de batteries scellées a été rendue possible par la maîtrise du phénomène de recombinaison de l'oxygène produit en fin de charge. En effet, si l'on confère aux électrodes négatives une capacité beaucoup plus grande qu'aux électrodes positives qui y sont associées, l'électrode positive sera totalement chargée avant l'électrode négative et on observera en fin de charge un dégagement d'oxygène sur les positives. Cet oxygène diffusera à travers le séparateur et pourra alors se combiner avec la matière active à l'état réduit de la négative (Pb ou Cd) pour redonner une forme oxydée. Pour que tout l'oxygène dégagé soit combiné et que l'on évite son accumulation, il convient que sa vitesse de recombinaison à la négative soit supérieure à sa vitesse de formation, ce qui implique un transfert rapide à travers le séparateur et une réaction de surface également rapide qui peut être favorisée par l'existence de centres catalytiques à la surface de la négative.

1. Pb-PbO₂

En principe, la solubilité plus grande de l'oxygène dans les

milieux acides que dans les milieux alcalins facilite la réalisation d'accumulateurs Pb-PbO₂ totalement étanches. Ainsi a-t-il été possible de réaliser des accumulateurs Pb-PbO₂ scellés de grande taille (200 Ah), alors que les batteries Ni-Cd scellées, jusqu'à présent, ont toujours été réalisées dans des formats correspondant à une capacité inférieure à 50 Ah. On notera, toutefois, que des études récentes ont permis la réalisation de Ni-Cd de 100 Ah.

Par ailleurs, outre son prix, la batterie Pb-PbO₂ offre l'avantage d'un taux d'autodécharge plus faible que celui du Ni-Cd. En revanche, il apparaît moins robuste que le Ni-Cd pour les régimes sévères de charge et décharge. Il en résulte actuellement une compétition vive entre batteries acides et alcalines, l'expansion du marché des accumulateurs de petite capacité intéressant principalement le Ni-Cd. Toutefois, des firmes telles que Sonnenschein [1] commercialisent de petites batteries Pb-PbO₂ pour l'outillage et les téléphones portables.

2. Ni-Cd

Les petits accumulateurs Ni-Cd (capacité < 6 Ah), communément appelés "piles rechargeables", s'imposent pour beaucoup des applications précitées. Cependant, les utilisateurs sont très soucieux d'obtenir des générateurs de moins en moins volumineux dans la mesure où les progrès de l'électronique ont permis de diminuer considérablement le volume de tous les composants. Dans certains cas (outils portables), on demande également un accroissement de l'énergie massique des accumulateurs, mais, d'une façon générale, la demande prioritaire concerne l'énergie volumique.

De ce point de vue, comme le soulignait récemment Leonardi [2], la capacité volumique des Ni-Cd de format R6 est passée en cinq ans de 550 mAh à 850 mAh. De tels progrès résultent de perfectionnements importants touchant, non seulement l'architecture des éléments, mais surtout la technologie de fabrication des électrodes de cadmium et de nickel : recours à des collecteurs-supports en mousse ou en feutre de nickel [3], amélioration de la composition des masses actives (ajout de Co dans les hydroxydes de nickel), réalisation d'électrodes "plastifiées" par

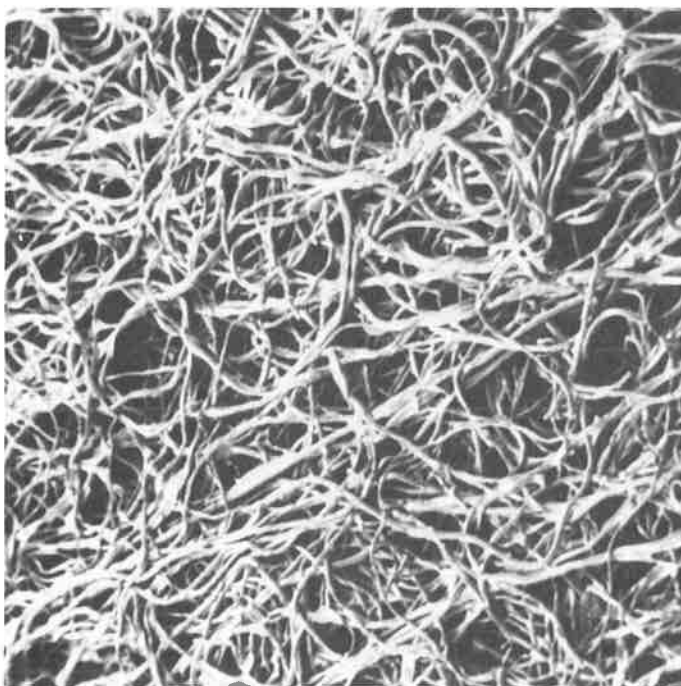


FIGURE 1. – Feutre de nickel "Metapore". Les fibres ont un diamètre de l'ordre de 25 µm (grossissement 40 X).

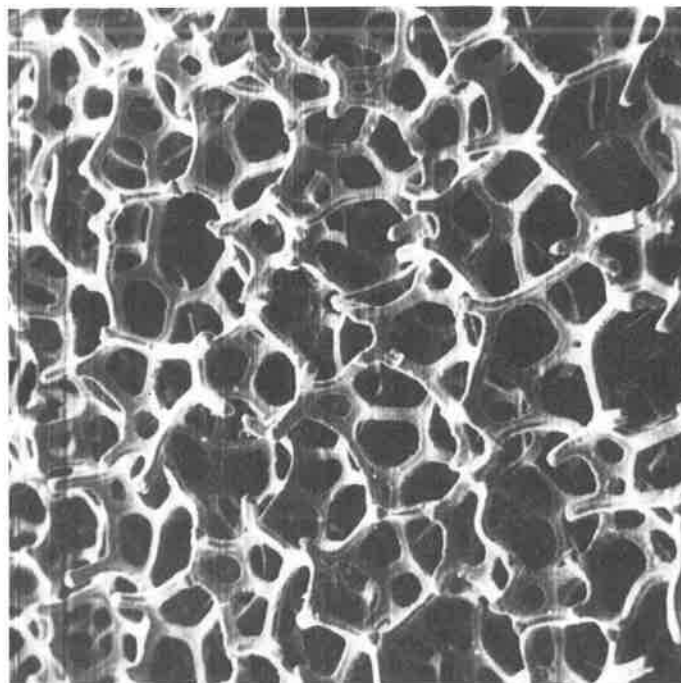


FIGURE 2. – Mousse "Metapore" en nickel. les alvéoles sont de l'ordre de 0,3 mm (grossissement 20 X).

induction mécanique des matières actives dans les supports collecteurs.

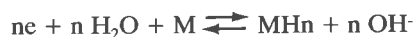
Toutefois, la multiplication et donc la dispersion des petits accumulateurs Ni-Cd ou Pb-PbO₂ peuvent conduire, à moyen terme, à une pollution importante par le cadmium et le plomb. Aussi étudie-t-on deux autres couples, Ni-Zn et Ni-hydrures, qui pourront vraisemblablement, à court terme, se substituer, pour un certain nombre d'applications, aux batteries Ni-Cd et Pb-PbO₂. Enfin, à plus long terme, on peut espérer que les recherches en cours visant à réaliser des éléments réversibles au lithium seront couronnées de succès.

3. Ni-Zn

Le couple Ni-Zn a pour avantage, par rapport au Ni-Cd, d'utiliser une négative à base de matériaux moins coûteux et d'avoir une tension d'utilisation 25 % plus élevée. En revanche, le plus grand handicap au développement du Ni-Zn réside dans sa longévité en cyclage très insuffisante. Toutefois, dès à présent, en utilisant des séparateurs appropriés, Yuasa [4] a réalisé et commercialisé à petite échelle des éléments étanches de 2,7 à 10 Ah qui supportent 200 cycles de charge-décharge. Parallèlement, des recherches sont poursuivies en vue d'améliorer la longévité en cyclage.

4. Ni-hydrures

Dans ce couple, l'électrode de cadmium est remplacée par une électrode à base d'hydrures métalliques qui peuvent être le siège de la réaction réversible :



Dès 1974 [5], il a été montré que les alliages comme LaNi₃ et, plus récemment, des composés du type TiNiZrV [6] pouvaient, compte tenu de leur teneur en hydrogène à la température ambiante et sous une pression inférieure à 5 bars, échanger une capacité de l'ordre de 300 à 400 mAh/g. Outre l'élimination du cadmium et son remplacement par des métaux non polluants, l'intérêt des hydrures tient à ce que les tensions de charge et décharge sont très proches de celles du cadmium et que, compte tenu de leur densité, on peut espérer obtenir des capacités volu-



FIGURE 3. – *Éléments Ni-Cd prismatiques de 40, 50 et 120 Ah, batterie 120 Ah-12 V et petits éléments cylindriques étanches de 0,8 Ah et 1,6 Ah.*

miques plus élevées qu'avec l'électrode de cadmium. Il en résulte la possibilité, à court terme, de disposer d'éléments de format R6 d'une capacité de l'ordre de 1,1 Ah. En comparaison du Ni-Cd, il reste, néanmoins, à améliorer les régimes de charge et de décharge et la longévité en cyclage des accumulateurs Ni-hydrures étanches.

5. Les accumulateurs à négative de lithium

On sait que les piles au lithium à cathode solide ou liquide ont trouvé maintenant de nombreuses applications [7] ; leurs principaux avantages sur les autres batteries primaires étant leurs caractéristiques volumiques élevées et leur très faible taux d'autodécharge. Depuis plus de 10 ans, plusieurs équipes de recherche tentent de mettre au point des éléments à négative de lithium rechargeables électriquement. Jusqu'alors, il semble difficile d'obtenir plus de 150 cycles de charge-décharge par suite essentiellement du comportement de l'électrode de lithium (morphologie des dépôts, réactivité avec le solvant). Ainsi Moli [8] a présenté en 1989 des éléments rechargeables à électrolyte liquide. Une voie présentée comme prometteuse consiste à remplacer l'électrolyte organique liquide par un électrolyte solide ou un gel associé à une électrode négative de lithium et une positive à base de V_6O_{13} [9]. Ce concept semble bien adapté à la réalisation de petits accumulateurs intégrables dans des circuits électroniques. En revanche, il convient d'être encore prudent quant à leur développement industriel pour toutes les applications grand public compte tenu, notamment, du coût du lithium et des contraintes de mise en œuvre (atmosphère sèche et non oxydante).

Accumulateurs de puissance moyenne pour applications spéciales

On entend ici par applications spéciales, soit des utilisations dans le domaine militaire, océanographique, spatial, soit encore des applications imposées par la mise au point d'un nouveau système tel que le véhicule électrique. Dans tous les cas, les puissances demandées sont de l'ordre de quelques kW ou dizaines de kW et les durées de décharge de quelques heures à quelques dizaines d'heures.

1. Le générateur Al-air

Concernant les applications militaires, il s'agit de remplacer les groupes électrogènes par des générateurs ne laissant pas de

signature thermique ou sonore. Les générateurs électrochimiques concernés sont, soit des piles à combustible, soit des générateurs à recharge mécanique en réactif tels que le système Zn-air ou Al-air.

Le générateur Al-air, qui présente des caractéristiques intéressantes en terme d'énergie massique (400 Wh/kg pour une autonomie de 100 h), a été par ailleurs mis au point en vue de son application aux véhicules électriques [10]. L'électrode à air, fonctionnant en milieu alcalin (électrolyte KOH 8 N ou NaOH 7 N), réalise continuellement la réduction de l'oxygène de l'air en ions OH^- . Il s'agit donc d'une électrode analogue à celle utilisée dans les piles à combustible alcalines H_2 -air. L'électrode d'aluminium, à la décharge, est oxydée sous la forme d'aluminates de potassium ou de sodium. Les aluminates peuvent, ensuite, être redécomposés dans un organe annexe pour redonner KOH ou NaOH et Al_2O_3, H_2O . L'aluminium n'étant pas régénérable électriquement à partir de la solution d'aluminates, le fonctionnement du système impose donc que l'on renouvelle périodiquement l'électrolyte ou que l'on élimine périodiquement Al_2O_3 et que l'on recharge le générateur en aluminium. Plusieurs modes de renouvellement des électrodes d'aluminium sont utilisables : plaques d'aluminium [11] ou billes remplissant une structure pochette [12]. Pour les applications océanographiques où l'on recherche des systèmes à grande autonomie pour l'équipement de sous-marins, le générateur Al- O_2 (ici l'oxygène est stocké sous pression) est en concurrence avec la pile à combustible H_2-O_2 et des moteurs du type stirling.

2. Accumulateur Ni- H_2

Concernant les applications spatiales, on sait que depuis 1964 les piles H_2-O_2 sont couramment utilisées sur les satellites et navettes US ; le projet de navette européenne prévoit également l'emploi d'une pile H_2-O_2 . Encore à l'état de projet, il est également prévu le couplage d'une pile H_2-O_2 avec un électrolyseur pour constituer un ensemble électriquement rechargeable dit pile réversible ou régénérable. Ces projets résultent de ce qu'il convient d'optimiser la gestion de l'énergie à bord des engins spatiaux, la production d'électricité étant assurée pendant de longues durées par des cellules photovoltaïques. Il convient donc d'emmagasiner l'énergie non utilisée pendant certaines périodes pour répondre aux besoins des pointes de puissance ou à la fourniture de l'énergie pendant les périodes d'éclipse. C'est dans cet esprit que, pour leur utilisation à bord de satellites géostationnaires ou en orbite basse, on a recherché les accumulateurs les plus aptes à répondre aux besoins spécifiques de ces utilisations. L'obtention d'une énergie massique élevée et la possibilité de subir sans défaillance un grand nombre de cycles de charge-décharge ont conduit, depuis plusieurs années, plusieurs groupes à étudier et perfectionner le générateur Ni- H_2 [13, 14].

Dans ce générateur, l'électrode positive est une électrode à base d'hydroxyde de nickel, analogue à celle utilisée dans les accumulateurs Ni-Cd. L'électrode négative est le siège en milieu alcalin de la réaction réversible :



Il s'agit donc d'une électrode qui, à la décharge, réalise électrocatalytiquement, comme dans une pile à combustible, l'oxydation de H_2 et, à la charge, permet, sans se détériorer, la production d'hydrogène qui est stocké autour de l'empilement d'électrode dans un container où la pression en fin de charge atteint 40 bars. Avec des électrodes positives allégées, il a été montré sur des éléments de 30 Ah que l'on pouvait atteindre une énergie massique de 56 Wh/kg et subir sans dommage 1 200 cycles simulant les conditions de fonctionnement du générateur en mode géostationnaire.

Bien entendu, un tel système, compte tenu du caractère sophistiqué des parties mécaniques et de l'emploi d'électrodes à hydrogène comportant des métaux précieux, est limité à des applications très particulières.

3. Accumulateurs pour véhicules électriques

Il peut paraître abusif de parler de système nouveau s'agissant de véhicule électrique, puisqu'il est bien connu que ce concept a déjà eu son heure de gloire il y a presque 100 ans. Cependant, face aux perfectionnements importants dont a été l'objet le véhicule thermique, l'émergence du concept véhicule électrique reste difficile, même en notre période où la réduction de la pollution s'impose de plus en plus.

Indépendamment des contraintes liées nécessairement à l'emploi d'accumulateurs et donc aux durées de la recharge, le développement du véhicule électrique est tributaire des progrès qui restent à accomplir pour les batteries électrochimiques. On notera, d'ailleurs, que la substitution totale des véhicules thermiques par les véhicules électriques ne pourra s'effectuer que lorsque les problèmes touchant à la fois les piles à combustible, le stockage et la distribution des combustibles idoines auront été résolus. A plus court terme, les accumulateurs pourront permettre de réaliser des véhicules électriques en série significative (bien que toujours marginale, comparée à la production des véhicules traditionnels), à la condition que, compte tenu des marchés visés, leur coût et leur longévité soient acceptables. Ainsi, contrairement à une opinion très répandue, ce n'est pas l'insuffisance des caractéristiques massiques ou volumiques des accumulateurs qui retarde le développement des véhicules électriques, mais essentiellement leur coût : investissement direct ou/et amortissement trop élevé pour cause d'une longévité trop faible.

Actuellement, cinq types d'accumulateurs prétendent pouvoir résoudre ce problème :

- les accumulateurs à négative de lithium (fonctionnant autour de la température ambiante),
- l'accumulateur Na-S,
- le Ni-Zn,
- le Ni-Cd,
- le Pb-PbO₂.

Le générateur Al-air, très étudié par un groupement de laboratoires US (Livermore Lab., Alcan, Eltech) dans les années 1980-1987, n'apparaît pas être un système économiquement valable pour les véhicules électriques. En effet, sur la base très optimiste d'une production énergétique de 5 kWh/kg d'aluminium et un prix de l'aluminium mis sous forme d'électrodes de 15 F/kg, on constate que le coût du kWh, pour ce combustible, est de 3 F, soit environ 8 fois le prix du kWh généré à la sortie d'un moteur thermique sous la forme mécanique par un carburant classique (en considérant à la distribution son prix hors taxes). Des hypothèses très hardies ont été formulées quant à un abaissement du prix de l'aluminium par récupération de l'alumine issue des générateurs Al-air ; il reste que le coût énergétique du "carburant" aluminium est encore 4 à 5 fois plus élevé que celui d'un produit pétrolier. Pour l'application aux véhicules électriques, on se trouve donc dans une situation économique inverse de celle traduite par les bilans d'exploitation de véhicules à accumulateurs où le coût du kWh, via le réseau électrique, est inférieur ou du même ordre que celui des carburants pétroliers. Par ailleurs, le problème technique de l'élimination périodique de Al₂O₃ ne peut être considéré comme totalement résolu.

Les accumulateurs à négative de lithium

Nous avons noté, précédemment, que ce type d'accumulateur comportant un électrolyte organique liquide ou solide pouvait vraisemblablement trouver des applications, à moyen terme, dans le domaine des générateurs de petite capacité, notamment comme composant intégrable dans les circuits électroniques. En revanche, les prévisions faisant état à court terme d'applications dans le domaine du véhicule électrique semblent très optimistes, si ce n'est irréalistes. En effet, outre la longévité en cyclage qui est loin d'être atteinte, les densités de courant surfaciques (mA/cm²) sont très faibles et, dans ces conditions, la réalisation d'un générateur de plusieurs kWh implique la mise en œuvre de surfa-

ces importantes d'électrodes d'où des problèmes technologiques de collecte des charges et de régulation thermique qui n'ont pas encore trouvé de solution validée. Sous réserve de découvertes qui pourront peut-être émerger à l'issue de recherches à poursuivre sur ces systèmes, en l'état, les générateurs à négative de lithium fonctionnant à température ambiante ne peuvent satisfaire des applications dites de puissance.

L'accumulateur sodium-soufre

Il est indéniable que les recherches intenses, qui continuent à être développées sur ce couple [15], ont déjà amené des progrès quant à la durée de vie en cyclage des éléments Na-S, notamment à travers l'analyse des causes de défaillance des tubes en β -alumine. Toutefois, les données permettant une évaluation de ce que pourrait être le coût du kWh sont encore insuffisantes et expliquent la dispersion des coûts annoncés. En l'absence de données économiques et bien que des réalisations technologiques importantes aient déjà été effectuées, il est prématuré de présenter Na-S comme un couple privilégié pour le véhicule électrique. Ceci d'autant que la température élevée de fonctionnement (325 °C) crée des contraintes de service qui interdisent certaines utilisations. Ainsi, l'obtention d'énergies massiques de l'ordre de 100 Wh/kg ne peut être l'élément décisif quant à l'utilisation du Na-S sur véhicule électrique.

Ni-Zn

Le couple Ni-Zn, déjà évoqué comme candidat pour la réalisation de petits générateurs portables, est particulièrement attractif pour le véhicule électrique, compte tenu de ce que son coût pourrait être intermédiaire entre celui de Pb-PbO₂ et celui du Ni-Cd. Les essais déjà effectués montrent que ses caractéristiques aux régimes sévères de décharge sont excellentes et que son énergie massique est de l'ordre de 70 Wh/kg. Il reste à prouver que sa longévité en cyclage pourra dépasser 600 cycles et, si possible, atteindre 1 000 cycles. Des résultats prometteurs ont déjà été obtenus au niveau du laboratoire [16] en combinant un régime particulier de charge avec des additifs en solution. Des essais à caractère statistique sont actuellement en cours.

Ni-Cd

Il est clair que la batterie Ni-Cd ne pourra jamais, compte tenu de son coût, prétendre équiper des flottes importantes de véhicules électriques. Toutefois, les caractéristiques inégalées du Ni-Cd pour ce qui est des recharges rapides permettent d'en envisager l'utilisation sur des véhicules de transport collectif où le coût de la batterie est un élément moins déterminant que pour des véhicules particuliers. Cette perspective, qui peut intervenir grandement dans la réduction des nuisances dans les centres urbains, sera développée d'autant plus rapidement que des progrès auront été faits quant à l'abaissement des coûts du Ni-Cd. A cet égard, la mise au point d'électrodes négatives et positives plastifiées contribue à l'atteinte de cet objectif qui n'apparaît pas irréaliste. Par ailleurs, il faut souligner que les progrès effectués sur les électrodes de Ni et Cd permettent maintenant l'obtention de batteries ayant une énergie massique comprise entre 55 et 60 Wh/kg.

Pb-PbO₂

Bien que, parmi les couples mentionnés, Pb-PbO₂ soit celui qui offre l'énergie massique la plus faible (40 à 45 Wh/kg), son coût particulièrement bas (1 000 à 1 500 F/kWh) en fait un système attractif pour véhicules dont l'autonomie et la charge utile ne sont pas trop importantes. En fait, un des principaux obstacles à son emploi est sa longévité en cyclage (de l'ordre de 600 cycles) lorsque l'accumulateur est soumis à des décharges sévères et profondes. Il faut, toutefois, noter que des recherches en cours portant sur la structure des collecteurs pourront vraisemblablement

conduire à un gain de 5 à 10 % sur l'énergie massique de la batterie Pb-PbO₂ et améliorer la tenue des électrodes à des régimes de décharge sévères [17].

Les centrales de stockage de l'énergie

Durant la décennie 1970-1980, il a été beaucoup discuté des moyens propres à assurer une meilleure adéquation entre la production de l'énergie électrique et sa consommation. Le recours à des accumulateurs électrochimiques constitue l'un des moyens de stockage de l'énergie produite dans les périodes dites creuses et de restitution durant les périodes dites de pointe. En France, ce problème pouvait apparaître comme particulièrement important compte tenu du mode nucléaire prépondérant de production de l'énergie électrique. En fait, il s'avère actuellement que la situation a été normalisée par différents moyens (dont la politique d'incitation tarifaire, le maillage du réseau et la modulation des réacteurs nucléaires) et que le recours à des centrales fixes d'accumulateurs ne s'impose donc pas.

Par ailleurs, on envisage toujours que l'électrochimie puisse intervenir dans les périodes creuses, mais par le biais de la production d'aluminium ou d'hydrogène. Pour les autres pays et notamment les USA, le recours aux accumulateurs est toujours d'actualité. S'agissant d'accumulateurs fixes, il est, pour cette utilisation, admissible que le fonctionnement des batteries implique l'usage d'organes annexes ou un fonctionnement à une température très différente de l'ambienté. Aussi peut-on observer que beaucoup de systèmes électrochimiques présentés initialement pour des applications aux véhicules électriques sont, par la suite, proposés pour la réalisation de centrales fixes de stockage. Tel est le cas des générateurs fonctionnant à température élevée comme Na-S (325 °C) et LiFeS (450 °C), encore que, dans le cas de Na-S, subsiste chez certains groupes (BBC) la motivation véhicule électrique.

De la même façon, on justifie maintenant la poursuite des études sur les systèmes brome-zinc et chlore-zinc, particulièrement dans ce dernier cas où le stockage du chlore se fait à basse température. Dans tous les cas, les organes annexes de gestion thermique ou de circulation d'électrolyte apparaissent plus aisément amortissables lorsqu'il s'agit d'un groupement important d'accumulateurs stationnaires.

Quels que soient ces systèmes, leur justification technique et économique n'est pas encore acquise et il conviendra, notamment avant toute utilisation significative, d'en démontrer la longévité et la fiabilité, les autres critères étant le rendement global charge/décharge et le coût du kW installé.

Si, pour ce type d'utilisation, on peut considérer que les systèmes envisagés sont des reprises de couples étudiés initialement pour un autre objectif, il faut, néanmoins, noter les recherches spécifiques concernant les accumulateurs pouvant être couplés avec des systèmes photovoltaïques. Dans ce cas, le coût de l'accumulateur doit être très faible et, actuellement, seuls les accumulateurs Pb-PbO₂ sont utilisés. Des recherches sont toujours programmées aux USA en vue de rechercher des couples électrochimiques encore moins coûteux et ayant néanmoins un bon rendement charge/décharge et une très grande longévité en cyclage. Ces recherches, encore sans succès, ont été jusqu'alors principalement axées sur les systèmes redox liquides.

Conclusion

Indépendamment des perfectionnements très importants apportés depuis peu à des couples traditionnels comme Pb-PbO₂ (développement des batteries scellées) et surtout Ni-Cd, les demandes croissantes concernant de petits accumulateurs portables

Saft implante un laboratoire aux États-Unis

Saft, filiale du groupe CGE, crée un centre de recherche aux États-Unis et obtient un premier contrat d'étude de plus de 20 millions de francs de l'administration américaine. Avec la nouvelle unité de Baltimore (Maryland), Saft dispose désormais de trois centres de recherche et développement dans le monde.

L'équipe américaine comprend déjà une douzaine d'ingénieurs et concentrera ses travaux sur l'étude des couples électrochimiques à base de lithium, de nickel, et sur les piles thermiques.

Le centre a déjà obtenu un premier contrat de recherche de 20 millions de francs du Department of Energy (DOE). Objectif : développer des batteries totalement nouvelles au lithium-sulfure destinées à la propulsion de voitures électriques. Saft a obtenu ce contrat grâce à sa position de leader dans le domaine du lithium.

L'équipe américaine travaillera sur ce projet clé en étroite collaboration avec les centres de recherche français de Saft : celui de Bordeaux, connu pour ses recherches sur le nickel-cadmium pour véhicule électrique, et celui de Poitiers, spécialisé dans le lithium.

Saft a investi en 1989 plus de 5 % de son chiffre d'affaires dans la recherche et emploie aujourd'hui plus de 260 chercheurs et techniciens d'étude dans le monde.

pour de multiples utilisations grand public vont, à moyen terme, voir le développement de nouveaux générateurs tels que Ni-hydrures, Ni-Zn, et éléments rechargeables à électrode de lithium. Par ailleurs l'équipement de systèmes de haute technologie (satellites, sous-marins, applications militaires) justifie la mise au point de batteries Ni-hydrogène et Al-air. Enfin, le maintien de l'objectif "véhicule électrique", compte tenu de l'importance que prend la sauvegarde de l'environnement, justifie les recherches visant à la mise au point de l'accumulateur Ni-Zn parallèlement à l'emploi de batteries Pb-PbO₂ en perfectionnement et Ni-Cd dans sa version la plus évoluée. En revanche, les chances de commercialisation de nouvelles batteries, comme Na-S, brome-zinc et chlore-zinc, sont encore difficiles à évaluer.

Bibliographie

- [1] H. Tophorn, "Sealed Maintenance free Batteries", communication à la SEE, 21-22 novembre 1989, Gif-sur-Yvette ; *J. Power Sources*, 1988, 23-143.
- [2] J. Leonardi, communication à la SEE, 21-22 novembre 1989, Gif-sur-Yvette.
- [3] B. Bugnet, D. Doniat, in *Power Sources*, 1982, n° 10, p. 377, L.J. Pearce, Ed. London.
- [4] K. Fujii et coll., Yuasa Jiho., 65-1-octobre 1988.
- [5] A. Percheron-Guegan, J.C. Achard, G. Bronoel et coll., Société Chimique de France, Paris, 26-27 septembre 1974 ; *Intern. J. Hydrogen Energy*, 1976, 1, p. 251.
- [6] OVONIC. US Patent 4551400 du 5 novembre 1985 (S. Venkatesan et coll.), *33th Int. Power Sources Symposium*, 13-16 juin 1988, p. 476.
- [7] D. Linden, *Handbook of Batteries and Fuel Cells*, chap. XI, Mac Graw Hill, New York.
- [8] D. Fouchard, *33th Int. Power, Sources Symposium*, 13-16 juin 1988, p. 71.
- [9] J.S. Lundsgaard, S. Yde-Andersen, R. Koksang, D.R. Shackler, R.A. Autin, D. Fauteux, *2nd Intern. Symp. on Poly-*

mer Electrolytes, Sienna (Italie), 14-16 juillet 1989 ; sous presse, in : *J. Power Sources*.

[10] J.F. Cooper, "Overview of the Al-Air Battery Program", *Proceeding 5th Conf. Electrochemical Contractors*, US/DOE, Decembre 1982 ; E.J. Rudd, *33th Intern. Power Sources Symposium*, 13-16 juin 1988, p. 427.

[11] M.J. Niksa et coll., *33th Intern. Power Sources Symposium*, 13-16 juin 1988.

[12] SORAPEC, brevet français 88.15703, 30 novembre 1988.

[13] J.M. Harvey (Marconi Sp. Syst. Ltd.), communication à la

SEE, 21-22 novembre 1989.

[14] A. Pellerin, Saft, communication à la SEE, 21-22 novembre 1989.

[15] W. Auxer, *32th Intern. Power Sources Symposium*, 9-12 juin 1986, p. 49.

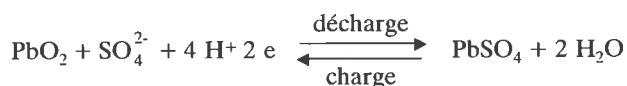
[16] G. Bronoel, A. Millot, N. Tassin, *Revue Générale d'Electricité* (sous presse).

[17] G. Bronoel, S. Besse, N. Tassin, communication à la *10th International Lead Conf.*, 29-31 mai 1990, Nice (France).

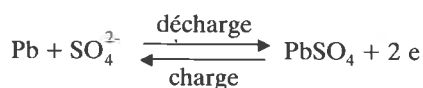
Réactions d'équilibre des principaux accumulateurs

Accumulateur Pb-PbO₂

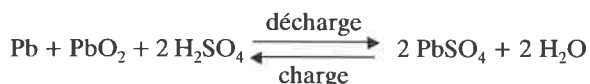
Electrode positive :



Electrode négative :

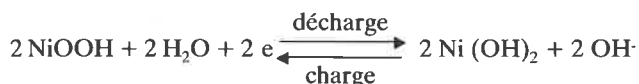


Réaction globale :

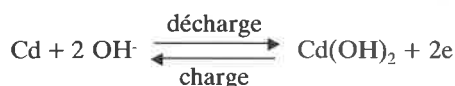


Accumulateur Ni-Cd

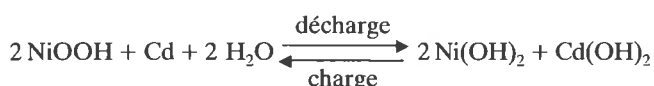
Electrode positive :



Electrode négative :

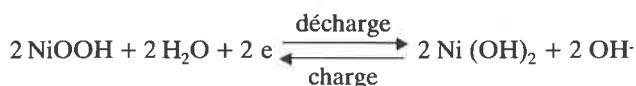


Réaction globale :

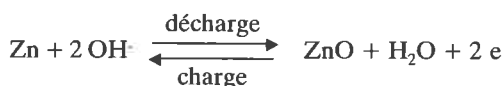


Ni-Zn à électrolyte en volume restreint

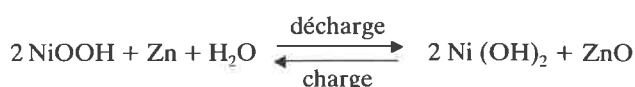
Electrode positive :



Electrode négative :

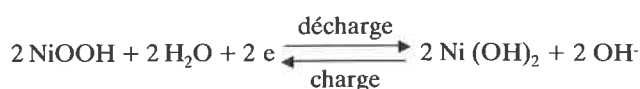


Réaction globale :

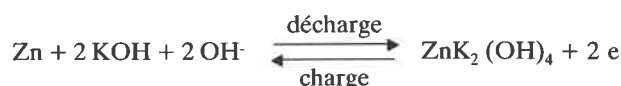


Ni-Zn à électrolyte en excès

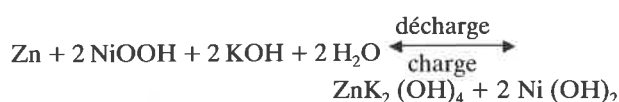
Electrode positive :



Electrode négative :

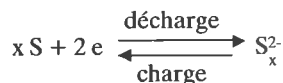


Réaction globale :



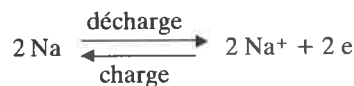
Accumulateur NaS

Electrode positive :



avec x entre 5 et 2 suivant l'état de décharge. En se plaçant au potentiel le plus élevé, on peut poser x = 5.

Electrode négative :



Réaction globale :

