

Accumulateurs Lithium-ion et véhicules électriques

Daniel CHATROUX, Bruno BERANGER
CEA

L'objectif de cette présentation est de comparer les technologies Lithium-ion par rapport aux autres stockages et de mettre en évidence les spécificités techniques qui permettent des ruptures technologiques dans des applications, comme l'outillage électroportatif ou les véhicules électriques.

Mots-clés— Accumulateurs Lithium-ion, batteries, véhicules électriques

1. INTRODUCTION

La présentation a pour objectif de présenter les critères principaux de choix d'un mode de stockage d'énergie et de donner des ordres de grandeur pour situer le stockage d'électricité par des accumulateurs électrochimiques. Le panorama des différentes technologies d'accumulateurs permet alors de situer les technologies traditionnelles à base d'électrolyte aqueux par rapport aux chimies Lithium-ion plus récentes, de situer les performances annoncées et mesurées et de présenter l'impact sur certaines applications [1].

2. STOCKAGES D'ENERGIE CHIMIQUES OU ELECTROCHIMIQUES

2.1. Critères de performances des stockages d'énergie

Les stockages d'énergie peuvent être caractérisés par quatre paramètres essentiels, l'énergie massique (Wh/kg), l'énergie volumique (Wh/l), le rendement et le comportement vis à vis de la sécurité.

Tableau 1. Performances principales des stockages chimiques et électrochimiques

Stockage d'énergie	Energie massique (Wh/kg)	Energie volumique (Wh/l)	Rendement ou rendement de conversion	Risques impactant la sécurité
Hydrogène	33 000	2,75 (gaz - 1bar) 2100 (liquide)	50 % (pile à combustible)	Explosion
Essence Diesel	13 000 12 400	9 800 10 500	15 to 40 % (moteur thermique à différents régimes de charge)	Combustion rapide, risque d'explosion avec l'essence
Bois	4 000	1600-2000	15 à 40 %	Combustion lente
Accumulateurs électrochimiques	40 to 200	70 to 300	80 à 95%	Combustion rapide, faible risque d'explosion, risques électriques

L'unité d'énergie est le Joule, mais dans le domaine du stockage de l'énergie, le W.h (3600 J), et le kW.h (3,6 MJ) sont préférés.

L'hydrogène a une énergie massique très élevée, mais une très faible énergie volumique dans les conditions normales de températures et de pression. Il doit donc être liquéfié ou être stocké sous pression. Les piles à combustibles qui utilisent l'hydrogène ont un rendement qui est de l'ordre de 50% sur une large plage de puissance.

L'essence et les gasoils offrent des énergies massiques et volumiques élevées car ce sont des liquides. Les rendements des moteurs à combustion internes munis de leur dépollution atteignent des rendements maximaux de l'ordre de 30 à 35% à forte charge. Par contre, ces rendements chutent fortement à faible charge, lorsque la puissance demandée est plus faible. Pour pallier ce défaut, l'hybridation à dérivation de puissance permet de combiner un moteur thermique à essence qui fonctionne toujours sous forte charge, à fort couple, à la vitesse de rotation la plus faible possible, pour être toujours dans sa zone de rendement élevé associé à une batterie auxiliaire pour fournir la puissance en phase transitoire [2].

Le niveau de risque lié au feu d'un combustible liquide est lié à la température d'inflammation. Ce risque est donc plus élevé pour l'essence que pour les diesels. D'autre part, le danger d'un feu est fonction de l'énergie stockée qui sera libérée, mais surtout à la cinétique du dégagement d'énergie. Le bois est cité ici car il correspond à un fort niveau d'énergie de 4 kWh/kg, mais avec un niveau de risque faible, car sa combustion est lente.

Les accumulateurs électrochimiques stockent entre vingt et cent fois moins d'énergie que les stockages chimiques, mais avec de très bon rendement. Leurs niveaux de risque sont en partie liés à la chimie, mais aussi à la cinétique de l'emballement en cas de défaut.

2.2. Choix du type de stockage

Le diagramme de Ragone permet de situer les différentes technologies de stockages selon les axes énergie massique, énergie volumique :

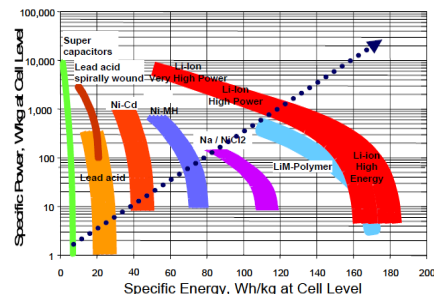


Fig.1 Diagramme de Ragone supercondensateur et accumulateurs électrochimiques

Pour la sélection d'un type de stockage, l'utilisation du critère temporel amène directement aux mêmes résultats :

- pour des durées inférieures à 100 ms environ, les condensateurs chimiques sont adaptés
- les supercondensateurs sont adaptés pour les durées de quelques secondes à quelques minutes
- de quelques minutes jusqu'à deux heures, voire plus, les accumulateurs électrochimiques sont adaptés
- Au-delà de deux heures, un groupe électrogène thermique ou à pile à combustible peut-être pertinent.

2.3. Spécifications constructeur de différentes technologies d'accumulateurs

Le document [3] est une synthèse très complète des niveaux de performance spécifiés par les constructeurs pour les différentes technologies d'accumulateurs.

Tableau 2. Spécifications de différentes technologies d'accumulateurs

Technologies	Plomb acide	NiCd	NimH	Li-ion Phosphate de Fer	Li-ion (1)
Energie massique (Wh/kg)	30-50	45-80	60-110	100-120	100-200
Energie volumique (Wh/l)	75-120	80-150	220-330	190-220	220-330
Densité de puissance (2) (W/kg)	700		900	800 (3)	1500 (3)
Nombre de cycles	600(1) 1200(2)	2000	1500	>2000	500-1000
Autodécharge mensuelle	5%	20%	30% (4)	5% (5)	10% (5)
Tension nominale	2V	1,2V	1,2V	3,2V	3,6V
Technologie	Plomb-acide	NiCd	NimH	Li-ion Phosphate de Fer	Li-ion
Gamme de température	-20 °C +60 °C	-40 °C +60 °C	-20°C +60°C	0°C +45°C (charge) -20°C +60°C (décharge)	-20°C +60°C (6)
Avantages	Coût	Fiabilité Basse température	Densité d'énergie	Densité d'énergie, sécurité, coût, nombre de cycles	Energie et puissance massique
Inconvénients	Faible énergie Mort subite	Faible énergie toxicité	Terre rare (7), coût, comportement en température	Charge à basse température (6)	Sécurité des gros accumulateurs, coût
Estimation de coût (€/kWh)	250 (a) 200 (b)	600	1500 à 2000	1000 à 1800 (8)	2000 (8)

- (a) Etanche
(b) tubulaire

Cette synthèse qui présente un grand nombre d'informations peut être complétée des précisions et mises à jour suivantes :

- (1) Les accumulateurs Lithium-ion regroupent des familles différentes qui seront présentées dans ce document
- (2) Pour toutes les technologies d'accumulateurs, il existe des versions optimisées puissance et d'autres énergie
- (3) Les accumulateurs Lithium-ion d'outillage électroportatifs atteignent 3kW/kg, les accumulateurs spéciaux plus de 5 kW/kg
- (4) Pour le NimH, l'autodécharge est élevée après la charge puis décroît. Un stockage annuel est possible.
- (5) Des accumulateurs Lithium, dont ceux à phosphate de Fer (LiFePO4), de bonne qualité conservent leur énergie pendant des années

- (6) Comme pour le LiFePO4, les accumulateurs Lithium peuvent fonctionner en température négative en décharge, mais doivent préférentiellement être chargé avec une température positive, sous peine de dégradation (rapide) de leur durée de vie.
- (7) Hydrure à base de Lanthane
- (8) Depuis 2005, les coûts des batteries Lithium ont fortement décliné. Les modules sont entre 300 et 1000 €/kWh, les accumulateurs entre 150 et 300€/ kWh

2.4. Accumulateurs aqueux

Les accumulateurs électrochimiques à base d'eau comme le plomb (eau et acide), ou Nickel-Cadmium ou NimH (eau et potasse) présentent des particularités liées à ces électrolytes. Il existe un grand nombre de réactions chimiques parasites. Certaines donnent lieu à des consommations permanentes, donc une autodécharge. Ce point est (fortement) pénalisant pour un grand nombre d'utilisations nomades ou intermittentes.

Par contre, le très grand avantage de ces technologies est de pouvoir charger des batteries, constituées de mise en série de ces accumulateurs, sans besoin d'électronique associée.

Un accumulateur chargé avant les autres, dans la mise en série, verra sa tension augmenter, puis il apparaît l'amorçage d'une réaction parasite qui consommera l'énergie (électrolyse et/ou dissipation de chaleur). On peut ainsi continuer à faire passer du courant dans une mise en série, jusqu'à ce que tous les accumulateurs soient pleinement chargés. Il n'est pas nécessaire d'avoir des électroniques d'équilibrage additionnelles. L'équilibrage et la charge à 100% de tous les accumulateurs en série s'effectuent en faisant seulement une prolongation de charge avec une surcharge de certains éléments de la batterie.

Du fait de la présence des pertes d'énergies par des réactions parasites en stockage avec autodécharge ou en charge, les rendements sont limités.

2.5. Accumulateurs Lithium-ion

Les accumulateurs électrochimiques Lithium-ion sont basés sur un matériau positif (déposé sur un feuillard d'aluminium) et un matériau négatif (déposé sur un feuillard de cuivre), dans lesquels les ions Lithium s'insèrent alternativement. Il y a en fait plusieurs familles de Lithium-ion selon les matériaux utilisés avec des performances de stockage, de durée de vie et de sécurité différentes.

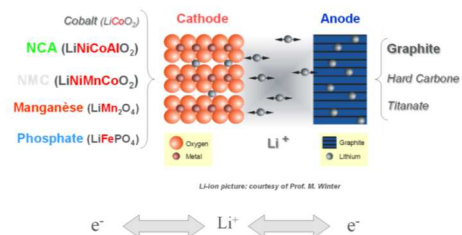


Fig.2 les différentes familles d'accumulateurs Lithium-ion

Pour les accumulateurs lithium-ion l'eau est un polluant. La fabrication des accumulateurs s'effectue en salle anhydre. Les étapes critiques sont sous atmosphère inerte.

Par rapport aux autres électrochimies, les accumulateurs Lithium-ion présentent la particularité d'une quasi absence de réactions chimiques parasites, autres que des réactions très lentes de vieillissement. Ceci a plusieurs impacts :

- La très faible autodécharge permet de conserver l'énergie pendant des années pour des accumulateurs de qualité,
- Chaque électron fourni ou extrait de l'accumulateur donne lieu à un déplacement d'un ion Lithium. Le rendement faradique est proche de 100%. On peut donc connaître l'état de charge précisément par comptage de charge.
- Une électronique de détection de fin de charge ou de décharge est indispensable sur chaque étage d'accumulateurs dans une mise en série pour arrêter la charge ou la décharge sur les seuils de tension haute et basse. Un accumulateur Lithium ne doit jamais être surchargé sous peine de le détériorer et de risquer un emballement. Il ne doit pas non plus être déchargé en-dessous d'une tension minimale (classiquement spécifiée à 2V) sous peine de le détériorer (oxydation, transfert d'espèces chimiques). Ensuite, il ne faut pas le recharger du fait d'un risque d'emballement
- Un circuit électronique d'équilibrage est nécessaire, mais seulement pour traiter de très faibles différences de charge. Classiquement le circuit d'équilibrage amène tous les accumulateurs dans le même état de charge en fin de charge en déchargeant les accumulateurs les plus chargés pour les aligner sur les moins chargés. Cette méthode dissipative correspond en fait à très peu de pertes du fait des faibles niveaux d'énergies de déséquilibre à compenser. Au niveau de notre laboratoire, les cartes d'équilibrage que nous avons réalisées permettent d'équilibrer avec un courant de décharge de 250 mA. Nous les avons utilisés jusqu'à des batteries de 100Ah. Dans le domaine automobile des batteries de 40 Ah sont équilibrées avec des courants de seulement 10 ou 20 mA. L'équilibrage n'a pas besoin d'être immédiat, ni systématique, après chaque charge. Il doit par contre, au moins être fait de manière périodique.



Fig.3 Carte de surveillance et d'équilibrage d'un module de batterie Lithium-ion

- Classiquement, du fait des niveaux de courants d'équilibrage, le circuit d'équilibrage ne peut pas compenser un déséquilibre important qui existerait après fabrication. Les batteries sont donc fabriquées avec des accumulateurs livrés avec un même état de charge. Après leur fabrication, les accumulateurs Lithium-ion doivent être formés par plusieurs cycles de charge-décharge à régime lent. La capacité est alors mesurée. Le dernier cycle peut s'arrêter à un état de charge défini, sans surcoût. Il est donc classique de recevoir tous les accumulateurs de différents lots avec un même état de charge pour être assemblés.
- Les rendements peuvent être élevés, supérieurs à 95% par exemple, alors que les chimies aqueuses ont plutôt des rendements de 70-80%.

Si l'utilisation des chimies Lithium-ion peut sembler plus compliquée du fait de la nécessité d'avoir un circuit de mesure et d'équilibrage de chaque étage d'accumulateurs en série, ceci est très largement compensé par la possibilité de connaître

facilement et précisément la fin de charge et de décharge, mais également d'avoir des indicateurs d'état de charge par coulombmétrie ou par mesure de tension pour les chimies où la tension croît avec la charge.

Le laboratoire avait modifié la batterie NimH d'un scooter VECTRIX par une batterie LiFePO4. La gestion de cette dernière est beaucoup plus simple que la batterie d'origine. La détection de fin de charge d'une batterie NimH est connue pour des charges rapides à températures ambiante (croissance de tension, puis dV/dt négatif et élévation de température). Par contre, ces modes de détection ne fonctionnent plus sur une batterie déjà chaude du fait d'un roulage. La gestion de la batterie NimH d'origine du scooter était complexe et néanmoins source de dysfonctionnements lorsque la batterie était chaude ou après un stockage de longue durée. Le passage à une batterie Lithium ion supprime ces problèmes.

Les accumulateurs Lithium-ion présentent des résistances internes plus faibles que les accumulateurs classiques. Ceci permet de conserver des rendements élevés, mêmes à fort régime de charge et de décharge. Par contre, le niveau de courant de court-circuit peut être très élevé. Les fusibles doivent être dimensionnés en conséquence.

Les chimies Lithium ion sont soumises à deux types de vieillissement. Le vieillissement calendaire est lié à l'âge des accumulateurs et s'accélère lorsque la température augmente. Le second mode de vieillissement est lié au cyclage. Il dépend du nombre de cycles, de l'amplitude des cycles et de leur position sur la courbe d'état de charge. Dans la mesure du possible, il faut éviter les extrêmes, ne pas charger totalement (ne pas aller à 4,2V, mais se limiter à 4,1V ou 4V pour la tension de fin de charge pour la plupart des chimies) et ne pas décharger totalement. Il faut aussi savoir que la charge des accumulateurs en température négative dégrade fortement la durée de vie. Selon les applications, un conditionnement en température peut s'avérer nécessaire.

Les chimies Lithium-ion progressent régulièrement d'environ 6% par an en énergie massique. On est loin de la progression de la loi de Moore, mais ce progrès régulier permet de franchir des seuils à partir desquels le stockage batterie peut devenir viable pour une application donnée.

Aujourd'hui, il y a plus de 7 milliard d'accumulateurs produits chaque année sur la planète, dont une grande part dans le format 18650 (cylindrique de 18 mm de diamètre, et de 65 mm de long) pour les applications batterie d'ordinateur portables initialement. Une grande part des progrès et innovations est fait dans ce format standard.

Du fait de la dynamique du domaine et de la conjoncture mondiale, la baisse des coûts est régulière. Il y a même actuellement une avance, estimée à environ cinq ans, sur la baisse des coûts.

Tableau 3. Paramètres des technologies d'accumulateurs aqueuses et lithium ion

Paramètre	Technologies aqueuses	Lithium ion
Equilibrage	😊	😞
Détection de fin de charge	😞	😊
Autodécharge	😞	😊😊

Energie	☹	😊😊
Sécurité	😊	☹ ou ☹☹
Risque hydrogène	☹	😊
Gamme de température	😊	☹
Coût	Constant	Décroit

2.6. Technologies d'accumulateurs Lithium

Il y a plusieurs familles d'accumulateurs Lithium-ion avec des performances en énergie et comportement en sécurité différents.

Pour l'électrode positive, on peut utiliser les composés suivants sur le feuillard d'aluminium :

L'oxyde de Cobalt est le matériau le plus ancien. Il est réactif. En cas de défaillance ou d'utilisation abusive, l'élévation de température produit la décomposition de l'oxyde et l'oxygène libéré réagit avec les autres matériaux qui sont combustibles. L'oxyde est un matériau cher du fait du coût du Cobalt. Il permet une forte énergie stockée.

Le NCA (Nickel cobalt Aluminium) est un oxyde réactif mais qui permet une forte énergie stockée. La durée de vie calendaire est bonne. Les accumulateurs PANASONIC utilisés par TESLA sont de cette technologie. Le coût du matériau est un peu inférieur du fait de la moindre quantité de Cobalt.

L'oxyde de Manganèse est un matériau à très faible coût et à énergie stockée élevée. Par contre, le vieillissement calendaire est rapide.

L'oxyde de Nickel Manganèse et Cobalt (NMC) est un matériau dont le coût, les performances et le comportement en vieillissement est lié aux pourcentages de ces constituants. Ils varient de 1/3, 1/3, 1/3 à 5%, 90%, 5%. Les NMC sont très utilisés actuellement.

Le phosphate de Fer est le matériau le plus stable, car il n'y a pas de libération d'oxygène en température. Contrairement aux autres chimies où la tension croît tout au long de la charge et où la tension de fin de charge spécifiée est 4,2V, le phosphate de Fer a un plateau à 3,3V sur la plus grande partie de sa courbe de charge. La tension de fin de charge est de 3,6V. La tension de fin de décharge est de 2V. Comme il y a très peu d'énergie entre 3V et 2V, il est possible d'arrêter prématurément la décharge. Le phosphate de Fer permet alors d'avoir une batterie avec une tension nominale +/- 10% (plateau à 3,3V, fin de charge à 3,6V, fin de décharge à 3V). Le phosphate de Fer offre une durée de vie calendaire élevée et un grand nombre de cycles. Par contre, du fait de sa tension inférieure et de la capacité du matériau, l'énergie massique dépasse peu 100 Wh/kg alors que les autres chimies permettent le double. Le phosphate de Fer est très utilisé en Chine pour réaliser des accumulateurs de grande taille (plusieurs centaines d'Ah) pour les voitures et autobus. La sécurité a aussi permis à la société Valence®, puis d'autres par la suite, de proposer des modules Lithium ion à base de phosphate de Fer en remplacement en lieu et place de batteries au plomb. Avec ces modules, un intégrateur peut réaliser un pack batterie selon les besoins de l'application.



Fig.4 Batterie LiFePO4 de la société Valence®

Pour les autres chimies plus réactives, les fournisseurs proposent un pack batterie complet qui leur permet de maîtriser plus complètement les choix de sécurité.

L'électrode négative est classiquement en cuivre revêtu de graphite ou d'autres matériaux carbonés, (fibre de carbone, noir de carbone). Le graphite est instable dans l'électrolyte, mais est protégé par une couche d'interface, la SEI qui se forme lors des premiers cycles. La stabilité de la SEI intervient au premier ordre sur la durée de vie de l'accumulateur. Comme le potentiel du graphite est proche de celui du dépôt de lithium métal, la vitesse de charge a une limite, principalement à froid, pour ne pas déposer du lithium métallique au lieu d'avoir la réaction insertion des ions Lithium.

Pour avoir un nombre de cycle, une durée de vie accrue et la possibilité de charge rapide à basse température, une électrode négative en titanate peut être utilisée. Outre le coût supérieur, l'énergie décroît d'un tiers car, comme la tension de l'électrode est plus élevée (1,55V au lieu de 0,15V), la tension nominale de l'accumulateur est plus faible d'un volt.

Les électrodes négatives à base de silicium, ou contenant un peu de silicium, commencent à être commercialisées pour offrir des densités d'énergies supérieures.

2.7. Sécurité des batteries Lithium

La sécurité des batteries Lithium-ion est un sujet complexe multi-paramètres :

- Réactivité de la chimie Lithium-ion
- Electrolyte avec solvant combustible que l'on cherche à remplacer par un électrolyte entièrement polymère, et non pas seulement gélifié comme actuellement
- Séparateur multicouche, dont une couche qui est fusible pour bloquer les pores et la circulation des ions Lithium en cas d'échauffement
- CTP (fusible réarmable interne en bout d'accumulateur)
- CID (interrupteur mécanique interne qui ouvre le circuit en cas de surpression interne à l'accumulateur)
- Design de l'accumulateur
- Design des modules, par exemple pour empêcher la propagation d'un emballement thermique d'un accumulateur
- Conception du pack (résistance à un feu extérieur, absorption des chocs, refroidissement pour empêcher l'emballement thermique, polymère résistant au feu...)
- Electronique de gestion de la batterie qui maintient tous les accumulateurs dans la plage de tension et de température autorisée. Les électroniques peuvent être conçues selon des niveaux de sûreté élevés si l'application le nécessite.
- Architecture électrique (relai sous vide ou gaz pour l'ouverture de courant continu, fusibles à haut pouvoir de coupure ou disjoncteur ...).

Aujourd'hui, toutes les électrochimies présentées sont utilisées dans les applications, même celle qui sont réactives car elles présentent des niveaux élevés d'énergies stockées.

C'est au niveau de la conception globale système que les contraintes de sécurité sont gérées pour atteindre le niveau requis.

En laboratoire, l'extinction d'un feu de batterie s'effectue par inertage par injection de gaz neutre. Sur véhicule, malgré la tension présente en interne du pack, une solution classique d'extinction consiste à utiliser de l'eau pour agir par refroidissement.

3. APPLICATIONS

3.1. Applications principales des batteries aqueuses

Le premier marché pour les batteries au plomb acide est le démarrage des véhicules thermiques. Pour celui-ci la gamme de température de ces batteries est un avantage. Le plomb est aussi utilisé pour les applications de secours, UPS et centraux téléphoniques.

Le NiCd est aujourd'hui la technologie de batterie de démarrage et de secours des avions et de réseau de bord et de secours des trains. Cette technologie offre un bon niveau de fiabilité et de sécurité, avec une gamme de température étendue. Certaines technologies nécessitent de la maintenance (appoint d'eau).

Un marché important du NimH est la batterie des hybrides de type Toyota PRIUS. Dans cette application la batterie de l'ordre d'un kilowatt heure est conçue comme une batterie de puissance (20 kW). Elle est utilisée en microcycle (de 5%) dans une fenêtre d'utilisation (de 20% pour la version 2004) pour assurer la durée de vie garantie et un coût d'utilisation compétitif [2]. Les versions rechargeables utilisent une batterie Lithium-ion.

3.2. Marché classique des batteries Lithium

Les marchés classiques des batteries Lithium sont l'ordinateur portable, le téléphone et les autres objets connectés. Il est à noter qu'il existe un format standard qui est utilisé à la fois pour les ordinateurs portables et l'outillage électroportatif qui est le 18650. Comme indiqué précédemment, il s'agit de d'un cylindre de 18mm de diamètre et de 65 mm de long. En 2015, sept milliard d'accumulateurs Lithium ont été fabriqués sur la planète, dont une part importante selon ce format. Les progrès sont constants et rapides pour ces marchés très dynamiques qui tirent et alimentent les autres marchés. Pour obtenir une durée d'utilisation la plus longue possible, les chimies les plus énergétiques sont utilisées, associées à de nombreuses protections pour assurer un très bon niveau de sécurité au grand public. Outre la qualité de réalisation les accumulateurs sont munis de CTP et de CID. La batterie est encapsulée dans un capot polymère de protection mécanique. L'électronique de gestion est associée à des transistors MOSFETs de sécurité qui empêchent une surcharge ou une sur décharge du pack. Le prix des packs batteries d'ordinateurs est de quelques centaines d'euros le kilowattheure.

On peut le vérifier en tant qu'utilisateur : le pack de la figure 5 stocke 60Wh pour 388g. La densité d'énergie est de 154 Wh/kg. Le prix public en pièce de rechange est de 30 €. Ce qui fait 500 €/kWh. Le coût en pièce de première monte est bien inférieur.



Fig.6 Pack batterie d'ordinateur portable

3.3. Outillage électroportatif

L'outillage électroportatif était traditionnellement en NiCd, puis NimH, et a brutalement commuté pour passer presque complètement au Lithium en moins de trois ans. Ceci a été rendu possible par la chute des coûts, due à la croissance des marchés et une surproduction mondiale. Les progrès amenés par cette mutation sont :

- La disparition des problèmes dus à l'autodécharge. Après des mois de stockage l'outil peut encore être utilisé sans recharge préalable.
- Des possibilités de charge rapide en 15-20 mn avec un impact relativement faible sur la durée de vie.
- Des batteries très légères et très puissantes.

On observe maintenant que la batterie est un produit à part entière, qui peut se monter sur de nombreux outils, aussi bien en gammes amateurs que professionnelles.

3.4. Véhicule électrique

Par le passé, plusieurs tentatives de démarrage du véhicule électrique ont avortées. Outre la trop faible autonomie, il a été montré un coût d'usage pour les véhicules des années 90 trois fois plus élevé que celui des véhicules thermiques.

Nous avons montré par des études de retour d'expérience sur véhicules que les accumulateurs plomb, NiCd et NimH utilisés sont inadaptés pour les régimes de décharge des véhicules [4].

Tableau 4. Comparaison des énergies massiques spécifiée et celles mesurées sur véhicule en usage réel

Technologie	Plomb-acide	NiCd	NimH	Li-ion Phosphate de Fer	Li-ion
Energie massique spécifiée	30-50	45-80	60-110	100-120	100-200
Energie massique mesurée sur véhicule	20	30	40	70-80	100 +

On observe sur véhicules que les chimies aqueuses utilisées ne délivrent que la moitié de l'énergie spécifiée. L'énergie embarquée est limitée. Les temps de décharge sont alors de l'ordre de l'heure. Ces temps correspondent à des décharges trop rapides pour ces technologies. Par exemple, les accumulateurs NiCd de Saft utilisés sur les voitures électriques des années 1990 sont spécifiés pour des décharges en trois heures. Une décharge trois à quatre fois plus rapide amène à une forte chute de l'énergie délivrée et impacte aussi la durée de vie. Outre la chute de tension due à la résistance interne, la chute de l'énergie délivrée est due à la limitation de la vitesse de diffusion des espèces chimiques qui limite la capacité restituée. Par exemple, pour ce régime de décharge, un pack NiCd de 100Ah restitué entre 60 et 70Ah.

Il a été observé sur véhicules que la décharge en une heure ou moins se traduit par :

- Une énergie restituée réduite.
- Une chute de la durée de vie.
- Un coût d'usage qui correspond principalement au coût d'usure de la batterie qui est non compétitif. Il est trois fois supérieur à celui d'un véhicule thermique [4].

Les technologies aqueuses Plomb acide, NiCd, NimH ne sont pas adaptées pour les véhicules électriques.

En lieu et place, l'utilisation des chimies Lithium-ion permet de réaliser des packs batterie à très faible autodécharge, à bon rendement, même en charge rapide et délivrant l'énergie spécifiée.

Si les performances en énergies stockées des batteries croissent bien moins vite que la loi de Moore qui a régit la croissance de la densité d'intégration des transistors sur le silicium, la croissance en énergie massique est quand même de 6% par an.

D'autre part, la chute des coûts est beaucoup plus rapide que prévue.

Les batteries Lithium sont adaptées pour les véhicules électriques et hybrides rechargeables :

- Avec la même masse, elles offrent deux à trois fois plus d'énergie utile que les batteries traditionnelles.
- Les charges et décharges peuvent se faire dans des temps inférieurs à l'heure sans pertes importantes ni impact significatif sur la durée de vie.
- La batterie a un bon rendement énergétique de 90% à 95% selon les régimes de charge et décharge
- La détection de fin de charge et les jauges d'autonomies sont fiables et précises.

La seule contrainte importante est la limitation de la gamme en température, surtout pour la charge qui peut amener à faire du conditionnement en température pour certaines utilisations.

Le véhicule électrique est souvent considéré comme un véhicule urbain ou périurbain. En fait, les véhicules électriques sont particulièrement performants quand on se limite à 90-100 km/h. Outre les trajets urbains, les trajets routiers s'effectuent avec les très bons rendements des batteries et des chaînes de traction. On observe alors que la consommation chute d'environ 20% quand on passe de 90 km/ à 80 km/h, ce qui augmente l'autonomie d'autant.

Ce changement de consommation avec cet écart de vitesse n'est pas visible avec les véhicules thermiques, car pour ces vitesses les besoins en puissance sont faible 10 ou 15 kW et les moteurs thermiques qui sont dimensionnés pour fournir la puissance pour les accélérations (70-100 kW par exemple) sont alors dans des zones de faibles rendements, avec un fort niveau de pertes fixes.

Les consommations des véhicules électriques sur routes sont de l'ordre de 10 kW.h / 100km par tonne (à température ambiante et pour la traction uniquement).

Par contre, le véhicule électrique est peu pertinent sur autoroute où la consommation croît fortement (comme le carré de la vitesse pour la partie aérodynamique) et il est très vite limité par sa très faible énergie stockée, comparée à celle d'un véhicule thermique.

Du fait des caractéristiques couple vitesse des moteurs électriques, les voitures n'ont ni boîte à vitesse ni embrayage. Il y a seulement une réduction entre le moteur et le différentiel. Les

différentes technologies moteurs sont utilisées : asynchrone, synchrone à aimant, synchrone à excitation séparée.

Deux voitures électriques méritent d'être citées plus particulièrement.

La TESLA [5], véhicule emblématique américain, utilise presque 10 000 accumulateurs standards en format 18650, dont elle consomme plus de 10% de la production mondiale. Ce véhicule a une autonomie de 500 km, mais ceci à la vitesse contenue (90-100 km/h) qu'oblige la législation américaine (60mph).



Fig.7 Pack batterie de véhicule TESLA intégré dans le plancher [5]

Les véhicules TESLA ne sont pas des véhicules thermiques électrifiés. Le véhicule est pensé électrique et est construit autour du pack batterie qui constitue le plancher du véhicule.

Aujourd'hui, deux stratégies coexistent, celle de TESLA qui est de faire avec les meilleurs accumulateurs d'aujourd'hui produits en très grande quantité à haut niveau de qualité et de les intégrer, l'autre approche comme celle de Renault ou BMW et d'autres grands constructeurs qui consiste à utiliser des accumulateurs de format spécifique, de plus grande taille, qui devraient être moins cher par grande quantité. Par contre, ils nécessitent un décollage des ventes de véhicules électriques pour atteindre ces quantités.



Fig.8 Renault ZOE

Le second véhicule que l'on peut citer est la ZOE de Renault. En effet, au niveau électronique de puissance, il est à noter que la ZOE a un chargeur embarqué de forte puissance (44kW initialement et 22 kW actuellement) actuellement qui réutilise l'onduleur moteur et les bobinages moteur. Ceci permet de minimiser les coûts d'infrastructure de charge rapide, quand cette infrastructure est souhaitée, puisque des prises de fortes puissances sécurisées suffisent (en 400V AC triphasé). Il n'est pas besoin de chargeur régulés qui rechargent directement la batterie en courant continu comme classiquement.

Aujourd'hui, le panorama des véhicules électriques et hybrides est large chez les différents constructeurs, ce qui montre un premier niveau de maturité [6].

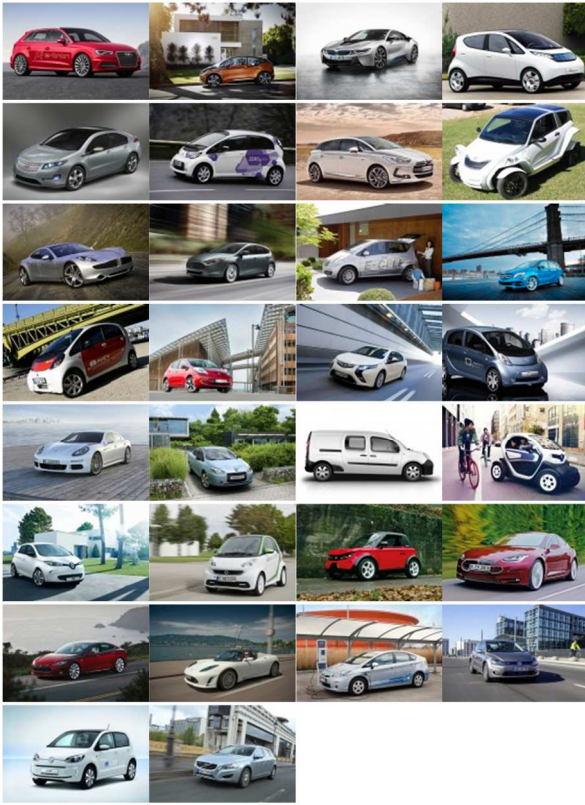


Figure 1: Electric or plug-in vehicles: Audi, BMW, Bolloré, Chevrolet, Citroën, Courb, Fisker, Ford, Mercedes, Mitsubishi, Nissan, Opel, Peugeot, Porsche, Renault, Smart, Tazzari, Tesla, Toyota, Volkswagen, Volvo

Fig.9 Véhicules électriques et hybrides rechargeables.

4. CONCLUSIONS

Dans le domaine du génie électrique, le stockage de l'énergie électrique est une fonction très difficile, à forte contraintes techniques (masse, volume), et à coûts d'achat et d'usage élevés.

Les accumulateurs Lithium-ion se distinguent des autres technologies classiques qui sont aqueuses par une quasi-absence de réactions chimiques parasites, par une très faible autodécharge, de très bons rendements et la possibilité de charges et décharges rapides.

Une électronique de gestion des fins de charge et de décharge, est indispensable. Il faut aussi assurer l'équilibrage, mais l'énergie à traiter est négligeable par rapport à celle stockée dans la batterie. Les fonctions de détections de fin de charges et les jauges sont plus simples.

Le point faible principal des accumulateurs Lithium aujourd'hui est la gamme de température restreinte et en particulier la charge en température négative. Un conditionnement en température peut être nécessaire selon les applications et environnements.

Les technologies NiCd et NimH était trop peu performantes en énergies massiques et volumiques réellement délivrées en roulage pour les besoins des véhicules électriques. Du fait des faibles durées de vie, les coûts d'usage devenaient alors prohibitifs.

Le Lithium-ion permet d'offrir aujourd'hui des véhicules électriques ayant un niveau d'autonomie suffisant pour certains utilisateurs. Les coûts d'achat et d'usage sont en décroissance régulière, particulièrement pour un usage intensif du véhicule

qui raccourci le temps d'amortissement. Cinq ans d'avances sur les prévisions de baisse des coûts sont observés.

Les accumulateurs progressent depuis deux décennies de 6% par an en énergie massique et des gains d'autonomie de 50% sont en préparation pour les prochains véhicules. Le véhicule électrique a une faible autonomie sur autoroute à haute vitesse, par contre il est très pertinent sur toutes les autres routes. Sur ces trajets, la batterie et la chaîne de traction électrique sont optimales en rendement, alors que les rendements des véhicules thermiques sont faibles.

Les progrès techniques des accumulateurs Lithium-ion associé à la baisse des coûts permet de passer des seuils techniques ou technico-économiques qui autorisent des mutations. Ainsi, tout l'outillage électroportatif à commuté en Lithium, la voiture électrique et les hybrides rechargeables deviennent une réalité. D'autres mutations peuvent devenir possibles dans un futur assez proche : véhicules électriques en soutien et stockage domestique (V2H), en soutien et stockage réseau (V2G) au fur et à mesure de la baisse du coût d'usage de la fonction stockage d'électricité.

5. REFERENCES

- [1] D. Chatroux, « Electrochemical battery managements and applications », Power Conversion and Intelligent Motion Europe, Nüremberg, 2015.
- [2] D. Chatroux, "Toyota PRIUS: battery in microcycle mode: the cost of use is divided by five", PCIM 2009
- [3] V. Schwarz, B. Gindroz, "Le stockage électrochimique" Mines Energies Dossier stockage de l'Énergie Janvier-Février 2005
- [4] D. Chatroux, « Performances of batteries technologies in vehicle applications », Power Conversion and Intelligent Motion Europe, Nüremberg, 2013.
- [5] <http://www.technologyreview.com/news/516961/how-tesla-is-driving-electric-car-innovation/>
- [6] <http://www.automobile-propre.com/voitures/>