

# Les batteries destinées aux véhicules hybrides et tout-électriques

Par Philippe AZAIS  
Thierry PRIEM  
et Florence LAMBERT  
Université Grenoble Alpes, CEA LITEN

Le monde des batteries, en particulier Li-ion, est en pleine mutation en raison de la croissance des demandes liée à l'électrification des véhicules. De nombreux acteurs industriels se sont d'ores et déjà positionnés comme les leaders dans ce domaine, principalement en Asie (Chine, Japon, Corée). L'Europe, en retard jusqu'à présent pour la production de batteries, commence à mettre en place des programmes ambitieux pour contrecarrer les monopoles asiatiques. Néanmoins, de nombreux défis technologiques et économiques demeurent afin de pérenniser durablement la filière des batteries destinées aux véhicules électriques. Parmi ceux-ci, on peut citer la problématique de la seconde vie des batteries après leur usage pour la mobilité, ou les défis que pose le développement des solutions « post-Li-ion » afin d'augmenter les performances, de réduire les coûts de production et de s'affranchir de la dépendance vis-à-vis de matériaux critiques.

## Le marché des batteries : un monde en forte évolution

Le marché des batteries servant au stockage de l'énergie électrique est en plein essor. Si la batterie au plomb pour l'automobile reste la technologie dominante en volume (80 % du marché exprimé en GWh), les batteries Li-ion représentent déjà près de 40 % du marché en valeur (soit un chiffre d'affaires de 25 milliards de dollars (Mds \$US) en 2016) et 18 % en volume <sup>(1)</sup>. Leur croissance (> 50 %, voir la Figure 1 de la page suivante) est tirée par le marché de l'électrification des véhicules, qui est en forte progression en Chine, en Europe et aux États-Unis, pour les véhicules hybrides rechargeables (PHEV <sup>(2)</sup>) comme pour les véhicules « tout-électriques » (BEV <sup>(3)</sup>). Cette évolution de la demande nécessite l'implication de nombreux métiers gravitant autour de la fabrication des accumulateurs, tels que ceux de l'électronique, de l'électrotechnique, de la thermique et de la mécanique. Tous ont pour but d'accroître la durée de vie et la densité d'énergie à l'échelle des systèmes, tout en garantissant une sécurité accrue.

La densité d'énergie maximale des accumulateurs Li-ion (265 Wh/kg et 730 Wh/L) est atteinte pour des formats cylindriques de taille modeste (< 20 Wh <sup>(4)</sup>). Ces valeurs, dans ce format, stagnent depuis plusieurs années. Dans

le même temps, des progrès sont obtenus dans les autres formats (pochettes ou « *pouch cells* », « laminate » et prismatiques rigides) affichant des niveaux d'énergie plus élevés (> 200 Wh), qui tendent à rattraper les performances des accumulateurs cylindriques (voir la Figure 2 de la page suivante). À ce jour, les trois types de format, chacun avec ses avantages et ses inconvénients, sont utilisés et intégrés dans des packs destinés aux véhicules électriques, avec des performances approchantes <sup>(5)</sup>.

Suivant leur fonction et leur utilisation, depuis le système de démarrage de moteurs thermiques à l'électrification complète, en passant par tous les niveaux d'hybridation, les batteries destinées à l'électrification des véhicules sont de différents types (voir le Tableau 1 de la page 33). Les besoins en densité d'énergie, en densité de puissance et en durée de vie étant différents, des chimies dédiées à chaque typologie sont développées.

(1) Christophe Pillot, *Avicenne, Batteries 2017*, Nice, France.

(2) PHEV : Plug-in Hybrid Electric Vehicle.

(3) BEV : Battery Electric Vehicle.

(4) Exemples : accumulateurs Samsung INR18650-35E, Panasonic 18650GA, LG 18650 M36, Sony US18659VC7.

(5) Exemples : pack Tesla Model S (171 Wh/L ; 132 Wh/kg), pack Renault Zoe 2 (171 Wh/L ; 134 Wh/kg).

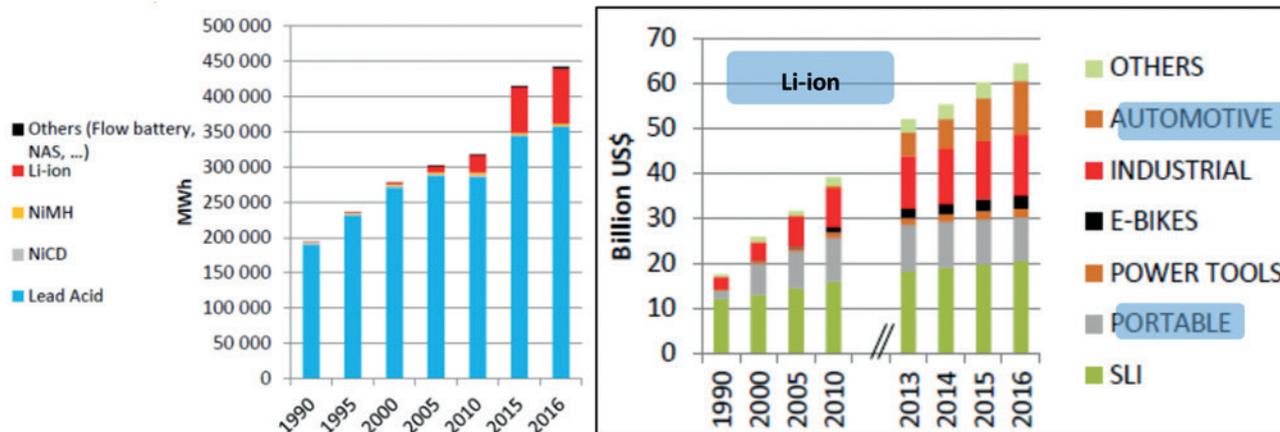


Figure 1 : Évolution du marché des batteries.  
Source : Avicenne1.

Les fabricants d'accumulateurs Li-ion restent très majoritairement asiatiques (près de 99 % de parts de marché, avec en tête la Chine, puis la Corée du Sud et le Japon<sup>(6)</sup>). Le marché des accumulateurs, comme celui des matériaux de batterie, s'appuie sur des procédés matures et vise, en premier lieu, la diminution des coûts par l'accroissement des volumes et l'intégration verticale des activités nécessaires à la fabrication des systèmes : une compétition féroce règne entre les fabricants d'accumulateurs, qui maîtrisent le cœur de la technologie, et les constructeurs automobiles qui cherchent à limiter les coûts de fabrication des systèmes qu'ils produisent

ou qu'ils intègrent. Les capacités de fabrication croissent rapidement sur des modèles existants et éprouvés, ne laissant que peu de place aux changements de technologie. Une cible de 130 €/kWh est considérée comme atteignable en 2025, à l'échelle du système à destination des BEV<sup>(7)</sup>. Il convient cependant de noter que ce coût, du fait d'effets de volume, deviendra de plus en plus dépendant

(6) WOLFGANG Bernhard, "Electromobility, Regulations, Vehicles, and Markets", World Mobility Summit, 20 octobre 2016.  
(7) CURRY Claire, Bloomberg New Energy Finance, "Lithium-ion Battery Costs and Markets", 4 juillet 2017.

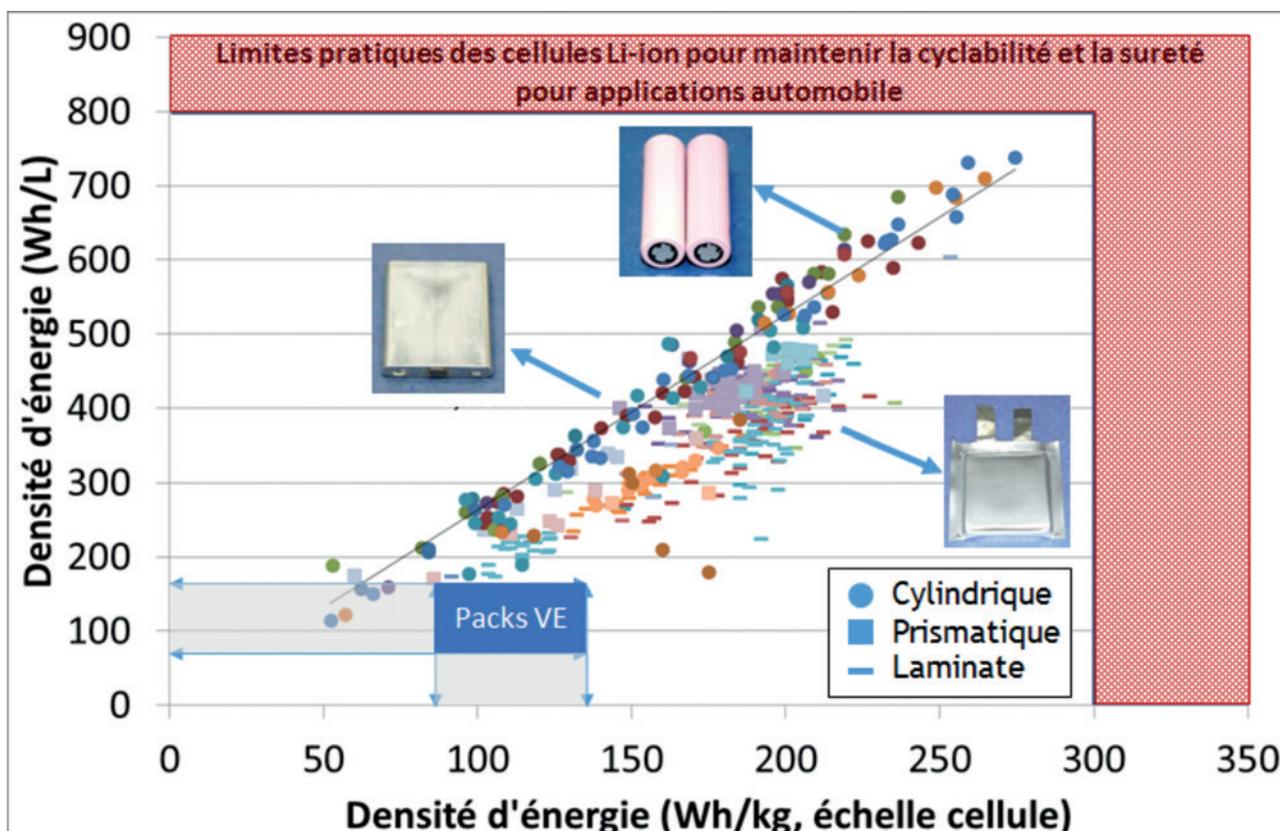


Figure 2 : Les densités d'énergie (massique et volumique) de cellules Li-ion en fonction des formats actuels.  
Source : CEA.

Type d'hybridation	Substitut Pb	Micro	Mild	Full	PHEV	BEV
Fonctions	Démarrage moteur	S & S Équilibrage de réseau	S & S REF Boost Downsizing Micro ZEV	S & S REF Boost Downsizing Faible ZEV	S & S, REF Boost Downsizing ZEV étendu	100 % ZEV
Tension	12 V	12 V	48 V	< 300 V	< 400 V	de 300 à 600 V
Puissance	< 5kW	< 5kW	10 à 30 kW	de 40 à 165 kW	> 50kW	> 50kW
Énergie utilisée/cycle	< 2 Wh	< 5 Wh	de 0,3 à 1,3 kWh	< 400 Wh	de 5 à 20 kWh	> 10 kWh
Énergie installée	< 1,5kWh	< 2k Wh	de 1 à 3 kWh	< 2 kWh	de 6 à 18 kWh	>12k Wh
Réduction de CO <sub>2</sub>	0 %	< 8 %	< 15 %	< 20 %	> 35 %	ZEV

Tableau 1 : Caractéristiques des applications automobiles pour différents taux d'hybridation.  
Note : REF : récupération d'énergie au freinage ; S & S : start & stop ; ZEV : Zero Emission Vehicle.

du prix des matières premières, et donc de leurs fluctuations (ce qui est déjà le cas aujourd'hui pour le matériau le plus critique, le cobalt, dont le prix est en forte augmentation depuis près d'un an<sup>(8)</sup>).

Le cas emblématique de la Chine mérite que l'on s'y attarde. Les capacités de production de systèmes accumulateurs y croissent fortement, avec l'aide des subventions d'État. Parmi les investissements majeurs, on peut citer ceux de CATL, BYD et Lishen (> 1 Md \$US chacun, d'ici à 2020<sup>(9)</sup>) pour l'électrification des véhicules particuliers et des bus afin de répondre à deux enjeux chinois majeurs : dépolluer les centres villes par l'électrification de la mobilité et réduire la dépendance du pays vis-à-vis des importations de produits pétroliers. En complément, la Chine subventionne largement l'achat de véhicules électrifiés, entraînant ainsi l'émergence de nombreux acteurs dans le domaine tant pour les véhicules particuliers que pour les bus (25 000 bus électriques chinois construits en 2014, 110 000 en 2015 et 130 000 en 2016).

Les acteurs majeurs coréens (Samsung, LG Chem et SK Innovation) visent, quant à eux, les marchés mondiaux en tentant de dupliquer leurs usines à travers le monde (aux États-Unis, en Chine et en Europe). Les acteurs japonais suivent la même logique. Ainsi, Panasonic s'implante sur le sol américain grâce à l'alliance conclue avec Tesla Motors et vise, à terme, une production de 35 GWh de packs batteries par an dans sa « Gigafactory ». La division batteries de Sony, acteur historique du lithium-ion à destination de l'électronique grand public, a été vendue en octobre 2016 à un acteur japonais majeur de l'électronique, Murata.

L'Europe réagit également à cette évolution du marché des batteries. Pour éviter de fragiliser l'industrie automobile par une trop forte dépendance vis-à-vis des leaders asiatiques, les industriels allemands se structurent pour pouvoir se doter de moyens importants de fabrication de

batteries et ainsi contrecarrer l'implantation des leaders coréens en Pologne et en Hongrie. En France, Total a racheté en août 2016, pour près d'un milliard d'euros, la seule société française importante du secteur, SAFT.

### De nouveaux défis technologiques à relever...

#### Des défis technologiques liés à la seconde vie des batteries et à leur recyclage

La plupart des batteries dédiées à la mobilité sont encore dans une phase de vie dite de « premier usage » : la question de leur recyclage à grande échelle n'est pas encore d'actualité, mais elle le deviendra dans les prochaines années. Les filières de démantèlement et de recyclage existent, elles sont réparties à l'échelle locale. Leur coût pourrait toutefois s'avérer plus élevé que prévu en l'absence de format standard des packs Li-ion. En effet, contrairement aux batteries au plomb (recyclée à près de 98 %), les packs Li-Ion s'avèrent être très variés et dépendants des choix faits par chaque constructeur ou intégrateur pour répondre aux contraintes volumique et massique de leur intégration pour la mobilité. En outre, *a contrario* des batteries au plomb, la technologie Li-ion met en œuvre de nombreux couples électrochimiques qui nécessitent autant de procédés de recyclage. Notons également que le coût énergétique de leur démantèlement est élevé, à l'image de la complexification croissante des systèmes de stockage à base d'accumulateurs. Enfin, les matériaux offrant une valeur de récupération sont essentiellement le cobalt, le nickel et le cuivre<sup>(10)</sup> et, dans une

(8) Cotation au London Metal Exchange, [www.lme.com/Metals/Minor-metals/Cobalt](http://www.lme.com/Metals/Minor-metals/Cobalt)

(9) Édition du South China Morning Post du 1<sup>er</sup> février 2018.

(10) Commission européenne, staff working document, "Report on Critical Raw Materials and the Circular Economy", SWD (2018) 36 final, Part 3/3, 18 janvier 2018.

moindre mesure, l'aluminium, qui est aisément récupéré, mais sans réelle valeur ajoutée. Le lithium, peu présent en masse (< 3 % en masse dans un accumulateur, < 1 % à l'échelle du système complet), est difficilement valorisable compte tenu de son coût encore relativement bas. Il en est de même pour les matériaux carbonés, les polymères, les électrolytes (dont le fluor)...

L'augmentation rapide des volumes des véhicules électrifiés produits entraîne un surcoût colossal que doivent prendre en charge les États *via* les incitations à l'achat (5 Mds \$US en 2015 pour la Chine et près de 800 M€ pour la France et l'Allemagne, en 2016). Cette situation n'est pas viable (ainsi, la Norvège présente un taux de pénétration des BEV qui a été supérieur à 17 % en 2017) : à moyen terme, il est donc envisagé de réduire, voire de supprimer ces incitations. Les solutions de mobilité électrifiée doivent donc devenir économiquement viables sans faire appel à ces incitations, tout en faisant face à une tension certainement plus importante sur le marché des métaux (cobalt, nickel, cuivre et, dans une moindre mesure, lithium, aluminium, carbone). La Chine anticipe la maîtrise des coûts par une maîtrise de la ressource minière depuis près de 10 ans, en s'imposant comme investisseur dans le domaine minier (carbone, lithium et cobalt, notamment) : la Chine, premier exportateur de carbone pour batterie Li-ion, a investi pour maîtriser ses ressources en lithium<sup>(11)</sup>, en cobalt<sup>(12)</sup> et en cuivre. Avec l'émergence des batteries, une dépendance vis-à-vis des métaux vient s'ajouter à la dépendance au pétrole : il s'agit d'autres acteurs, mais d'acteurs tout aussi puissants. On pourra également noter que le Japon et la Corée du Sud ne sont pas des producteurs de matières minières : effectivement, ces deux pays sont totalement dépendants de leurs importations dans ce domaine, ce qui les incite à diversifier leurs localisations pour s'assurer de la ressource. C'est le cas de tous les acteurs majeurs du domaine qui se sont installés progressivement en Chine, *via* des accords locaux.

### Les technologies Post-Li-ion

La densité d'énergie maximale des accumulateurs est stable depuis plusieurs années : elle dépend de leur sécurité, de leur durée de vie et de leur coût. Son accroissement est encore possible, mais il reste lié à leur amélioration continue : on estime que les densités d'énergie maximales réalistes seront de l'ordre de 280 à 300 Wh/kg et de 800 Wh/L, avec les matériaux les plus performants (voir la Figure 2 de la page 32).

Compte tenu de ces perspectives, les acteurs académiques et industriels travaillent sur des technologies en rupture partielle, voire totale pour accroître les performances : ces technologies sont dites « post lithium-ion » et suivent deux axes exploratoires : l'accroissement de la densité d'énergie et la réduction des coûts à long terme en ouvrant le *scope* à des matériaux pérennes. Deux stratégies sont mises en œuvre :

- d'une part, celle du lithium-ion « tout solide »,
- et, d'autre part, les technologies en rupture avec le lithium-ion (métal-soufre, métal-air, métal-ion, batteries organiques).

Si l'accroissement de la densité d'énergie et la diminution des coûts associés constituent l'objectif majeur pour les applications BEV, de nombreux développements sont en cours pour améliorer les performances des batteries dédiées aux véhicules hybrides (PHEV, *mild-hybrid*, HEV et substitution de la batterie au plomb). L'objectif de ces hybridations est de répondre au mieux aux contraintes environnementales et de réduire les émissions de CO<sub>2</sub>, sans pour autant modifier les usages de l'automobile. La réponse aux cahiers des charges de ces systèmes de stockage passe généralement par une très forte cyclabilité, une densité de puissance élevée, un fonctionnement sur une plage importante de températures et, surtout, un coût toujours plus faible. La densité d'énergie n'est pas le critère de choix numéro 1, l'intégration de ces systèmes étant plus aisée que celle d'un pack destiné aux BEV.

### ... mais aussi de nouveaux défis commerciaux

Comme nous l'avons précisé précédemment, le défi principal associé à la commercialisation des batteries à grande échelle est leur coût. Les études montrent que le BEV, avec son autonomie actuelle, peut remplir plus de 90 % des usages quotidiens. Aussi le BEV est-il aujourd'hui souvent vu comme un second véhicule, ce qui peut en limiter la commercialisation. Pour remplir les 10 % restants, la piste explorée est l'accroissement de l'autonomie (qui est très loin d'être suffisante pour répondre aux usages du type « départ en vacances ») et la vitesse de charge. Ces deux aspects impliquent un surcoût à l'achat (et une surconsommation de la ressource minière) et un surcoût supplémentaire des infrastructures pour permettre des recharges plus rapides (difficilement assimilables par les consommateurs et les États, si ces infrastructures devaient être dupliquées à grande échelle, avec un impact non négligeable sur les réseaux électriques et la durabilité des batteries).

Une forte hybridation des véhicules (PHEV) est l'autre piste soutenue par les constructeurs automobiles, dont la Chine et l'Allemagne sont les leaders. Cette solution permet, avec un même véhicule, de contenter l'ensemble des usages. Néanmoins, ces véhicules sont aujourd'hui plutôt orientés sur le haut de gamme (ils sont donc chers). Le défi commercial futur est de parvenir à développer des véhicules de moyenne gamme (voire de bas de gamme) avec cette technologie et pour un coût raisonnable (typiquement < 15 000 €). Cette solution émerge plus vite que la solution du « tout-électrique ».

Des usages complémentaires sont également fortement étudiés pour faire face à une forte émergence des productions intermittentes d'électricité (photovoltaïque

(11) La Chine a investi pour développer le marché domestique, soit près de 40 % des besoins en lithium. Tianqi (CN) a investi en septembre 2016 dans la société chilienne SQM, l'un des trois plus gros acteurs historiques de l'extraction de lithium.

(12) China Molybdenum Co a investi 2,65 mds \$US en juin 2017 dans la société Freeport McMoRan Inc., en République démocratique du Congo, ce pays produisant plus de 50 % du cobalt mondial.

et éolienne). Deux solutions sont fortement poussées : le V2G (*Vehicle to Grid*) et le V2H (*Vehicle to Home*). L'idée (principale est de profiter des batteries présentes dans les véhicules BEV ou PHEV (qui passent 95 % de leur temps au parking) pour rendre des services complémentaires au réseau électrique, soit à la maison, soit de manière plus globale. Le modèle économique correspondant est très discuté du fait qu'il est fortement dépendant des infrastructures existantes.

La durée de vie des batteries est bien supérieure au nombre des kilomètres qui seront réellement parcourus par le véhicule au cours de sa vie. Aussi les constructeurs automobiles et les recycleurs envisagent-ils clairement de donner une seconde vie à ces batteries hors du véhicule, dans des applications V2G et V2H. L'équilibre économique n'est pas aujourd'hui au rendez-vous en raison d'un prix actuel des batteries en constante décroissance : le coût d'une batterie à l'issue de sa première vie (typiquement, entre 7 et 10 ans) doit être marginal pour être concurrentiel vis-à-vis d'une batterie neuve, donc fabriquée 7 à 10 ans plus tard. Le modèle économique correspondant ne pour-

ra donc devenir viable qu'à une double condition : que le prix des batteries soit relativement stable et que la durée de leur seconde vie soit conséquente.

Enfin, si l'électrification des véhicules est une voie pertinente pour dépolluer l'usage, la génération de l'électricité au moyen de combustibles fossiles risque de ternir complètement le bilan carbone dans l'ensemble de la durée de vie des batteries (de l'extraction des ressources jusqu'à leur recyclage). Cette question n'est donc pas à éluder et les solutions futures devront être pérennes et prendre en considération l'ensemble de la chaîne de la valeur (extraction minière, usage et recharge, seconde vie et recyclage).

## **Conclusion**

Les développements techniques des accumulateurs destinés aux véhicules hybrides ou tout-électriques réalisés par les entreprises et les organismes de recherche doivent donc se faire désormais de manière concomitante, tout en prenant en considération les nouveaux cadres évoqués dans cet article.