

Le lithium : un métal stratégique

Les deux principaux relais de croissance du marché du lithium à moyen terme seront les batteries des systèmes embarqués et les batteries de véhicules électriques. La presse annonce même l'avènement d'un futur « Moyen-Orient du lithium », dans la région de l'Altiplano andin située entre la Bolivie, l'Argentine et le Chili.

par Antoine GOUZE*

Le lithium est un métal mou, blanc argenté. C'est le plus léger de tous les éléments chimiques solides à la température ambiante (il est deux fois moins dense que l'eau). C'est aussi le solide ayant la plus grande chaleur massique. En solution, on le trouve sous forme d'ion Li^+ . Son grand potentiel électrochimique et sa densité énergétique élevée lui confèrent des propriétés uniques permettant de stocker et de transporter des charges électriques importantes dans des systèmes embarqués.

Les constructeurs automobiles s'intéressent de près à ce métal, car il pourrait constituer un élément stratégique dans la fabrication des véhicules électriques. La presse annonce même l'avènement d'un futur « Moyen-Orient du lithium », dans la région de l'Altiplano andin située entre la Bolivie, l'Argentine et le Chili.

En tant que composant de batteries à haute densité énergétique, le lithium est susceptible d'apporter un élément de réponse, dans la lutte contre le réchauffement climatique. A ce sujet, l'industrie automobile se montre très optimiste. Des incertitudes demeurent, néanmoins, et l'Eldorado annoncé pourrait, hélas, ne rester qu'une illusion.

Le marché actuel du lithium

La demande

En 2008, la consommation apparente de lithium (exprimée en métal lithium contenu) a été estimée à 22 000 tonnes.

Le lithium est utilisé dans de nombreuses applications industrielles : verres et céramiques, produits de graissage, pharmacie, coulée continue, fusion de l'aluminium, piles et batteries rechargeables... Ces applications sont très diverses (cf. la figure 1).

De 6 %/an en moyenne depuis 2000, la croissance régulière du marché du lithium, a été assez soutenue, et s'est décomposée en trois phases :

- + 3,5 % de 2000 à 2003,
- + 8,4 % de 2004 à 2007,
- + 3,8 % en 2008.

Les batteries au lithium ont commencé à remplacer les piles nickel-cadmium (NiCd) et nickel-hydrure métallique

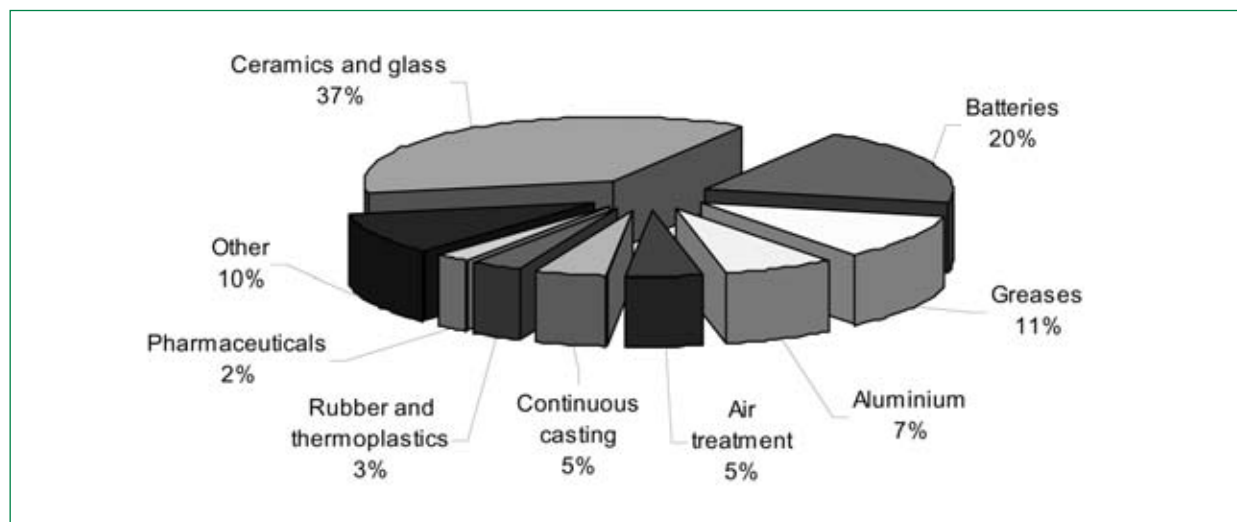


Figure 1 : Consommations de lithium par utilisation finale, 2008.

Source : Roskill - The economics of Lithium 2009.

(Ni-MH) dans les années 2000. Le marché de l'énergie portable pour les appareils photographiques, les téléphones mobiles et les ordinateurs portables représente environ 20 % de la demande.

En 2009, la demande a chuté brutalement, du fait de la crise économique et de la chute généralisée de la production industrielle. Il est à noter que jusqu'en 2020, la demande en lithium liée à l'automobile sera vraisemblablement quasi nulle, les véhicules hybrides actuels utilisant des batteries Ni-MH.

Le prix du lithium sur le marché

L'unité servant de référence est l'équivalent carbonate de lithium (LCE), qui est la forme la plus commercialisée du lithium. 5,23 tonnes de carbonate de lithium équivalent (LCE) contiennent 1 tonne de lithium métallique.

Le prix du LCE a connu une courbe « en U », affectée d'un décrochement ces derniers mois. Les phases de son évolution sont les suivantes :

- ✓ un palier à 3 000 \$/tonne, entre 1990 et 1996,
- ✓ une descente jusqu'à 1 500 \$/t, de 1997 à 1998,
- ✓ un plateau à hauteur de 1 500 \$/t, de 1999 à 2004,
- ✓ une remontée, progressive, jusqu'à 6 000 \$/tonne, de 2005 à la mi-2009,
- ✓ une réduction de 20 % au cours des derniers mois, 4 500 \$/tonne en janvier 2010 (cf. les figures 2 et 3).

Offres : les ressources minières et la production du lithium

Les ressources minières

On trouve le lithium principalement sous deux formes :

- ✓ une forme dissoute, dans les aquifères de certains déserts de sel (Chine, Amérique Latine, Etats-Unis),

- ✓ une forme solide de mica à spodumène (cf. le tableau 1).

Suivant les sources, les estimations des ressources divergent. Elles atteignent 11,5 millions de tonnes de lithium, d'après *The United States Geological Survey* (USGS) (les services d'information Roskill et le *National Resources Council Report* les évaluent, quant à eux, à 28 millions de tonnes). Selon ces estimations, les ressources saumurales représenteraient entre 60 % et 80 % des ressources totales et le Salar d'Uyuni, en Bolivie, en représenterait à lui seul entre 20 % et 50 %. Certaines estimations récentes évaluent les ressources à plus de 35 millions de tonnes de lithium.

Comment expliquer cette divergence entre ces estimations ?

L'intérêt pour le lithium est récent et il existe de nombreuses incertitudes, ainsi que plusieurs possibilités de présence de lithium dans différents milieux.

La découverte des principaux gisements date des années 1970. Pour la plupart de ces gisements, le code JORC (*Joint Ore Reserve Code*) n'est pas appliqué. La méthodologie d'exploration de ces gisements s'apparente, d'ailleurs, davantage à celle des réservoirs de pétrole qu'à celle d'un gisement de minerai.

Ainsi, à Uyuni, par exemple, des travaux d'exploration menés dans les années 1980 par l'Orstom (Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer), devenu aujourd'hui l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement) ont eu pour principal objet la découverte de lithium. La porosité de la croûte saline lithifère n'a pas été mesurée de façon précise. La majeure partie des investigations a porté sur la première couche de sel, d'une épaisseur de 10 mètres. Deux forages profonds et des essais géophysiques ont depuis démontré que de nombreuses couches

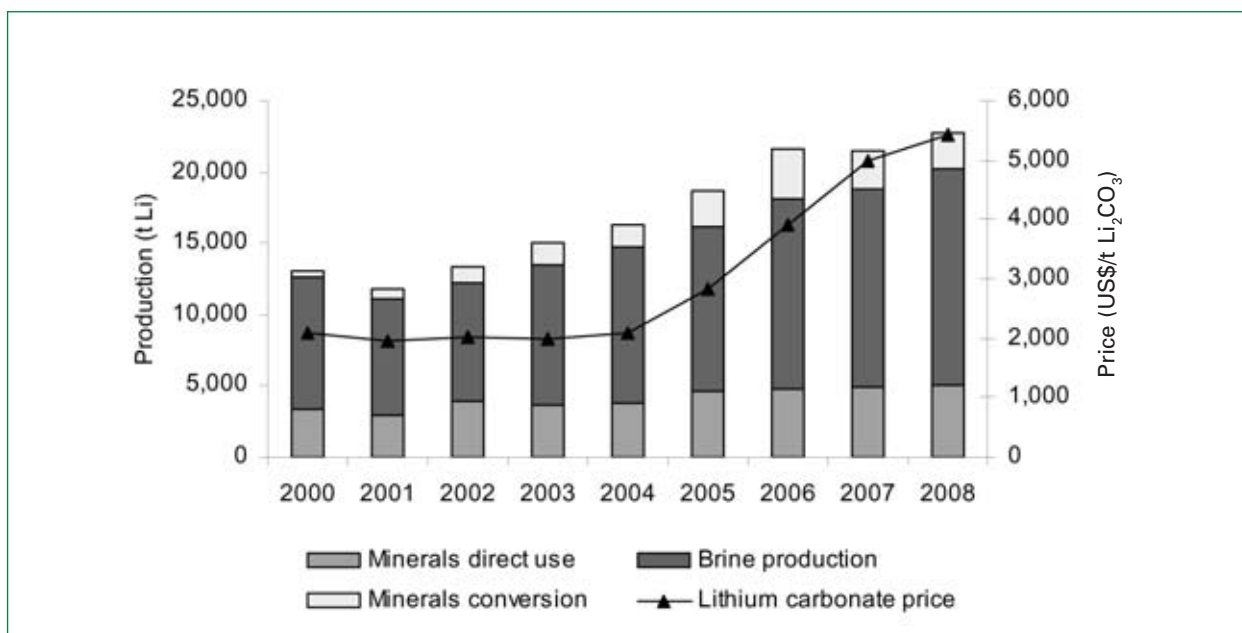


Figure 2 : Production et prix du lithium, 2000-2008.

Source : Roskill - The economics of Lithium 2009.

Note : Lithium carbonate price reflects average value of lithium carbonate exported from Argentina, Chile and China.

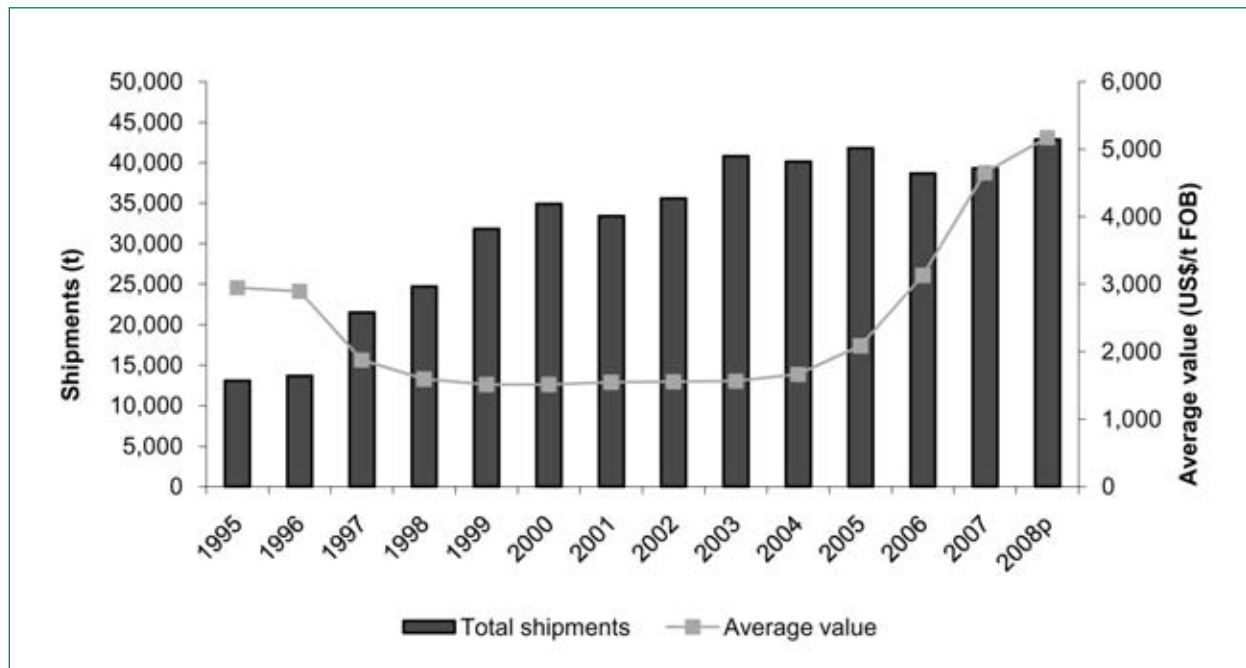


Figure 3 : Chargements maritimes de carbonate de lithium au Chili, 1995-2008.

Source : Roskill – The economics of Lithium 2009.

Note : p = projected 2008 shipments and average values based on January to August 2008 exports.

	USGS		Roskill Reserves	Garrett Reserves	NRC Reserves & Resources
	Reserves	Reserve base			
Argentina	...	...	6,000	800	2,710
Australia	160	260	190	150	263
Austria	...	...	113	10	100
Bolivia	-	5,400	5,500	5,000	5,500
Brazil	190	910	50	3	85
Canada	180	360	151	240	256
Chile	3,000	3,000	6,800	3,000	6,900
China	540	1,100	5,400	2,500	3,350
DRC	...	...	...	309	2,300
Finland	...	...	13	...	14
Ireland	...	...	61	...	...
Israel	...	...	2,500 ¹	2,000	...
Mali	...	...	...	26	...
Namibia	...	...	...	10	...
Portugal	...	...	10	10	...
Russia	...	...	81	130	1,000
Serbia	...	...	957 ¹	850	...
Spain	...	...	72	...	...
USA	38	410	...	2,703	5,936
Zimbabwe	23	27	...	23	57
Total (rounded)	4,131	11,467	27,843	17,764	28,471

Tableau 1 : Réserves de lithium par pays (en milliers de tonnes de lithium métal).

Source : USGS – Mineral Commodity Summaries, 2008; Roskill – Section 4; Garrett, 2004 – Handbook of Lithium and Natural Calcium Chloride (reserves from various sources); National Research Council (NRC) – 1985.

Notes : 1 – Resources.

poreuses de sel et de sédiments sont imprégnées de saumure lithifère.

Les ressources chinoises sont méconnues et leur évaluation est encore très approximative ; elles pourraient constituer des ressources bien plus importantes que celles de la Bolivie. Le *National Resource Council* les estime supérieures à celles de la Bolivie (respectivement 24 % et 19 % des réserves mondiales).

La présence de lithium dans des saumures géothermales (en Amérique du Nord) ne sont pas comptabilisées ; elles pourraient néanmoins constituer des ressources équivalant à 20 millions de tonnes de lithium supplémentaires.

La production

Au milieu des années 1990, l'offre de lithium a été profondément restructurée. La production de lithium à partir de saumures a supplanté quasi totalement l'extraction de lithium à partir de spodumène.

Aujourd'hui, 75 % de la production mondiale provient de deux salars de la Cordillère des Andes : celui d'Atacama (au Chili) et celui d'Hombre Muerto (en Argentine). Les 25 % restants se répartissent essentiellement entre la production chinoise (à partir de saumures) et la production à partir de spodumène (en Australie).

Les procédés d'extraction à partir de saumure

A Atacama, la saumure lithifère est concentrée par évaporation naturelle, grâce à des conditions climatiques exceptionnelles : air sec, vents violents et radiation solaire intense (le taux d'évaporation naturelle est supérieur à 99,5 % !).

Le lithium est ensuite précipité sous forme de carbonate. Si la composition de la saumure est plus complexe, ou si les conditions climatiques sont moins favorables, un procédé physico-chimique de séparation complète l'évaporation solaire. Ainsi, par exemple, un procédé d'adsorption est utilisé en Argentine, dans le salar d'Hombre Muerto.

Le procédé d'extraction du lithium à partir de spodumène

Le spodumène est calciné, dissous en milieu acide, puis précipité sous forme de carbonate. Le lithium produit selon ce procédé (essentiellement utilisé en Australie) représente moins de 20 % du marché. Certaines applications industrielles du lithium, dans les secteurs de la céramique et du verre, ne peuvent utiliser que des formes minérales du lithium (car elles nécessitent une certaine teneur en silice) : dans de tels cas, le procédé d'extraction n'est pas poussé jusqu'à l'obtention de carbonate (cf. la figure 4).

Les perspectives du marché du lithium

L'utilisation du lithium dans les batteries de véhicules électriques

Pour mieux comprendre les perspectives du marché du lithium, arrêtons-nous un instant sur la technologie actuel-

le des batteries au lithium destinées aux véhicules électriques. Ces batteries sont constituées de trois éléments :

- ✓ une anode (en général en carbone),
- ✓ un électrolyte (un sel de lithium en solution),
- ✓ une cathode (composée notamment de lithium et de métal oxydés).

Suivant les propriétés recherchées, le lithium sera plus ou moins prépondérant en fonction des performances de la batterie.

Les différents types de batteries au lithium se caractérisent par des capacités différentes, en termes de :

- ✓ puissance spécifique (exprimée en W/kg) ou densité énergétique, qui correspond à la capacité d'accélération du véhicule,
- ✓ l'énergie spécifique, (exprimée en Wh/kg), qui correspond au niveau d'autonomie de la batterie (cf. la figure 5).

Il existe trois types de batteries destinées à l'électrification des automobiles (en fonction de leur taux d'hybridation) :

Les batteries pour véhicules hybrides (HV)

Les véhicules hybrides ne se servent de l'énergie électrique emmagasinée dans leur batterie que lors des phases de démarrage ou lors de courts déplacements urbains, la batterie se rechargeant lors des phases de freinage. Le rendement-moteur est ainsi plus élevé et la consommation moindre (c'est le cas de la voiture Prius, produite par Toyota). Les cycles de charge et décharge de la batterie sont ainsi très fréquents. La rapidité d'accumulation et de restitution de l'énergie électrique est aussi un facteur clef de la performance. Peu d'énergie spécifique est nécessaire.

Aujourd'hui, toutes les batteries des véhicules hybrides reposent sur la technologie nickel-hydrure métallique (Ni-MH). Mais celle-ci devrait être abandonnée dans le cas des véhicules les plus lourds, sa densité énergétique étant trop faible. Aujourd'hui, BMW et Mercedes commercialisent des véhicules hybrides équipés de batteries au lithium.

Les batteries des véhicules hybrides ne nécessiteront que quelques centaines de grammes de lithium. Mais l'impact de ce type de motorisation sur la réduction de la consommation des énergies fossiles reste faible, car l'énergie stockée par le véhicule provient essentiellement du carburant. Seule leur moindre consommation – de l'ordre de – 20 % – confère aux véhicules hybrides un intérêt environnemental, par rapport aux véhicules thermiques classiques.

Les batteries pour véhicule tout électrique (EV)

Le véhicule électrique fonctionne uniquement grâce à l'électricité stockée dans un pack de batteries.

Les véhicules tout électriques nécessiteront davantage d'énergie spécifique leur assurant une importante autonomie (dépassant les 200 km). En revanche, les conditions de charge électrique des batteries de ces véhicules sont moins contraignantes. Le rechargement de la batterie s'opère, de façon contrôlée, en quelques heures.

La technologie des batteries au lithium sera retenue pour les véhicules tout électriques, auxquels elle confèrera une autonomie bien supérieure.

Plusieurs kilogrammes de lithium seront nécessaires dans les voitures tout électriques : jusqu'à 15 kg, pour les batte-

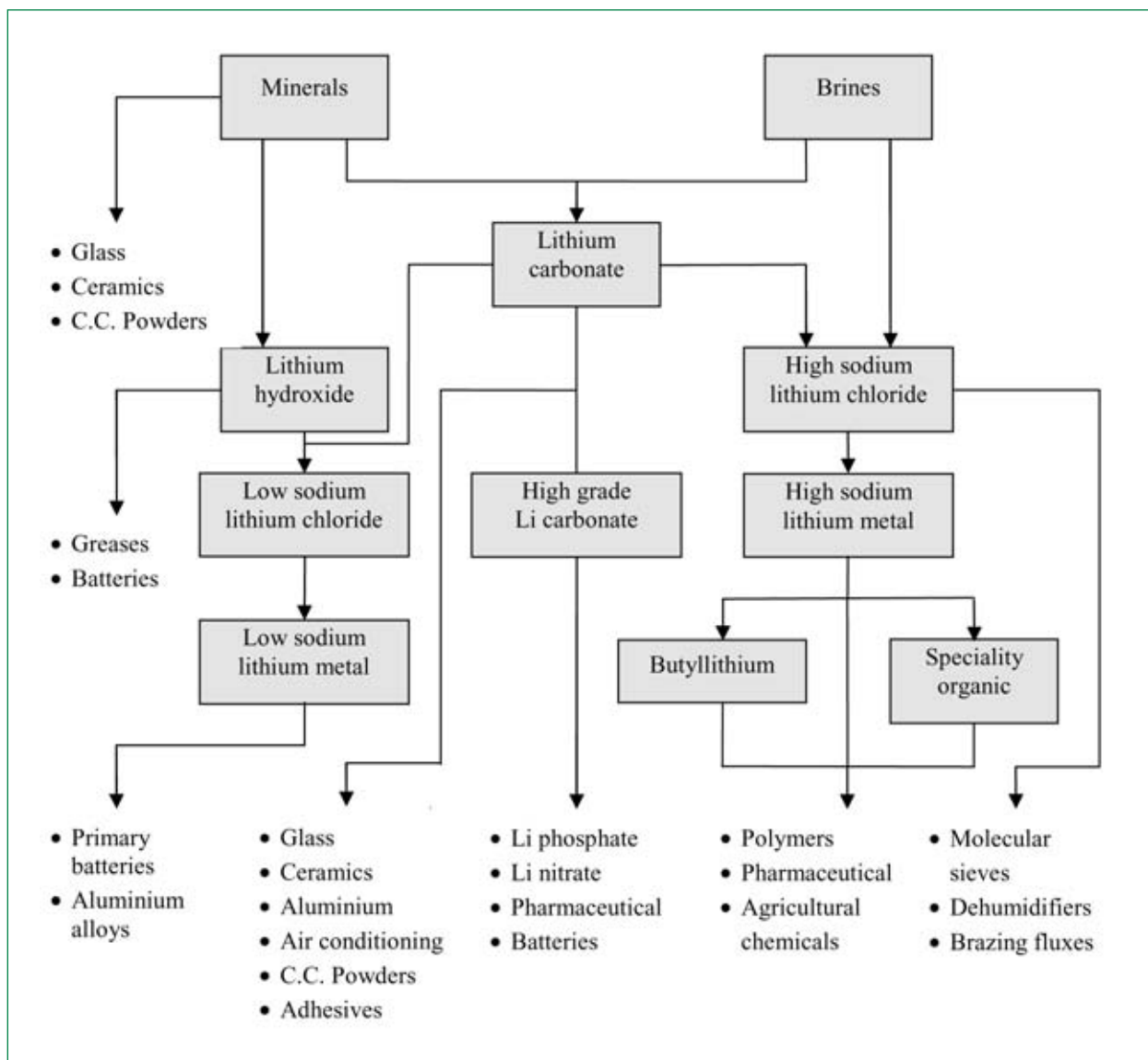


Figure 4 : Schéma général de l'extraction du lithium.

Source : Adapted from SQM.

ries de type Lithium Métal Polymère, dont l'anode est en lithium.

L'impact environnemental peut être très séduisant : le rendement d'un moteur électrique est bien meilleur que celui d'un moteur thermique et le véhicule électrique aura un impact direct sur la réduction de la consommation des énergies fossiles, si l'électricité provient de sources hydraulique, solaire, éolienne ou nucléaire.

En tout état de cause le bilan carbone global de ces véhicules devrait être favorable.

Le véhicule Plug-in Hybrid (PHEV)

Le *Plug-in Hybrid Vehicle* permet à son utilisateur de rejoindre les grands axes routiers grâce à la propulsion électrique. Le moteur thermique prend alors le relais sur les voies principales interurbaines. Le PHEV peut recharger sa batterie à partir d'une prise électrique et lors des phases de freinage et de roulage. Le PHEV a été conçu aux Etats-Unis pour lutter contre la pollution urbaine.

Il se caractérise par un compromis entre les besoins énergétiques des deux types de véhicules précédemment décrits (avec une autonomie de 50 km). Son développement nécessitera des quantités de lithium intermédiaires.

La concurrence de la pile à combustible

Rappelons tout d'abord le principe de la pile à combustible ; il s'agit de récupérer l'énergie électrique produite par la synthèse électrochimique de l'eau à partir d'hydrogène, d'un côté, et d'oxygène, de l'autre. Son développement se heurte à un certain nombre de défis techniques.

Tout d'abord, le réservoir de stockage de l'hydrogène est un des points d'achoppement technique. Il s'agit de contenir de l'hydrogène liquide sous haute pression (20 bars !). Or, l'hydrogène est une petite molécule instable. La sécurité du dispositif de stockage de l'hydrogène est un point particulièrement sensible.

✓ La synthèse de l'eau s'accompagne d'un dégagement de chaleur notamment en raison de la chute ohmique lors

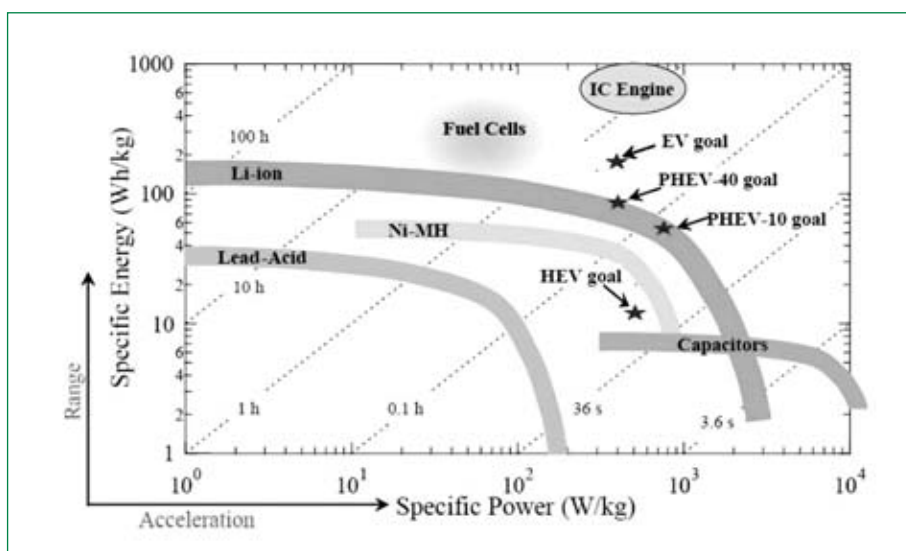


Figure 5 : Performances comparées de divers systèmes de stockage électrochimique de l'énergie.

Source : Product Data Sheets.

du passage de l'hydrogène dans les membranes constitutives des piles à combustible. La chaleur émise doit être évacuée à l'aide de « radiateurs », dont les surfaces d'échanges sont peu compatibles avec les exigences actuelles des concepteurs des véhicules électriques. Des piles pouvant fonctionner à plus hautes températures devront être très certainement conçues.

- ✓ Le rendement du cycle thermodynamique est de l'ordre de seulement 30 %, soit l'équivalent de celui d'un moteur thermique. Pour l'augmenter, la chaleur de la réaction devra être récupérée et transformée en énergie propulsive.
- ✓ Les matériaux utilisés dans la fabrication des membranes sont complexes. Les électrodes, par exemple, sont constituées d'alliages de platine. Les coûts de tels matériaux sont prohibitifs. L'industrialisation de la pile à combustible passera par le développement de matériaux moins chers.
- ✓ La pile à combustible nécessitera le développement d'un réseau de stations services dans lesquelles l'hydrogène devra être produit. Le seul procédé éprouvé aujourd'hui (au Japon, notamment) est celui consistant à produire de l'hydrogène à partir de méthane, qui est un hydrocarbure. Pour ces différentes raisons, la pile à combustible est plutôt présentée comme la génération suivante des technologies de production d'énergie électrique, qui succédera à la pile au lithium. Le lithium ne disparaîtra pas tout à fait : des batteries performantes devront être associées aux piles à combustible car une certaine quantité d'énergie devra être stockée, puis restituée lors des phases d'accélération du véhicule (régimes transitoires).

L'évolution du marché à moyen terme

Les deux principaux relais de croissance du marché seront les batteries des systèmes embarqués et les batteries de véhicules électriques.

Les batteries portables

Le taux de pénétration des téléphones et des ordinateurs portables continuera d'augmenter.

Les exigences techniques des équipements portables (mobiles de génération 3G, baladeurs MP3 ou autres smartphones, tels que l'i-Phone et le Black Berry) nécessiteront des batteries d'une puissance et d'une autonomie supérieures.

Une croissance annuelle de 5 à 10 %, une fois la crise amortie, se traduirait par une demande supplémentaire de 2 500 à 4 500 tonnes/an des batteries destinées à ces applications en 2020.

Les véhicules électriques

Le marché du lithium pourrait évoluer de façon encore plus sensible grâce au développement de la voiture électrique.

En mai 2008, Toyota déclarait qu'il s'était fixé comme objectif de vendre annuellement 1 million de véhicules hybrides au début des années 2010 et de proposer une version hybride de chacun de ses modèles actuels, en 2020.

En août 2009, Carlos Ghosn (Renault) renchérisait, en lançant le véhicule électrique Leaf : « [...] Nous voyons les voitures électriques non comme un marché de niche, mais comme un marché de masse » [qui pèsera] « plus de 5 % des ventes mondiales ».

Les études des cabinets de conseil en stratégie tels que Yano, Goldman Sachs et Boston Consulting Group prévoient des taux de pénétration du marché de l'OCDE relativement « modestes » : de 8 % à 36 %, en 2020. Les avis divergent sur les répartitions futures des divers types de véhicules électriques, avec, toutefois, une large prédominance du déploiement des véhicules hybrides (cf. le tableau 2).

La consommation annuelle supplémentaire estimée serait comprise, en 2020, entre + 4 500 tonnes et + 45 000 tonnes de lithium contenu (L'hétérogénéité de ces chiffres, qui varient d'un facteur 10, peut surprendre !).

En résumé, les prévisions les plus optimistes prévoient le doublement, voire le triplement du marché du lithium en 2020.

Assisterons-nous donc à une explosion de la demande, ou bien devons-nous nous attendre à une croissance régulière et stable, telle que nous l'avons connue depuis les dix dernières années ? Il est bien difficile de trancher...

Horizon 2020	Type de véhicule	EV	PHEV	HEV	
	kg Li /véhicule	3,5	1,75	0,25	
Projections Yano	Répartition du segment (en %)	5 %	13 %	81 %	100 %
	Répartition du segment (en milliers de véhicules)	401	1 030	6 269	7 700
	Besoin en lithium (tonnes)	1 404	1 803	1 567	4 774
Projections Goldman Sachs	Répartition du segment (en %)	13 %	24 %	63 %	100 %
	Répartition du segment (en milliers de véhicules)	1 534	2 832	7 434	11 800
	Besoin en lithium (tonnes)	5 369	4 956	1 859	12 184
Projections Boston Consulting Group	Répartition du segment (en %)	27 %	17 %	56 %	100 %
	Répartition du segment (en milliers de véhicules)	8 748	5 508	18 144	32 400
	Besoin en lithium (tonnes)	30 618	9 639	4 536	44 793

Tableau 2 : Besoin en lithium à l'horizon 2020.

Perspectives de la production et des ressources en lithium

Projets d'expansion et « green field »

Quelques projets d'expansion sont étudiés par les producteurs actuels.

- ✓ Au Chili, des capacités supplémentaires, de près de 5 000 tonnes/an, sont envisagées ;
- ✓ En Chine, une montée en production complémentaire de 12 000 tonnes/an serait planifiée ;
- ✓ En Australie, un projet de 3 500 t/an est en cours de construction.

A plus long terme, de nombreux projets « *green fields* » sont à l'étude : en Bolivie, sur le Salar d'Uyuni, en Argentine et au Chili sur des salars de tailles moyennes, au Canada, aux Etats-Unis (Nevada, Californie), au Chili, en Europe (en Finlande). Ces projets, s'ils étaient tous réalisés, se traduiraient par une offre supplémentaire annuelle de plus de 20 000 tonnes de lithium.

Les innovations technologiques

Si la ressource en lithium est abondante, il faudra néanmoins mettre au point de nouveaux procédés d'extraction de celui-ci, afin de le transformer en métal.

Les compositions chimiques des saumures des déserts de sel en Argentine sont moins favorables que celle du salar d'Atacama ; les taux de sulfates y sont, en général, plus élevés.

Les saumures des salars chinois de la province de Qinghai et du Tibet se caractérisent par des teneurs préjudiciables en magnésium.

Les sulfates, de même que le magnésium, piègent le lithium dans des sels doubles lors de la cristallisation par évaporation solaire ; le rendement du procédé devient alors trop faible.

Autre facteur défavorable : les conditions météorologiques. En effet, sur l'altiplano argentin, à plus haute altitude que le salar d'Atacama, et *a fortiori* sur les plateaux tibétains et ceux de la province du Qinghai, le taux d'humidité

est plus important et les températures plus basses, ce qui induit un taux d'évaporation bien plus faible.

De nouveaux procédés devront être développés pour séparer le lithium du magnésium et des sulfates, dans des conditions climatiques moins propices à l'évaporation solaire.

Des essais d'extraction sur des formes minérales lithifères plus altérées (argile de type hectorite) sont réalisés aux Etats-Unis. Certains envisagent même de produire du lithium à partir des eaux géothermales, en utilisant des procédés membranaires (osmose inverse).

Le recyclage du lithium

Aujourd'hui, le lithium n'est pas recyclé. L'obligation législative (au niveau européen, tout au moins) faite aux fabricants de véhicules de recycler le lithium contenu dans les batteries permettrait de prolonger sensiblement l'accès à la ressource lithifère naturelle.

La Bolivie et la Chine

Même dans les hypothèses les plus optimistes et malgré les incertitudes quant à l'évaluation des réserves, on peut raisonnablement penser que les ressources en lithium suffiront largement à couvrir les besoins du marché durant le siècle à venir.

Le développement d'au moins deux ou trois projets importants est nécessaire, mais aucun acteur potentiel n'est indispensable, y compris la Bolivie ou la Chine : il y aura assez de lithium si d'autres sources sont développées ailleurs (voir la photo de la page suivante).

Conclusion

Pour que le lithium devienne un élément de solution dans la lutte contre l'émission des gaz à effet de serre, certaines conditions doivent être réunies :

- ✓ L'adoption des batteries au lithium pour les véhicules automobiles dépendra de l'aptitude des consommateurs à modifier leurs habitudes. Le véhicule tout électrique restera un véhicule urbain de petite taille et d'une autonomie réduite à 200 kilomètres ;

Photo : Le salar d'Uyuni (Bolivie).

Source : © ERAMET.



- ✓ Des incitations administratives ou financières pour compenser le coût plus élevé des voitures électriques par rapport aux véhicules thermiques (dont les performances énergétiques ne cesseront de s'améliorer) ;
- ✓ Les pouvoirs publics devront aussi favoriser le développement des infrastructures *ad hoc* : réseaux de prises électriques et circuits de distribution et de collecte des batteries et, bien sûr, des centres de production d'électricité à partir d'énergie non fossile ;
- ✓ Une cellule lithium ion possède une énergie de combustion se situant entre 1 000 et 2 000 Wh/kg et sa température d'ignition est de 100° C. Toute mauvaise utilisation de la batterie (surchauffe ou surcharge) peut être à l'origine d'un feu très violent. Ce point sensible doit être sérieusement appréhendé soit par la mise en œuvre de systèmes de régulation de température éprouvés ou, bien encore, par l'adoption de technologies de batterie qui repoussent significativement la température d'ignition (de type lithium métal polymère, par exemple). Tout accident grave pourrait en

effet affecter durablement le développement des véhicules électriques.

Cependant, nous pouvons être optimistes en ce qui concerne le développement du lithium, notamment en raison :

- ✓ de l'abondance des ressources et des nombreux projets de construction de nouvelles capacités ;
 - ✓ du fait que le lithium est un élément de réponse au problème géopolitique et économique de la dépendance envers le pétrole, tout au moins en ce qui concerne les véhicules électriques terrestres de transport de personnes.
- Le lithium ne sera pas un nouvel Eldorado, qui remplacerait celui du pétrole. Il restera un marché de niche. La taille de son marché restera modeste : environ 1 milliard de dollars/an en 2020, soit l'équivalent de quelques heures de transactions pétrolières.

Note

* Chef de Projet Lithium, ERAMET.