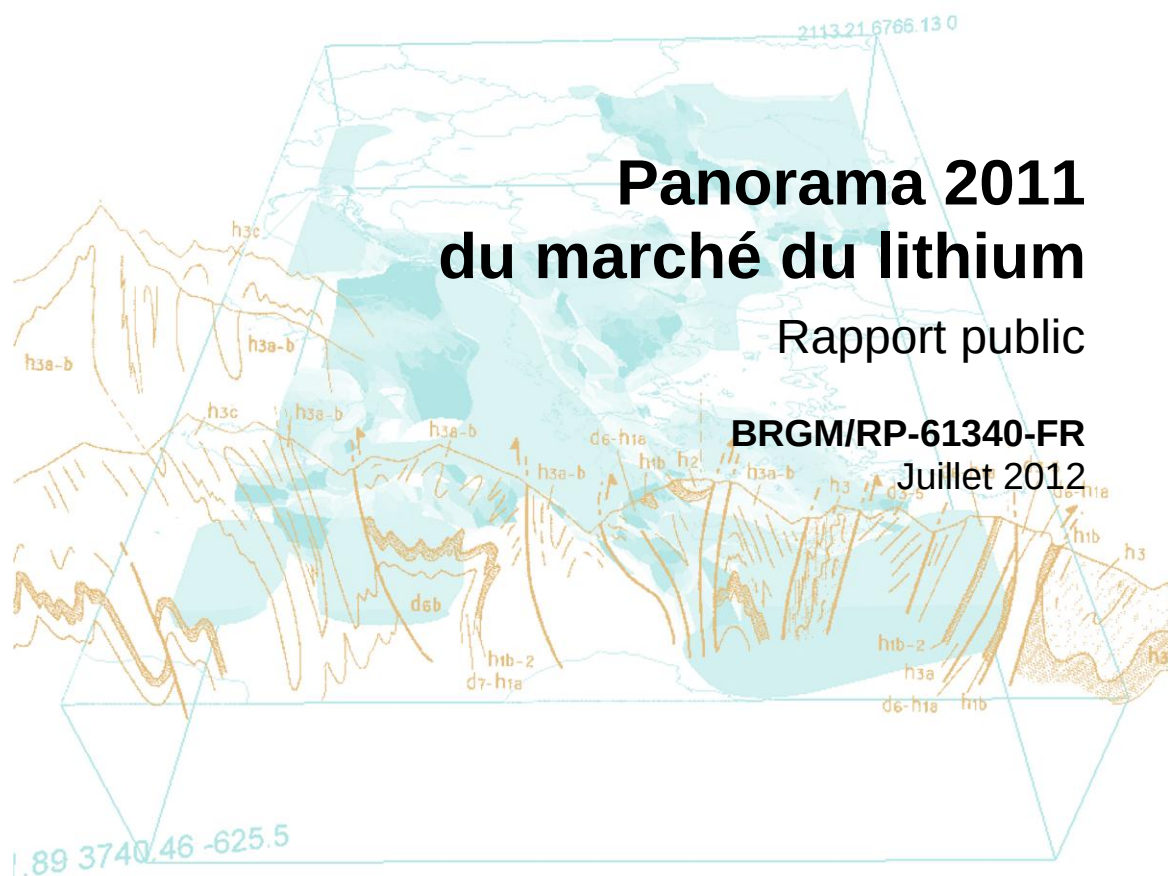


Document public



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document public

Panorama 2011 du marché du lithium

Rapport public

BRGM/RP-61340-FR

Juillet 2012

J.F. Labbé, G.Daw

Avec la collaboration extérieure de
la Compagnie Européenne d'Intelligence Stratégique (CEIS)

Vérificateur :

Nom : A.S. AUDION

Date : 27/07/2012

Signature :

Approbateur :

Nom : A. BOURGUIGNON

Date : 27/07/2012

Signature :

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots-Clés : Lithium, Saumures, Ressources, Réserves, Production, Prix, Consommation, Marché, Approvisionnement, Criticité, Stratégie des matières premières, Politiques publiques, Économie, Matières premières minérales.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Labbé J.F. et Daw G. (2012) – Panorama 2011 du marché du lithium. Rapport public. BRGM/RP-61340-FR. 154 p., 51 fig., 29 tab.

© BRGM, 2012, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Résumé

LE LITHIUM

Le lithium est le troisième élément du tableau de Mendeleïev. C'est un métal alcalin comme le sodium et le potassium. C'est un élément assez peu abondant de l'écorce terrestre (20 ppm, comme le niobium, trois fois moins que le cuivre mais une fois et demi plus que le plomb). Les océans en contiennent environ 0,18 mg/l.

Sa production annuelle a été de l'ordre de 30 000 tonnes de lithium contenus dans les produits marchands, composés chimiques ou minéraux lithinifères, pour l'année 2011.

Son prix moyen est resté de l'ordre de 5,1 à 5,3 US\$ le kg de carbonate de lithium, livré USA, en 2011, mais avec des écarts importants selon les contrats.

Propriétés et usages

Sous sa forme pure, le lithium est un métal argenté très réactif qui ternit rapidement à l'air. C'est le plus léger de tous les métaux, il est près de deux fois plus léger que l'eau (densité de 0,534). Son électropositivité et sa faible densité en font un élément de choix pour les piles et batteries d'accumulateurs électrochimiques.

Le lithium n'a pas de rôle biologique connu mais il a des propriétés pharmaceutiques, entre autres en psychiatrie (trouble bipolaire).

Selon les secteurs, le lithium est utilisé sous forme de minéraux (spodumène, pétalite, etc.), de carbonate (Li_2CO_3), d'oxyde (Li_2O), de lithium métallique (Li) et d'autres composés.

L'usage dominant est celui de l'industrie du verre et des céramiques, suivi de celle des batteries et des lubrifiants. Mais la consommation pour les batteries est celle qui a connu la plus forte croissance ces 10 dernières années.

En 2011, les usages du lithium se sont répartis de la manière suivante :

- Industrie du verre, des céramiques et des vitrocéramiques : 30 %
- Batteries d'accumulateurs et piles au lithium : 22 % (en forte croissance)
- Graisses lubrifiantes : 11 %
- Traitement de l'air (refroidissement, déshumidification, purification) : 4 %
- Coulée continue : 3 %
- Caoutchoucs et thermoplastiques : 3 %
- Pharmacie et chimie fine : 2 %
- Production d'aluminium : 2 % (en baisse)
- Alliages aluminium-lithium : 0,4 %, appelé à croître
- Autres (électronique, BTP, métallurgie, traitement de l'eau, teinture, pyrotechnie, production de tritium pour la fusion thermonucléaire, etc.) : 22 %.

La consommation de lithium est attendue en forte hausse de 15 à 19 % par an dans le secteur des batteries et de 6 à 10 % par an dans celui des alliages Al-Li, d'ici 2020. Elle est au contraire attendue en baisse dans celui de la production d'aluminium (où l'usage du lithium n'est pas indispensable). Dans tous les autres secteurs, la consommation devrait connaître une croissance modérée de 2 à 5 % suivant la croissance globale.

En consolidé, le taux de croissance annuel moyen de la consommation de lithium est évalué à 6,5 % (hypothèse basse) à 9,5 % (hypothèse haute), ce qui conduirait à un besoin en lithium de 44 à 61 kt en 2020.

Substituabilité

Dans les batteries, la substitution du lithium est possible, en utilisant des technologies anciennes (NiMH par exemple), mais les batteries au lithium ont actuellement la meilleure capacité énergétique par unité de masse et de volume. Le lithium étant le plus léger de tous les métaux et ayant le plus fort potentiel électrochimique, il est probable qu'il reste le matériau préférentiel pour les batteries des équipements portables et des véhicules électriques.

En verrerie et céramiques, le lithium peut être substitué par des flux à sodium ou potassium.

Des savons de calcium ou d'aluminium peuvent être utilisés comme substituts aux savons de lithium pour les graisses lubrifiantes.

Les alliages Al-Li peuvent être remplacés par des composites.

Toutefois, lorsque le lithium est choisi c'est qu'il présente des performances supérieures dans l'état actuel des connaissances.

Ressources

Les concentrations de lithium en permettant une exploitation économique sont de deux types majeurs très différents :

- les saumures des "salars", qui sont de grands lacs salés partiellement asséchés que l'on rencontre en particulier dans les hauts plateaux andin et tibétain, qui représentent environ 60 % des ressources mondiales actuellement identifiées en lithium et assurent environ 2/3 de la production mondiale de lithium (généralement sous forme de carbonate) ;
- les minéraux lithinifères concentrés dans certaines pegmatites et certaines coupoles granitiques et greisens, assez largement distribués dans le monde. Ces gisements représentent environ 26 % des ressources mondiales actuellement identifiées en lithium et couvrent environ 1/3 de la production mondiale de lithium contenu. De cette production, 2/3 est utilisée directement sous forme de minéral (verrerie et céramiques), et 1/3 est transformée en carbonate de lithium et autres composés.

Il existe aussi des concentrations et gisements potentiels non-conventionnels, en cours d'étude, et dont certains pourraient arriver en production prochainement :

- l'hectorite, une argile lithinifère, dont il existe un gisement en cours d'étude au Nevada (Kings Valley) dont la préfaisabilité a été remise en décembre 2011 ;
- la jadarite, un minéral boro-lithinifère, dont il existe un gisement en cours d'étude de préfaisabilité en Serbie (Jadar) ;
- des saumures géothermales, dont un site est en phase de développement et d'exploitation pilote en Californie (Salton Sea) ;
- des saumures de champs pétroliers, dont un site est en cours d'étude au Canada (Fox Creek) ;
- éventuellement même les océans, à partir desquels les technologies d'extraction ont été testées mais à un coût encore très largement supérieur au prix de vente du marché.

Historiquement, le lithium a d'abord été exploité à partir des minéraux, et en particulier avec les pegmatites de Caroline du Nord. La production de lithium à partir des saumures n'est devenue significative qu'à partir de la fin des années 1980 et les années 1990.

Les salars

Les principaux salars exploités actuellement, entre autres pour le lithium, sont :

- le Salar de Atacama, au Chili, exploité au nord par SQM / Potash Corp. Depuis 1997 et au sud par SCL / Chemetall depuis 1984. Ce salar est exceptionnel par ses qualités et ses teneurs élevées en lithium. Pour SQM, le plus gros producteur, le lithium n'est qu'un co-produit de l'exploitation des saumures, avec le chlorure et le sulfate de potassium. Il y a plusieurs autres salars dans les environs, plus petits et non encore totalement évalués ;
- le Salar del Hombre Muerto, en Argentine, dont une partie est exploitée par FMC depuis 1995 ;
- le lac salé de Silver Peak, au Nevada (USA), exploité depuis 1964 par Chemetall ;
- le lac salé de Zhabuye, au Tibet, exploité depuis 2008, et les lacs salés du bassin de Qaidam, en particulier les lacs de Xitai, Dongtai et Charhan, au Qinghai, en Chine, mis en exploitation entre 2004 et 2010.

D'autres salars sont en cours d'évaluation, certains par des juniors, comme ceux de Rincon, Olaroz et Cauchari en Argentine.

Le Salar de Uyuni, en Bolivie, non encore exploité industriellement, contiendrait l'une des plus grandes accumulations de lithium en saumure. Le gouvernement bolivien essaie de le développer seul et sans investissements étrangers.

Les ressources globales en lithium actuellement répertoriées dans les salars sont estimées à 18 à 21 Mt de lithium contenu, selon les auteurs.

Les minéraux

Les gisements à minéraux de lithium (spodumène, pétalite, lépidolite, etc.) sont pour la plupart des pegmatites granitiques particulières dites "LCT". Beaucoup sont de faible extension, mais certains atteignent des dimensions importantes et sont exploitables à échelle industrielle, comme Greenbushes (Australie), Bernic Lake et Lacorne (Canada), Kings Mountain (États-Unis), Manono et Kitotolo (RD Congo), ou Bikita (Zimbabwe). Il existe aussi des minéraux à lithium disséminés (lépidolite essentiellement) dans certaines coupoles de leucogranites péralumineux à tantale et étain, comme par exemple à Échassières, en France.

Ces gisements peuvent contenir d'autres substances valorisables : tantale, étain, béryllium.

Le plus gros gisement exploité est la pegmatite de Greenbushes, en Australie Occidentale, où Talison Lithium Ltd produit désormais plus de 300 kt de concentré de spodumène par an, contenant 8 à 9 kt de Li, soit plus d'un quart de la production mondiale de lithium.

Les autres exploitations importantes de minéraux sont celles de Bernic Lake, au Canada (Tanco/Cabot), qui a suspendu sa production en 2009, de Bikita, au Zimbabwe, qui produit de l'ordre de 30 kt/an de minéraux, et plusieurs exploitations au Sichuan et au Jiangxi, en Chine, qui produisent environ 46 kt/an de spodumène. Il existe d'autres exploitations moins importantes au Brésil, au Portugal, en Espagne et en Inde. En France, le gisement d'Échassières produit des sables et roches broyées lithinifères en sous-produits du kaolin.

De nombreux autres gisements sont en cours d'investigation, au Canada, en Australie, en Finlande, etc.

Les ressources en minéraux à lithium des pegmatites et coupoles granitiques sont estimées à 7,6 à 12,3 Mt de lithium contenu selon les auteurs.

Avec les ressources non conventionnelles, les ressources globales en lithium actuellement répertoriées peuvent être estimées à plus de 36 Mt¹. Il s'agit d'un ordre de grandeur raisonnablement réaliste, mais pas toujours de ressources normalisées (JORC ou NI43-101).

¹ 29 à 44 Mt selon les auteurs, les évaluations à 29 Mt d'il y a quelques années ayant été réévaluées par de nouvelles identifications de ressources plus récentes

Type de gisement	Tonnage de lithium contenu
Salars "conventionnels"	21.06 Mt
Minéraux "conventionnels"	12.24 Mt
Saumures géothermales	0.62 Mt
Saumures des champs pétrolifères	1.30 Mt
Hectorite	0.35 Mt
Jadarite	1.05 Mt
TOTAL DES RESSOURCES MONDIALES EN LITHIUM	36.60 Mt

Ressources en France

La France métropolitaine dispose de gisements de minéraux de lithium (essentiellement lépidolite, plus accessoirement pétalite et amblygonite) qui ont été exploités ponctuellement et marginalement pour le lithium dans le nord-ouest du Massif Central (Échassières, Montebrias, Monts d'Ambazac), et d'un gisement inexploité en Bretagne (Tréguennec). Ces gisements sont de dimension modeste à l'échelle mondiale. Seul le gisement d'Échassières est encore exploité actuellement par le groupe Imerys pour le kaolin, avec sables et granulats lithinifères en sous-produits.

Il existe aussi de petits indices ponctuels de minéraux à lithium en Guyane.

Par ailleurs, les forages géothermiques de Soultz-Sous-Forêts et de Cronenbourg ainsi que les forages pétroliers de Pechelbronn, dans le nord de l'Alsace, ont révélé des saumures avec des teneurs en lithium comparables à celles faisant l'objet de pilotes d'exploitation en Californie. La récupération de lithium en avait été étudiée à la fin des années 1980, et mériterait d'être remise à jour avec les technologies et les paramètres économiques d'aujourd'hui. Des concentrations ponctuelles en lithium existent dans d'autres nappes et sources minérales.

Production

La production mondiale de lithium primaire se montait probablement à près de 28 800 t de lithium contenu en 2010 qui se répartissait comme suit, en milliers de tonnes (kt) de lithium contenu dans les produits vendus :

- Chili – Salar de Atacama – SQM : 6,09 kt Li (21,1 %) ;
- Chili – Salar de Atacama – SCL/Chemetall : 3,64 kt Li (12,6 %) ;
- Argentine – Salar del Hombre Muerto : 2,90 kt Li (10,1 %) ;
- USA – Salar de Silver Peak : ~0,7 kt Li (2,4 %) ;

- Chine – Salars + minéraux : 4,50 kt Li² (15,6 %) ;
- Australie – Greenbushes (minéraux) – Talison Lithium : 8,39 kt Li (29,1 %) ;
- Australie – Mount Cattlin (minéraux) – Galaxy resources : 0,05 kt Li (0,2 %, démarrage de production) ;
- Zimbabwe – Bikita (minéraux) – Bikita Minerals : 0,47 kt (1,6 %) ;
- Autres (Brésil, Portugal, Espagne, Inde, France) : ~2 kt.

Il est toutefois difficile d'avoir des tonnages exacts, car toutes les sociétés ne publient pas leur production.

La production française annuelle de mixtes minéraux contenant du lithium du gisement d'Échassières par le groupe Imerys n'est pas publiée. Elle a été estimée par Roskill (2009) à 208 t de lithium contenu, sous forme de 15 kt de sable lithinifère (mélange quartz et lépidolite, principalement) à 1,8 % Li₂O, appelé "Félithe" et utilisé directement comme flux en verrerie, et 20 kt de roche broyée à 0,9 % Li₂O, utilisé comme flux en tuilerie.

Au niveau des sites d'extraction, la transformation des produits extraits est leur forme d'expédition est variable :

- Sur les salars, les sites produisent surtout du carbonate de lithium, mais aussi du chlorure de lithium et de l'hydroxyde de lithium. Nombre d'exploitants de salars produisent aussi, voire en majorité, du potassium, sous forme de chlorure, parfois de sulfate.
- Sur les exploitations de minéraux, certains livrent directement les concentrés de minéraux pour utilisation directe en verrerie. Quelques-uns transforment les minéraux ou une partie d'entre eux en composés (carbonate et chlorure), comme en Chine ou au Brésil (CBL). Le plus gros producteur actuel de spodumène, Talison Lithium à partir de son gisement de Greenbushes en Australie, ne commercialise que du concentré de spodumène, mais une bonne partie est exportée en Chine pour y être transformée en carbonate. Par ailleurs Talison Lithium étudie un projet d'usine de carbonate de lithium à côté de Perth, en Australie Occidentale, d'une capacité de 20 kt/an de carbonate de lithium, avec un démarrage de production prévu en 2015.

En 2011, l'approvisionnement en lithium primaire s'est partagé en approximativement :

- 58 % sous forme de composés (carbonate, chlorure et hydroxyde) provenant des exploitations de saumures ;
- 24 % sous forme de composés (carbonate et hydroxyde) élaborés à partir de minéraux, et
- 18 % sous forme de minéraux utilisés tels quels directement, essentiellement en verrerie et céramiques.

² La répartition entre la part de la production chinoise provenant des salars (Zhabuye, Dongtai, Xitai) et celle venant des minéraux (Sichuan, Jiangxi) n'est pas précisée pour 2010. En 2008, pour une production chinoise totale de 1,87 kt, la répartition entre salars et minéraux était de 50-50.

Recyclage

Les usages du lithium en verrerie, coulée continue, graisses lubrifiantes, etc. sont plutôt dispersifs et le lithium n'en est pas recyclé et pourrait difficilement l'être.

Les verres contenant du lithium peuvent cependant être recyclés comme calcins en verrerie, mais ne sont pas alors comptés comme source de lithium dans la consommation de lithium par le secteur.

C'est surtout le secteur des batteries et piles au lithium qui devrait devenir une source importante de lithium secondaire. Jusqu'à récemment, la plupart des piles et batteries au lithium (ordinateurs portables, téléphones, etc.) étaient recyclées principalement pour en récupérer le cobalt, comme par exemple par la société belge Umicore. Mais le développement en masse de batteries attendu avec le développement de la voiture électrique impose de se préoccuper et d'optimiser le recyclage du lithium lorsque ces batteries arriveront en fin de vie. Ce recyclage pourra devenir un élément économique déterminant dans l'offre de lithium. Mais si l'on considère une durée de vie des batteries de 10 à 15 ans, le recyclage ne deviendra significatif dans l'offre qu'à partir de 2025 ou 2030.

La filière de récupération effective du lithium des piles et batteries se met désormais en place progressivement. Certains procédés sont encore du domaine de la R&D. La société française Récupyl et la société californienne Toxco produisent déjà du lithium recyclé à partir des batteries et piles. Récupyl annonce au stade pilote une récupération de 98 % du lithium contenu avec son procédé hydrométallurgique breveté.

Perspectives d'évolution de la production

Les producteurs majeurs de lithium ont tous annoncé des augmentations prochaines de capacité de production. Galaxy Resources, qui vient de démarrer sa production, devrait monter en puissance, et de nouveaux projets devraient arriver en phase de production : minéraux de Lacorne et Whabouchi au Québec, Salars de Rincon, Orlaroz, Cauchari, Sal de Vida en Argentine, voire Salar de Uyuni en Bolivie, hectorite de Kings Valley et saumure géothermale de Brawley/Salton Sea.

Si on additionnait ces accroissements de capacité et démarrages plus ou moins prévus ou annoncés, on arriverait à une perspective de production de 103 kt de Li contenu en 2020, ce qui dépasserait de loin la demande envisagée, qui, même dans l'hypothèse haute d'un taux de croissance de cette demande de 9,5 % par an, ne serait que de 59 kt en 2020.

Ainsi, même si divers projets prennent du retard ou sont annulés, il ne devrait pas y avoir globalement d'insuffisance de production pour faire face à la demande croissante dans les années à venir. Au contraire il pourrait y avoir surproduction effective (TRU, 2011-2012).

Il semble donc que, même avec une bonne croissance de la demande en lithium tirée par les batteries au lithium, elles-mêmes tirées par le développement attendu des véhicules électriques, les ressources identifiées seront suffisantes pour permettre un approvisionnement du marché pour plusieurs décennies, et les capacités de production

en projet sont plus que suffisantes, et risquent même d'être excédentaires d'ici au-delà de 2020.

En revanche, l'offre en lithium marchand pourrait connaître des insuffisances temporaires de l'offre :

- soit en cas d'accélération soudaine de la demande (par exemple si la croissance du taux de pénétration du véhicule électrique dépassait de loin les prévisions actuelles), en raison du délai incompressible nécessaire au lancement de nouvelles capacités de production
- soit précisément en raison des craintes d'excédents, qui pourraient conduire les prix à la baisse, ce qui à son tour pourrait conduire à l'annulation ou à la fermeture de certains projets d'exploitation en cours.

Mais cette insuffisance ne serait que temporaire, puisqu'une remontée des prix conduirait à relancer des productions. Toutefois, compte tenu du délai de quelques années éventuellement nécessaire pour lancer ou relancer une production, il pourra y avoir des pénuries momentanées.

Prix du lithium

Il n'y a pas de marché international spot du lithium, ni de cotation publique. Les échanges et fixations de prix se font sur des composés chimiques de lithium (carbonate, hydroxyde, chlorure et autres) ou sur des minéraux ou concentrés de minéraux de lithium, selon leur nature et leur teneur en lithium. Les prix s'établissent par négociations directes de contrats entre producteurs primaires et transformateurs ou utilisateurs. Divers prix se trouvent publiés dans des revues spécialisées et chez des analystes, mais ils ne sont pas toujours totalement cohérents entre eux.

Industrial Minerals publie des fourchettes de prix d'échange de quelques catégories de produits :

- le prix du carbonate de lithium est donné dans la fourchette 5,1 à 5,3 US\$/kg tout au long des années 2010 et 2011, pour augmenter à 5,5 à 5,6 US\$/kg début 2012. De même, le prix de l'hydroxyde est donné dans la fourchette 6,0 à 6,6 US\$/kg en 2010-2011 pour augmenter à 6,5 à 7,5 US\$/kg début 2012 ;
- le prix du spodumène aurait progressivement augmenté de 530-600 US\$/t en 2006 à 750-800 US\$/t début 2012. Le prix de la pétalite zimbabwéenne serait resté inchangé dans la fourchette 165 - 260 US\$/t depuis 2006.

D'autres sources de données indiquent que les fourchettes de prix sont en réalité bien plus larges que celles publiées par Industrial Minerals.

Historiquement, en moyennes annuelles, le prix du carbonate de lithium a plutôt suivi l'inflation entre 1970 et 2000. Il a chuté en 2001 pour rester aux alentours de 1,5 US\$/kg jusqu'en 2005 (montée en puissance des salaires chiliens et argentins, déprime générale des prix des matières premières minérales dans les années 2000-2003). Il a ensuite bien remonté entre 2006 et 2008, avec l'accroissement de la demande chinoise et l'augmentation de la demande en batteries Li-ion en raison de la généralisation des appareils électroniques portables et le décollage progressif du véhicule électrique (voitures mais aussi vélos et scooters).

L'évolution des prix est plus incertaine à partir de 2009 avec les soubresauts successifs de la crise économique mondiale. Compte tenu de ces nombreux et importants écarts et des incertitudes qui en découlent, il paraît peu aisé de prédire l'évolution des prix à court et moyen terme.

Lors de la 4^{ème} conférence "Lithium Supply and Market Conference" tenue à Buenos Aires fin janvier 2012, les consultants et les participants des sociétés exploitantes ou en développement ont exprimé des pronostics variables sur l'évolution prochaine des prix, mais la plupart s'accordent sur une relative stabilité des prix au niveau de ceux de 2011, de l'ordre de 4,3 US\$/kg de Li_2CO_3 .

Les acteurs français

Il n'existe en France qu'un producteur minier de substances lithinifères (Imerys), et un recycleur (Récupyl). Deux sociétés fabriquent des accumulateurs au lithium (Saft et Batscap/Bolloré), une autre (E4V) en assemble les cellules, et une quatrième fabrique des piles thermiques au lithium (ASB). Un métallurgiste est spécialisé dans les alliages Al-Li (Constellium).

Plus en aval, les constructeurs automobiles deviennent demandeurs de batteries au lithium (Renault, Bolloré/Pininfarina, Mia-Electric, Matra M&S et plusieurs PME), de même que les constructeurs de cycles (vélos et scooters).

Les industries aérospatiales (EADS / Airbus) et de défense (MBDA) utilisent des alliages Al-Li et des piles thermiques au lithium.

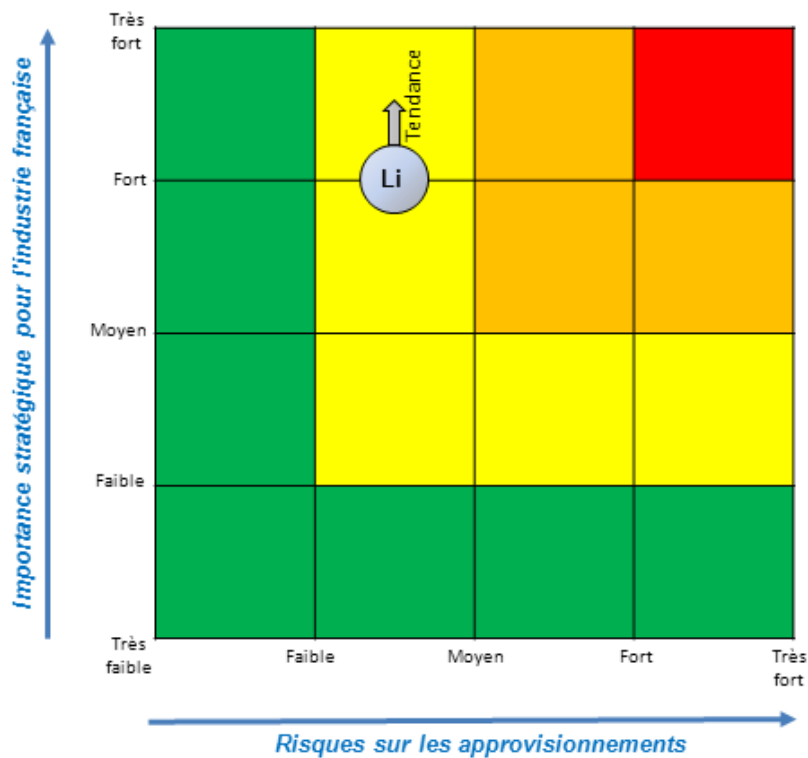
Commerce extérieur de la France

Le poste "composés de lithium" est un poste déficitaire du commerce extérieur français, d'une amplitude croissante, de 7,4 M€ de déficit en 2009, 7,9 M€ en 2010 et 12,1 M€ en 2011. Cette augmentation du déficit est surtout liée à un plus-que-doublement des volumes importés (passé de 1 173 t de carbonate de lithium en 2009 à 2 790 t en 2011, par exemple), atténuée cependant par une baisse du prix unitaire.

Le poste "accumulateurs au lithium" (= batteries rechargeables au lithium) est très déficitaire, avec un déficit se creusant d'année en année, passant de 12,8 M€ de déficit en 2009 à 104,3 M€ en 2011. Le poste "piles au lithium" reste excédentaire de 23 à 26 M€. Mais le consolidé batteries rechargeables + piles au lithium est passé d'un excédent de 10,5 M€ en 2009 à un déficit de 78,2 M€ en 2011.

Criticité

EVALUATION DE LA CRITICITE DU LITHIUM (Synthèse)



Zone à forte criticité. Actions conservatoires à prendre par l'Etat. Suivi de l'évolution des indicateurs de criticité



Zone à forte criticité. Veille active recommandée (observation continue des marchés, alertes, proposition de scénarios de parade)



Zone à criticité moyenne. Veille spécialisée recommandée (rédaction d'un rapport mis à jour annuellement)

Sommaire

Résumé	3
1. Introduction.....	21
1.1. DÉFINITIONS	21
1.2. CONDITIONS ET LIMITES DE RÉALISATION DE CETTE ÉTUDE	22
1.3. SOURCES DES DONNÉES.....	22
2. Le lithium.....	25
2.1. GÉNÉRALITÉS	25
2.2. HISTORIQUE.....	26
2.3. PROPRIÉTÉS PHYSIQUES.....	27
2.4. PROPRIÉTÉS CHIMIQUES	27
2.5. PROPRIÉTÉS BIOLOGIQUES, TOXICOLOGIQUES ET PHARMACEUTIQUES	29
3. La demande : usages et consommation	31
3.1. REMARQUE PRÉLIMINAIRE : FACTEURS DE CONVERSION	31
3.2. USAGES DU LITHIUM PAR DOMAINES	31
3.2.1. Industrie du verre et des céramiques	32
3.2.2. Batteries et piles.....	36
3.2.3. Graisses lubrifiantes.....	48
3.2.4. Industrie de l'aluminium.....	48
3.2.5. Traitement de l'air	49
3.2.6. Caoutchouc et thermoplastiques	51
3.2.7. Coulée continue de l'acier	52
3.2.8. Pharmacie et chimie fine	52
3.2.9. Alliages aluminium-lithium	54
3.2.10. Électronique.....	55
3.2.11. Fusion thermonucléaire militaire et civile.....	56
3.2.12. Autres usages.....	57
3.3. USAGES DU LITHIUM PAR COMPOSÉS	57
3.4. SUBSTITUTIONS.....	59

3.5. PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION DE LA DEMANDE.....	59
4. L'offre : ressources et production mondiale.....	63
4.1. LES SOURCES DE LITHIUM	63
4.1.1. Abondance du lithium dans l'écorce terrestre	63
4.1.2. Les minéraux de lithium.....	63
4.1.3. Types de gisements	65
4.1.4. Les saumures des "salars"	66
4.1.5. Les minéraux de lithium en roche	70
4.1.6. L'hectorite.....	74
4.1.7. La jadarite	74
4.1.8. Les saumures géothermales	74
4.1.9. Les saumures des champs pétrolifères	75
4.1.10. Les océans.....	76
4.2. RESSOURCES ET RÉSERVES.....	77
4.2.1. Évaluation globale des ressources et réserves.....	77
4.2.2. Les ressources de lithium en France métropolitaine	83
4.2.3. Les ressources de lithium en Guyane.....	90
4.3. PRODUCTION	90
4.3.1. Statistiques de production	90
4.3.2. Nature des produits expédiés des sites d'extraction	93
4.4. PROCÉDÉS DE PRODUCTION.....	95
4.4.1. Production de carbonate de lithium à partir des saumures	95
4.4.2. Extraction et concentration des minéraux de lithium	96
4.4.3. Production de composés de lithium à partir des minéraux.....	97
4.4.4. Production du lithium métal	97
4.5. RECYCLAGE	98
4.5.1. Recyclage des batteries	98
4.5.2. Recyclage des rebuts de fabrication.....	99
4.6. PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION DE LA PRODUCTION.....	99
5. Prix du lithium.....	103
5.1. HISTORIQUE RÉCENT DES PRIX	103
5.2. COMMENTAIRES SUR LES PRIX ET PRÉVISIONS D'ÉVOLUTION	109
5.3. ETF SUR LE LITHIUM.....	111

6. Les acteurs industriels.....	113
6.1. LES PRINCIPAUX PRODUCTEURS DE LITHIUM ET COMPOSÉS	
PRIMAIRES	113
6.1.1. Chemetall GmbH (Allemagne).....	113
6.1.2. SQM (Chili)	114
6.1.3. FMC Corporation (USA)	114
6.1.4. Talison Lithium (Australie)	115
6.1.5. Galaxy Resources (Australie)	116
6.1.6. Bikita Minerals (Zimbabwe)	116
6.1.7. Tanco (Canada)	116
6.1.8. Companhia Brasileira do Litio / CBL (Brésil).....	116
6.1.9. Arqueana de Minerios e Metais Ltda (Brésil)	117
6.1.10. Exploitants de saumures en Chine.....	117
6.1.11. Exploitants de minéraux en Chine.....	117
6.1.12. Sociedade Mineira de Pegmatites (Portugal)	118
6.1.13. Minera del Duero (Espagne)	118
6.2. LES FUTURS PRODUCTEURS DE LITHIUM ET COMPOSÉS	
PRIMAIRES (PROJETS EN DÉVELOPPEMENT).....	118
6.2.1. Acteurs développant des projets de salars	118
6.2.2. Acteurs développant des projets de minéraux	119
6.2.3. Acteur développant un projet de jadarite	120
6.2.4. Acteur développant un projet d'hectorite	120
6.2.5. Acteur développant un projet de saumure géothermale	120
6.3. LES ACTEURS FRANÇAIS.....	121
6.3.1. Producteurs miniers	121
6.3.2. Recycleurs	122
6.3.3. Fournisseurs	123
6.3.4. Verrerie	123
6.3.5. Métallurgie	123
6.3.6. Fabricants de batteries d'accumulateurs et de piles au lithium	124
6.3.7. Constructeurs de véhicules électriques (voitures et cycles).....	127
6.3.8. Défense et aérospatiale	130
6.3.9. Pharmacie.....	130
6.3.10. Nucléaire.....	131
6.4. DES COMPOSÉS DE BASE AUX PRODUITS FINIS : QUELQUES	
AUTRES ACTEURS DE L'UNION EUROPÉENNE	131
6.4.1. Allemagne	131
6.4.2. Belgique	131

6.4.3. Royaume-Uni	132
6.5. TRANSFORMATEURS DE COMPOSÉS DE LITHIUM DANS LE RESTE DU MONDE.....	132
6.5.1. Japon	132
6.5.2. Chine.....	133
6.5.3. Corée du Sud	133
6.5.4. États-Unis.....	134
6.5.5. Russie	134
6.5.6. Ukraine.....	134
6.6. PRODUCTEURS DE PILES ET BATTERIES AU LITHIUM DANS LE MONDE	134
6.7. CONSTRUCTEURS DE VOITURES ÉLECTRIQUES	135
7. Commerce extérieur de la France.....	137
8. Criticité	145
9. Bibliographie.....	147

Liste des figures

Figure 1 - Position du lithium (Li) dans le tableau périodique des éléments.....	25
Figure 2 - Lithium métal conservé dans de l'huile de paraffine	27
Figure 3 - Répartition des usages du lithium en 2008 et en 2011 (sources : Roskill, 2009- 2012).	32
Figure 4 - Répartition de la consommation de lithium dans les batteries au lithium en 2007 selon les applications (source : Roskill, 2009)	38
Figure 5 - Schéma de fonctionnement d'une batterie Li-ion (© Guibert, Saft, 2010)	39
Figure 6 - Exemples de batteries au lithium pour ordinateur portable, téléphone portable et appareil photo	39
Figure 7 - Illustration des composants d'une batterie lithium de véhicule électrique (EV). Exemple de la Mitsubishi i-MiEV (CEIS, 2011, d'après www.mitsubishi-motors.com)	41
Figure 8 - Perspective d'évolution du marché du véhicule électrique à l'horizon 2020, selon Roskill (2012).	44
Figure 9 - Exemples de piles au lithium du commerce (bouton, cylindrique, prismatique)	46
Figure 10 - Pile thermique au lithium (© www.asb-group.com)	47
Figure 11 - Exemples de gélules pharmaceutiques de carbonate et orotate de lithium	53

Figure 12 - Airbus A350 (© www.airbus.com)	55
Figure 13 - Répartition indicative de la consommation de lithium par composés. Exemple de 2008 (Roskill, 2009).	58
Figure 14 - Carbonate de lithium (© www.lithium-stocks.net).....	58
Figure 15 - Illustration d'une perspective d'évolution de la demande mondiale en lithium par secteurs.....	62
Figure 16 - Photo historique d'un cristal de spodumène de 14 m de long excavé dans la mine d'Etta (Sud-Dakota) en 1904, parue dans Economic Geology, Vol.20 (1925). (Source : www.giantcrystals.strahglen.org)	64
Figure 17 - Kunzite de Maharitra, Madagascar (www.webmineral.brgm.fr , Photo U.de Cayeux)	65
Figure 18 - Les bassins d'évaporation de SQM et SCL dans le Salar de Atacama, vus de satellite (source: Google Earth)	67
Figure 19 - Le Salar de Uyuni, en Bolivie (source : Wikimedia Commons).....	68
Figure 20 - La mine à ciel ouvert de Greenbushes (Australie-Occidentale).	71
Figure 21 - Répartition des ressources mondiales en lithium par pays (d'après USGS, 2011)	79
Figure 22 - Répartition des ressources mondiales en lithium par type de gisement (d'après Evans, 2009)	79
Figure 23 - Répartition mondiales des ressources en lithium répertoriées en 2011.	81
Figure 24 - Localisation des gîtes à lithium en France continentale	84
Figure 25- Coupe interprétative de la coupole granitique d'Échassières. La profondeur de 900 m correspond à celle du sondage de reconnaissance réalisé dans le cadre un programme Géologie Profonde de la France. (©Jébrak et Marcoux, 2008, d'après Cuney, 1992).	85
Figure 26 - Échantillon de félithe (sable lithinifère) d'Échassières produit par SKB	85
Figure 27 - Pegmatite à lépidolite dans une ancienne galerie de Chèdeville (Photo E.Gloaguen, BRGM).....	88
Figure 28 - Lépidolite (paillettes mauves, photo de gauche) et pétalite (masse blanc-crème, photo de droite) de Chèdeville.	88
Figure 29 - Répartition de la production de lithium primaire (composés et minéraux) par producteur en 2010 (sources : USGS, Cochilco, sites sociétés, sauf USA : supposé).	91
Figure 30 - Répartition des approvisionnements en lithium primaire par source en 2008 et 2011.....	94
Figure 31 - Schéma simplifié des filières du lithium (adapté et simplifié d'après Yaksic et Tilton, 2009, et Roskill, 2009)	94
Figure 32 - Schéma de production du carbonate de lithium par Chemetall à partir des saumures du Salar de Atacama et de Silver Peak (adapté d'après Garrett, 2004).	95
Figure 33 - Schéma de production du carbonate de lithium par SQM à partir des saumures du Salar de Atacama (source : www.sqm.com)	96

Figure 34 - Perspectives d'évolution de l'offre et de la demande en lithium d'ici 2020	101
Figure 35 - Indications d'évolution du prix du carbonate de lithium depuis 2003 et de l'hydroxyde depuis 2010, selon Industrial Minerals (Groupe Metal Bulletin). ...	104
Figure 36 - Indications d'évolution du prix du spodumène et de la pétalite depuis 2006 selon Industrial Minerals (Groupe Metal Bulletin).	104
Figure 37 - Évolution historique des prix du lithium depuis 1970 selon l'USGS (2011)	105
Figure 38 - Prix d'export du carbonate de lithium des trois principaux exportateurs en US\$/kg (Adapté d'après Roskill, 2009 et 2012, ex Global Trade Atlas, et Comibol, ex Chambre de Commerce de Santiago)	107
Figure 39 - Prix d'export de l'hydroxyde de lithium, en US\$/kg (Source : Roskill, 2009, ex Global Trade Atlas)	107
Figure 40 - Classement des coûts de production du carbonate de lithium par opération (adapté de Roskill, 2012).	110
Figure 41 - Fluctuations du cours de l'ETF Lithium de Global X Funds depuis sa création mi-2010 (source : Google Finance)	111
Figure 42 - Usine de Constellium d'Issoire (© www.constellium.fr).....	124
Figure 43 - Différents types de batteries Li-ion Saft (cylindriques et prismatiques pour applications mobiles, pack de 48 V pour systèmes de secours fixes (© www.saftbatteries.com).....	125
Figure 44 - Batterie Lithium-Métal-Polymère de Batscap (© www.bluecar.fr).....	126
Figure 45 - Batterie Lithium-ion de E4V (© www.e4v.eu)	126
Figure 46 - La Bluecar™ de Bolloré-Pininfarina (© www.bluecar.fr)	127
Figure 47 - La voiture électrique avec batterie au lithium de Mia Electric (© www.mia-voiture-electrique.com)	128
Figure 48 – de gauche à droite, la Mitsubishi i-MiEV (© www.mitsubishi-motors.com), la Peugeot iOn (© www.peugeot.fr) et la Citroën C-Zero (© www.citroën.fr)	128
Figure 49 - Les véhicules électriques Renault avec batteries Li-ion au catalogue en 2012 (Kangoo ZE, Fluence ZE et Twizy, © www.renault.fr)	129
Figure 50 - La Furtive E-GT d'Exagon Motors (© J. Detour, source www.exagon-motors.fr)...	130
Figure 51 - Synthèse de la criticité du lithium.....	145

Liste des tableaux

Tableau 1 - Les isotopes du lithium.	26
Tableau 2 - Quelques caractéristiques physiques de quelques composés du lithium.	29
Tableau 3 - Toxicité des composés du lithium chez la souris et le rat. Source : INRS, 2000.	30
Tableau 4 - Teneur en lithium de certains de ces composés, et correspondances des tonnages en oxyde et en équivalent carbonate de lithium	31
Tableau 5 - Production verrière de l'UE 27 et des trois premiers producteurs européens (Allemagne, France, Italie), en milliers de tonnes (kt)	33
Tableau 6 - Consommation de lithium dans les secteurs du verre et des céramiques, 2002-2008 (estimations Roskill, 2009)	36
Tableau 7 - Comparatif des performances des principaux types de batteries.	37
Tableau 8 - Quantification des besoins en lithium pour différents véhicules électriques et batteries. Adapté d'après Gaines et Nelson (2010)	42
Tableau 9 - Comparatif des besoins en lithium pour divers objets utilisateurs de batteries au lithium (par unité d'objet). Source : Roskill (2009) d'après Trade Press.	42
Tableau 10 - Estimation de la pénétration du marché par les véhicules électriques à l'horizon 2020 (Hocquard, 2009)	43
Tableau 11 - Quantité de lithium (en LCE ou en Li) contenu selon le type de véhicule électrique considéré (Hocquard, 2009)	43
Tableau 12 - Estimation de la quantité de lithium demandée par le secteur des batteries pour véhicules électriques à l'échéance 2020 (d'après Hocquard, 2009)	44
Tableau 13 - Estimation des besoins en lithium pour les batteries des véhicules électriques en 2020, dans l'hypothèse de 6 millions de véhicules électriques vendus dont 4,9 au lithium (Roskill, 2012) et des hypothèses hautes et basses de besoins par véhicule.	45
Tableau 14 - Taux de croissance annuel moyen de la consommation de lithium par secteur d'ici 2020, selon les auteurs	61
Tableau 15 - Les principaux minéraux de lithium et leur composition.	64
Tableau 16 - Récapitulatif des principaux gisements de lithium en saumure répertoriés	69
Tableau 17 - Principaux gisements de lithium en minéraux répertoriés	72
Tableau 18 - Récapitulatif des réserves et ressources mondiales en lithium par pays, en kt de Li contenu, selon USGS (Jaskula, janv.2011)	78
Tableau 19 - Répartition des ressources mondiales en lithium par type de gisement (d'après Evans, 2009)	78
Tableau 20 - Récapitulatif des ressources mondiales en lithium répertoriées (source : Tableaux 16 et 17)	80
Tableau 21 - Production primaire de lithium par producteurs depuis 2001	92
Tableau 22 - Perspectives de production de lithium d'ici 2020 dans l'hypothèse maximaliste d'une atteinte des capacités prévues par les producteurs.	100

Tableau 23 - Valeur d'export du carbonate de lithium par les sociétés SQM et SCL entre 1998 et 2010 (sources : Roskill 2009 d'après la Banque Centrale du Chili et Comibol 2011 d'après la Chambre de Commerce de Santiago).	108
Tableau 24 - Tonnages et valeurs des principales exportations chinoises de lithium en 2011 (Source : www.metal-pages.com/news/story/60460/china-2011-lithium-exports-up-105/)	109
Tableau 25 - Statistiques françaises d'import-export de carbonate, oxyde/hydroxyde et niobate de lithium. Données CAF-FAB hors matériel militaire. Source : Douanes françaises	138
Tableau 26 - Statistiques françaises d'import-export d'accumulateurs au lithium. Données CAF-FAB hors matériel militaire. Quantités en nombre de pièces. Source : Douanes françaises.	140
Tableau 27 - Statistiques françaises d'import-export de piles cylindriques au lithium. Données CAF-FAB hors matériel militaire. Quantités en nombre de pièces. Source : Douanes françaises.	141
Tableau 28 - Statistiques françaises d'import-export de piles au lithium, autres que cylindriques et bouton. Données CAF-FAB hors matériel militaire. Quantités en nombre de pièces. Source : Douanes françaises.	142
Tableau 29 - Statistiques françaises d'import-export de piles bouton au lithium, et résultats cumulés toutes piles lithium et piles + batteries rechargeables. Données CAF-FAB hors matériel militaire. Quantités en nombre de pièces. Source : Douanes françaises.	143

1. Introduction

Cette étude a été réalisée dans le cadre de la Convention 2011 n°2100485270 relative aux eaux souterraines, aux ressources minérales, au littoral et à l'organisation des connaissances sur la nature et les paysages, signée le 31 août 2011 entre la Direction de l'Eau et de la Biodiversité du Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement (MEDDTL) et le BRGM.

1.1. DÉFINITIONS

Le glossaire ci-dessous donne la définition de certains termes utilisés de manière récurrente dans ce rapport. Il importe, notamment pour permettre des comparaisons entre différentes sources nationales et internationales relatives aux matières premières minérales, que ces termes soient utilisés de manière standardisée et rigoureuse. C'est malheureusement loin d'être le cas, des termes aussi importants que ressources et réserves étant utilisés de manière disparate.

Criticité : cette étude vise notamment à déterminer les facteurs de criticité pouvant impacter la sécurité des approvisionnements nécessaires aux industries françaises utilisant la/les matière(s) première(s) minérale(s) étudiée(s). Les facteurs sont déterminés et notés selon la grille suivante :

Évaluation de la criticité	Note
Très forte	5
Forte	4
Moyenne	3
Faible	2
Très faible	1

Gisement : concentration naturelle de minéraux, économiquement exploitable.

Indice ou prospect : il s'agit d'une minéralisation dont l'existence est connue grâce à des observations de terrain, éventuellement étayées par quelques sondages et petits travaux miniers (tranchées, galeries de reconnaissance...) et/ou par des observations indirectes (géochimie, géophysique) mais dont l'intérêt économique n'est pas encore démontré.

Minéral/minéraux : désigne une substance inorganique, d'origine naturelle, caractérisée par sa formule chimique et par l'arrangement de ses atomes selon une structure géométrique particulière.

Minerai : désigne une roche contenant une concentration d'un ou plusieurs minéraux en quantité suffisante pour être économiquement exploitable.

Minéralisation : désigne une concentration naturelle élevée de minéraux dont l'exploitation pourrait présenter un intérêt économique. Il s'agit d'un concept plus large que le terme minerai qui, dans les gisements, désigne la partie exploitable de la minéralisation.

Primaire : ce qualificatif, appliqué à un métal, ou à une production de métal, indique du métal produit à partir d'un minerai, en dehors de tout recyclage.

Potentiel géologique : il s'agit d'une première estimation, basée sur des critères et des raisonnements géologiques, de l'existence de gisements dans une région ou un pays.

Réserve : il s'agit de la partie de la ressource dont l'exploitabilité technologique et économique a été démontrée lors d'une étude de faisabilité.

Ressource : il s'agit d'une minéralisation dont l'enveloppe et le volume ont fait l'objet d'une première estimation, encore imprécise, à l'aide de sondages, de petits travaux miniers, de prospection en surface et/ou d'observations indirectes par géochimie, géophysique, etc.

Secondaire : ce qualificatif, appliqué à un métal, ou à une production de métal, indique du métal produit à partir du recyclage de déchets, qui peuvent être des produits manufacturés usagés en fin de vie, mais aussi des chutes de fabrication (copeaux, poussières, coulures, bavures, etc.).

1.2. CONDITIONS ET LIMITES DE RÉALISATION DE CETTE ÉTUDE

Cette étude a été réalisée au cours du dernier trimestre 2011 par le Service Ressources Minérales du BRGM, appuyé par la Compagnie Européenne d'Intelligence Stratégique (CEIS), dans le cadre d'un contrat de sous-traitance. La complexité, l'opacité de la filière, la rareté de la documentation ainsi que le temps limité disponible pour réaliser cette étude en conditionnent le contenu.

Malgré l'utilisation des meilleures sources ouvertes disponibles et le soin apporté à la rédaction de cette étude, le BRGM n'est pas en mesure de garantir l'exactitude des informations et des données citées. L'industrie du lithium n'est pas toujours transparente et les données ouvertes peuvent être incomplètes et/ou sujettes à erreurs, intentionnelles ou non.

À noter que le lithium fait partie des 41 substances minérales passées en revue par l'étude sur les matières premières critiques pour l'Union Européenne ("Critical Materials for the E.U.") publiée le 30 juillet 2010 par la Commission Européenne dans le cadre de l'Initiative Matières Premières, mais il n'a pas été classé parmi les 14 substances retenues comme particulièrement critiques.

1.3. SOURCES DES DONNÉES

Ce rapport a été produit à partir de l'importante documentation technique du BRGM, incluant notamment (voir liste bibliographique en fin de rapport) :

- les bases de données et rapports publics de l'United States Geological Survey (USGS) (Jaskula, 2009, 2010, 2011) ;
- le document : "The Economics of Lithium, 11th edition 2009", une étude spécialisée sur le lithium produite par Roskill Information Services Ltd en février 2009 ;

- les nombreuses publications récentes sur le marché et les disponibilités en lithium, et notamment Garrett (2004), Evans (2007, 2008) ; Tahil (2007, 2008) ; Yaksic & Tilton (2009) ; Gruber & Medina (2010, 2011) ; Grosjean et al (2011) ;
- la documentation historique des travaux propres du BRGM depuis 1959 ;
- le rapport sur les matières premières stratégiques de la Commission Européenne ;
- les informations ouvertes et disponibles en ligne des diverses sociétés productrices de lithium et de certaines sociétés utilisatrices et dont les adresses internet sont en général mentionnées au cours du texte.

ainsi que nombre d'informations ouvertes rassemblées ou consultées dans le cadre de cette étude.

2. Le lithium

2.1. GÉNÉRALITÉS

Le lithium est le troisième élément chimique du tableau périodique de Mendeleïev (Groupe IA, éléments monovalents). Son noyau contient 3 protons et 3 ou 4 neutrons. C'est un métal de la famille des alcalins, qui comprend aussi le sodium et le potassium, ainsi que le rubidium et le césium :

- symbole : Li ;
- numéro atomique : 3 ;
- masse atomique : 6,941 ;
- abondance dans la croûte terrestre : 20 ppm (20 g/t) ;
- concentration dans l'eau de mer : 0,18 mg/litre.

Figure 1 - Position du lithium (Li) dans le tableau périodique des éléments.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57-71 Lanthanides	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89-103 Actinides															
Lanthanides :			57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
Actinides :			89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

Figure 1 - Position du lithium (Li) dans le tableau périodique des éléments.

Il n'existe que deux isotopes naturels et stables du lithium, le ^6Li avec 3 neutrons et le ^7Li avec 4 neutrons. Un troisième isotope, le ^8Li , instable et radioactif, est produit artificiellement (Tab. 1)

Isotope	Abondance naturelle	Période radioactive
${}^6\text{Li}$	7,5 %	stable
${}^7\text{Li}$	92,5 %	stable
${}^8\text{Li}$	synthétique	0,838 s

Tableau 1 - Les isotopes du lithium.

2.2. HISTORIQUE

Johan August Arfvedson, alors étudiant en chimie suédois, découvrit, en 1817, en analysant de la pétalite³ provenant de l'île suédoise d'Utö, un nouveau sel identifié comme un sel de métal alcalin différent du sodium et du potassium. Les mêmes sels ont ensuite été identifiés à partir de la lépidolite et du spodumène de la même origine.

Jöns Jacob Berzelius, un des fondateurs de la chimie moderne et l'un des professeurs d'Arfvedson, proposa le nom de "lithium", du grec "lithos" (pierre) pour mettre en exergue son origine minérale par opposition au sodium et au potassium qui avaient été isolés 10 ans auparavant (en 1807) par Sir Humphrey Davy à partir de la soude et de la potasse, lesquelles étaient alors produites à partir de cendres végétales.

L'année suivante, en 1818, les chimistes britanniques Sir H. Davy et W.T. Brande réussirent à isoler le lithium par électrolyse de l'oxyde de lithium fondu.

En 1855, l'allemand R.W. Bunsen et l'anglais A. Matthiessen isolèrent davantage de lithium par électrolyse du chlorure fondu.

Ce n'est ensuite qu'en 1923 que la firme allemande Metallgesellschaft en commencera une production industrielle commerciale par électrolyse du mélange chlorure de lithium - chlorure de potassium fondus.

Le lithium et ses composés étaient peu utilisés jusqu'à la deuxième guerre mondiale. Auparavant, l'une des premières utilisations du lithium, en deuxième moitié du 19^{ème} siècle, était la consommation d'eaux minérales lithinées (riches en lithium) pour leurs propriétés toniques, mais aussi en traitement de la maladie de la goutte. Les utilisations concernaient aussi l'industrie de la céramique afin d'obtenir des couleurs vitrifiables.

³ Minéral contenant du lithium désormais connu comme $\text{LiAl}(\text{Si}_2\text{O}_5)_2$.

2.3. PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

Sous sa forme pure, c'est un métal mou et sécable, de couleur blanc argenté sur section fraîche mais ternissant rapidement à l'air par oxydation.

C'est le plus léger de tous les métaux, il est près de deux fois plus léger que l'eau :

- densité : 0,534
- point de fusion : 180,5°C ;
- point d'ébullition : 1 342°C.

2.4. PROPRIÉTÉS CHIMIQUES

Le lithium est un métal alcalin, avec un seul électron de valence. Comme les autres métaux alcalins, c'est un réducteur fort. Sa réactivité avec l'oxygène, les halogènes, l'eau est toutefois un peu moins vive que celle des autres alcalins. À l'inverse, il donne des combinaisons plus stables avec l'hydrogène, l'azote, le carbone.

C'est un métal blanc argenté sur section fraîche. Dans l'air très sec à température ambiante, il peut garder son éclat métallique pendant quelques jours mais finit par se recouvrir d'une fine couche d'oxyde, de carbonate et de nitrure. En revanche, dans l'air humide, il ternit en quelques secondes, l'attaque étant catalysée par la vapeur d'eau, avec formation aussi d'hydroxyde LiOH. En laboratoire, on le conserve donc dans de l'huile de paraffine.



Figure 2 - Lithium métal conservé dans de l'huile de paraffine.

Le métal ne s'enflamme dans l'oxygène sec qu'au-dessus de 200°C en donnant l'oxyde Li_2O blanc. La combustion du lithium est très exothermique et s'accompagne de l'émission d'une intense lumière blanche comme celle du magnésium.

Le lithium réduit l'eau à la température ambiante, avec formation d'hydroxyde de lithium ou lithine LiOH et dégagement d'hydrogène, mais la réduction est moins vive que pour les autres alcalins et se fait sans inflammation spontanée de l'hydrogène. La

lithine fond à 473°C et se décompose dès la température de 700°C en Li_2O et vapeur d'eau. La lithine en solution aqueuse est une base forte.

Certaines de ses propriétés le rapprochent plus du magnésium que des autres métaux alcalins, comme l'insolubilité de son carbonate dans l'eau pure et de son phosphate.

Le peroxyde Li_2O_2 peut être obtenu par réaction avec l'eau oxygénée H_2O_2 .

Le lithium réduit un grand nombre d'oxydes. La silice est réduite dès la température de fusion du métal. La réaction qui est fortement exothermique interdit la manipulation du lithium liquide dans des appareils en verre.

Comme tous les alcalins, le lithium se combine à l'hydrogène pour donner un hydruure salin LiH , dans lequel l'hydrogène se comporte comme un élément électronégatif. La liaison métal-hydrogène dans LiH , contrairement aux autres hydruures salins, est plus covalente qu'ionique, de plus LiH est très stable thermiquement et fond sans se décomposer vers 700°C. LiH est un composé très important du lithium : il permet la préparation de nombreux hydruures, dont LiAlH_4 , réducteur puissant très utilisé en chimie organique.

Au contact du fluor, le lithium s'enflamme dès la température ambiante. Il faut, au contraire, chauffer pour le voir brûler dans le chlore, le brome et l'iode à l'état gazeux.

Le soufre et le lithium réagissent violemment à chaud pour donner le sulfure Li_2S et des polysulfures. Le phosphore produit avec le lithium un phosphure qui, au contact de l'eau, dégage de l'hydrogène phosphoré spontanément inflammable. L'azote réagit lentement dès la température ambiante et plus totalement au-dessus de 500°C pour donner le nitrure Li_3N .

Le carbone s'unit directement à chaud pour donner un carbure ionique Li_2C_2 , de couleur blanche, qui est un réducteur énergique. Moins stable thermiquement que CaC_2 , le carbure de lithium présente néanmoins de nombreuses analogies avec lui : il réagit sur l'eau à froid avec dégagement d'acétylène, et à chaud sur l'ammoniac avec formation de cyanamide Li_2CN_2 .

La combinaison du lithium avec les dérivés halogénés organiques en solution dans l'éther de pétrole, un éther-oxyde ou le benzène anhydre donne naissance à une famille de composés organométalliques importants : les organolithiens Li-R (R : méthyle, éthyle, phényle, etc.).

En métallurgie, des cartouches de lithium pur sont utilisées pour dégazer, désoxyder ou désulfurer des bains de métaux liquides. Le lithium est aussi utilisé pour durcir certains alliages de plomb.

Le tableau 2 ci-après donne les caractéristiques de quelques composés communs du lithium.

	Formule	Masse molaire	Point de fusion	Point d'ébullition à la pression atmosphérique	Densité à 20°C	Solubilité
Lithium	Li	6,941	180,5°C	1 336°C	0,534	Réaction dangereuse avec l'eau et les alcools ; soluble dans l'ammoniac liquide
Carbonate de lithium	Li ₂ CO ₃	73,89	723°C	se décompose à 1 200°C	2,11	Peu soluble dans l'eau (13,3 g/l à 20°C), insoluble dans l'éthanol
Chlorure de lithium	LiCl	42,39	614°C	se décompose à 1 382°C	2,068	Soluble dans l'eau (454 g/l à 20°C) et les solvants organiques polaires
Oxyde de lithium	Li ₂ O	29,88	1 570°C		2,013	S'hydrolyse violemment avec l'eau en LiOH
Hydroxyde de lithium	LiOH	23,95	462°C	se décompose à 924°C	1,51	Soluble dans l'eau (216 g/l à 20°C), légèrement soluble dans l'éthanol
Peroxyde de lithium	Li ₂ O ₂	45,88	se décompose à 340°C		2,36	Réagit vivement avec l'eau en LiOH et O ₂
Hydruure de lithium	LiH	7,95	689°C	se décompose à 850°C	0,782	Réaction dangereuse avec l'eau et les alcools
Stéarate de Lithium	CH ₃ ⁻ (CH ₂) ₁₆ ⁻ COOLi	290,41	220°C		1,025	Pratiquement insoluble dans l'eau (0,1 g/l à 18°C) et l'éthanol

Tableau 2 - Quelques caractéristiques physiques de quelques composés du lithium.

2.5. PROPRIÉTÉS BIOLOGIQUES, TOXICOLOGIQUES ET PHARMACEUTIQUES

Le lithium n'a pas de rôle biologique connu.

Des sels de lithium ont des propriétés médicales en neurologie et psychiatrie, pour la régulation de l'anxiété et de l'irritabilité, et le traitement des troubles bipolaires (troubles maniaco-dépressifs), mais son action sur le cerveau n'est pas encore entièrement comprise.

Des composés de lithium en vente libre en pharmacie aux doses thérapeutiques, comme Li-oligosol, Microsol-Li, Oligogranul-Li, Oligostim-Li, Téralithe, Granions de Li.

La lithiémie (concentration de lithium dans le sang humain) habituelle est inférieure à 60 µg/l. Le taux thérapeutique (neurologie et psychiatrie) est classiquement entre 4 et 6 mg/litre.

Des symptômes de toxicité interviennent à partir de 10 mg/l, et le pronostic vital est engagé à partir d'une lithiémie de 35 mg/l. L'élimination du lithium se fait entre 6 et 8 h principalement par voie urinaire (mais les larmes et la salive peuvent en contenir aussi).

Le tableau suivant reprend les Dosages Létaux 50 (DL50) qui indiquent la masse de substance requise pour que meure la moitié de la population expérimentale. Plus DL50 est petit et plus la substance est toxique.

En général, si la DL50 est semblable chez tous les types d'animaux, elle sera probablement semblable chez les humains. Lorsque les DL50 sont différentes chez diverses espèces animales, des approximations et des hypothèses seront nécessaires lors de l'estimation de la dose mortelle probable chez les humains.

En mg/kg	Carbonate de Li	Chlorure de Li	Sulfate de Li	Benzoate de Li
DL50 (souris)	531	1 165	1 190	1 198
DL50 (rat)	710	757		

*Tableau 3 - Toxicité des composés du lithium chez la souris et le rat.
Source : INRS, 2000.*

3. La demande : usages et consommation

3.1. REMARQUE PRÉLIMINAIRE : FACTEURS DE CONVERSION

Selon les secteurs, le lithium est utilisé sous forme de minéraux (spodumène, pétalite, lépidolite, amblygonite), de carbonate (Li_2CO_3), d'oxyde (Li_2O), de lithium métallique (Li) et d'autres composés. Dans les statistiques de consommation comme de production ou de ressources et réserves, les quantités peuvent être communiquées, selon les sources et les secteurs, en tonnage de lithium contenu, en tonnage de Li_2O contenu, en tonnage de Li_2CO_3 contenu, voire en tonnage équivalent de carbonate de lithium ("Lithium-Carbonate-Equivalent", LCE), c'est-à-dire, même lorsqu'il n'est pas ou plus sous forme de carbonate, à quelle quantité de carbonate il correspondrait.

Par souci de cohérence et d'homogénéité, et pour permettre une consolidation multisectorielle, nous avons essayé, sauf mention contraire, de convertir l'essentiel des quantités en tonnage de lithium contenu.

Composé	Formule	Teneur en Li	Correspondances	en Li_2O	en LCE (Lithium Carbonate Equivalent)
Lithium métallique	Li	100%	1 kg Li =>	2.15 kg Li_2O	5.32 kg LCE
Carbonate de lithium	Li_2CO_3	18.79%	1 kg Li_2CO_3 =>	0.40 kg Li_2O	1.00 kg LCE
Oxyde de lithium	Li_2O	46.46%	1 kg Li_2O =>	1.00 kg Li_2O	2.47 kg LCE
Hydroxyde de lithium	LiOH	28.98%	1 kg LiOH =>	0.62 kg Li_2O	1.54 kg LCE
Hydroxyde de lithium monohydraté	$\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$	16.54%	1 kg $\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$ =>	0.36 kg Li_2O	0.88 kg LCE
Spodumène	$\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$	3.73%	1 kg spodumène =>	0.08 kg Li_2O	0.20 kg LCE
Pétalite	$\text{LiAlSi}_4\text{O}_{10}$	2.27%	1 kg pétalite =>	0.05 kg Li_2O	0.12 kg LCE
Lépidolite	$\text{KLi}_2\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$	~1.92%	1 kg lépidolite =>	~0.04 kg Li_2O	~0.10 kg LCE
Chlorure de lithium	LiCl	16.37%	1 kg LiCl =>	0.35 kg Li_2O	0.87 kg LCE
Bromure de lithium	LiBr	7.99%	1 kg LiBr =>	0.17 kg Li_2O	0.43 kg LCE
Butyllithium	$\text{C}_4\text{H}_9\text{Li}$	10.84%	1 kg $\text{C}_4\text{H}_9\text{Li}$ =>	0.23 kg Li_2O	0.58 kg LCE

Tableau 4 - Teneur en lithium de certains de ces composés, et correspondances des tonnages en oxyde et en équivalent carbonate de lithium

3.2. USAGES DU LITHIUM PAR DOMAINES

La consommation mondiale de lithium s'est accrue d'environ 6 % par an entre 2000 et 2008 pour atteindre 21 300 t en 2008. Elle s'est contractée à 18 800 t en 2009 en liaison avec la crise financière, pour remonter à 25 300 t en 2010 (USGS, 2011).

La figure 2 ci-après illustre la répartition par secteurs en 2008 et 2011.

L'usage dominant reste celui de l'industrie du verre et des céramiques, suivi de celle des batteries et des lubrifiants. Mais la consommation pour les batteries est celle qui a connu la plus forte croissance ces 10 dernières années.

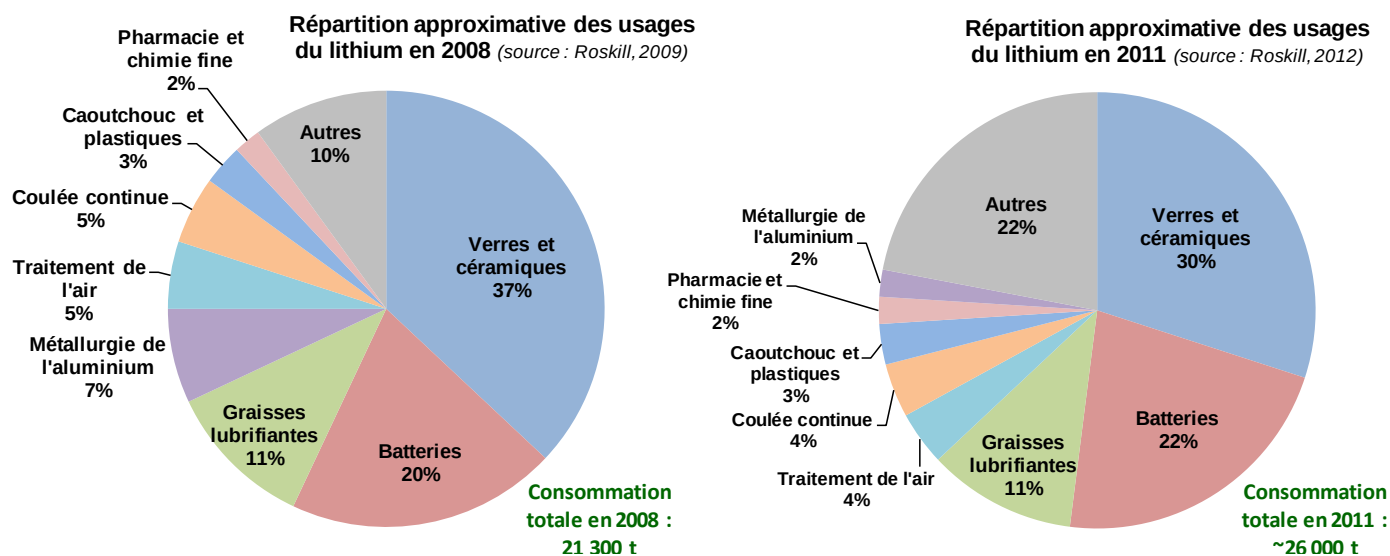


Figure 3 - Répartition des usages du lithium en 2008 et en 2011 (sources : Roskill, 2009-2012).

3.2.1. Industrie du verre et des céramiques

Le lithium est utilisé sous forme d'oxyde, de carbonate ou de minéraux (spodumène) comme additif dans la fabrication de certains verres et céramiques, ainsi que pour les produits vitro-céramiques. Ce secteur compte pour environ un tiers de la consommation mondiale de lithium (37 % en 2008, 30 % en 2011).

Dans l'industrie du verre

L'industrie du verre peut se subdiviser en plusieurs branches spécifiques :

- le verre creux (bouteilles, pots, flacons, vaisselle) : environ 50 % de la consommation mondiale ;
- le verre plat (vitres dans le bâtiment, l'automobile, etc.) : environ 38 % de la consommation mondiale ;
- la fibre de verre, environ 6 % de la consommation mondiale ;
- les verres de spécialité et usages divers (ampoules, écrans LCD⁴ et CRT, optique, etc.) : environ 5 % de la consommation mondiale.

Les statistiques mondiales de production de verre sont incomplètes. Elle était estimée à environ 135 Mt en 2007 toutes spécialités confondues.

Avec 32 Mt en 2010, l'Union Européenne représente environ un quart de la production industrielle mondiale de verre. Après avoir été deuxième producteur européen depuis

⁴ LCD : Liquid Crystal Display (écrans plats) ; CRT : Cathode Ray Tube (écrans à tube cathodique)

longtemps derrière l'Allemagne, la France a régressé en troisième place en 2010, avec 4,62 Mt produits en 2010, derrière l'Italie (Tab.4).

La production verrière française provient pour environ 60 % de verre recyclé.

Le chiffre d'affaires de la production verrière en France a été de 3 791 M€ en 2010, dont 34 % à l'exportation.

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
ALLEMAGNE											
Verre plat	1 868	1 802	1 786	1 500	1 508	1 551	1 682	1 758	1 832	1 738	2 183
Verre d'emballage	4 268	4 164	4 208	4 105	3 908	3 888	4 080	4 142	3 779	3 797	<i>n.d.</i>
Verre domestique	310	303	345	316	328	328	265	342	309	241	194
Fibres	769	731	773	806	847	788	337	391	385	238	289
Autres verres	474	463	412	376	366	255	265	75	255	312	345
Total	7 689	7 463	7 524	7 103	6 958	6 810	6 630	6 708	6 559	6 325	<i>n.d.</i>
FRANCE (hors production artisanale manuelle)											
Verre plat	861	832	888	937	1 147	1 098	1 151	1 155	993	820	890
Verre d'emballage	3 827	3 763	3 820	3 821	3 748	3 798	3 845	3 744	3 579	3 154	3 152
Verre domestique	519	477	477	440	446	402	394	392	319	225	280
Fibres	209	224	212	222	221	229	254	273	284	231	272
Autres verres	111	101	99	109	99	41	43	41	41	25	32
Total	5 526	5 397	5 496	5 529	5 661	5 569	5 687	5 605	5 217	4 455	4 626
ITALIE											
Verre plat	1 009	1 006	911	969	978	1 183	1 142	1 125	1 068	850	922
Verre d'emballage	3 246	3 310	3 522	3 542	3 583	3 543	3 549	3 621	3 674	3 332	3 507
Verre domestique	164	176	174	176	173	173	172	169	161	136	150
Fibres	135	136	121	128	128	130	154	155	137	68	115
Autres verres	360	300	250	200	150	100	80	0	0	0	0
Total	4 914	4 927	4 979	5 016	5 012	5 130	5 097	5 070	5 040	4 386	4 694
TOTAL UE27											
Verre plat											9 405
Verre d'emballage											19 886
Verre domestique											1 016
Fibres											713
Autres verres											1 005
Total											32 026

Tableau 5 - Production verrière de l'UE 27 et des trois premiers producteurs européens (Allemagne, France, Italie), en milliers de tonnes (kt).

(source : Comité Permanent des Industries de Verre Européennes, www.cpivglasse.be)

Les verres sont essentiellement des silicates calco-sodiques⁵ amorphes (sans structure cristalline), avec divers autres composants minoritaires (le plus souvent des oxydes) selon les qualités recherchées.

⁵ composés essentiellement de silice et d'oxydes de calcium et de sodium

L'ajout éventuel d'oxyde de lithium, généralement introduit sous forme de carbonate ou de minéral (essentiellement spodumène, mais aussi pétalite et lépidolite), permet les avantages suivants :

- abaissement de la température de fusion (économie d'énergie) ;
- meilleur taux de fusion, abaissement de la viscosité, moins de bulles (moins de rejets) ;
- moindre coefficient de dilatation thermique ;
- meilleure résistance chimique.

Les quantités de lithium ajoutées peuvent aller de 0,2 à 0,7 % pour la fibre de verre et de 0,1 à 0,25 % pour le verre d'emballage et autres verres (Roskill, 2009).

En 2008, la consommation mondiale de lithium dans l'industrie du verre s'établissait à environ 2 810 t contenu, dont 58 % sous forme de minéraux et 42 % sous forme de carbonate de lithium ou autres composés (Roskill, 2009, cf. Tab.5).

En 2008, on prévoyait une croissance mondiale de production de verres d'environ 4,35 % par an d'ici 2013, par extrapolation de la croissance moyenne constatée entre 1998 et 2007. Ces prévisions sont à revoir avec les conséquences toujours incertaines des crises de 2008-2009 et de 2011.

Dans l'industrie des céramiques

L'industrie de la céramique comprend essentiellement les productions classiques de carrelages (sol et murs), de sanitaires, de vaisselle, d'accessoires de cuisine et de décoration (environ 130 Mt/an au total en 2007), ainsi que les céramiques techniques (céramiques réfractaires, prothèses médicales et dentaires, composants de fours, matériaux composites) et les traitements de surface (émaux).

Les céramiques sont composées d'alumino-silicates microcristallins obtenues par cuisson de mélanges minéraux et en particulier d'argiles. L'adjonction de lithium dans les céramiques, sous forme de carbonate ou de minéraux (spodumène, pétalite et amblygonite) améliore la qualité des mélanges (alumine, kaolin, chaux, acide borique, alumine etc.), réduit la température de cuisson, améliore la résistance du matériau final et sa couleur.

En 2008, la consommation mondiale de lithium dans l'industrie des céramiques s'établissait à environ 3 200 t de lithium contenu, dont 57 % sous forme de minéraux et 43 % sous forme de carbonate de lithium (Roskill, 2009, cf. Tab.6)

En 2008, on prévoyait une croissance mondiale de production de céramiques d'environ 3,3 % par an d'ici 2013, pour l'amener vers 158 Mt. Ces prévisions sont à revoir avec les conséquences toujours incertaines des crises de 2008-2009 et de 2011.

Dans les vitro-céramiques

Les vitrocéramiques sont des composés biphasés intermédiaires entre les verres (amorphes) et les céramiques (microcristallines) obtenues par microcristallisation contrôlée des verres.

Les plus communes sont les vitrocéramiques "LAS", composés de LiO_2 , Al_2O_3 , MgO et SiO_2 avec en constituants mineurs (agents nucléants) ZrO_2 , TiO_2 , ZnO ou BaO . Ils sont constitués d'environ 10^{16} microcristaux par cm^3 dans une matrice vitreuse. Lors de la recristallisation, il se forme des microcristaux de β -quartz en dessous de 900°C et de β -spodumène⁶ au-dessus de 1000°C .

En raison d'un coefficient de dilatation thermique négatif du spodumène et positif de la phase vitreuse, l'ajustement des proportions permet d'obtenir le coefficient de dilatation choisi, éventuellement nul (obtenu à 70 % à 78 % de cristallinité), ou égal à celui d'un éventuel support métallique.

Les propriétés intéressantes des vitrocéramiques LAS sont :

- un coefficient de dilatation thermique quasi nul ou contrôlé ;
- une bonne stabilité et durabilité à haute température ;
- une haute résistance mécanique ;
- une bonne transparence aux infra-rouges ;
- une bonne résistance aux chocs thermiques et à de rapides changements de températures jusqu'à 800°C - 1000°C .

Ces matériaux avaient été développés à l'origine pour les nez de missiles dans les années 1950, et sont désormais popularisés dans des plaques chauffantes et ustensiles de cuisson grand public. Ils sont aussi utilisés dans l'optique pour télescopes, des fenêtres de fours, et pour des catalyseurs.

On produit aussi, de manière plus secondaire, des vitrocéramiques sans lithium (MAS au magnésium, BMAS au magnésium et baryum, et BAS au baryum).

En 2008, la consommation mondiale de lithium dans le domaine des vitrocéramiques s'établissait à environ 1 750 t de Li contenu, dont 69 % sous forme de minéraux et 31 % sous forme de carbonate de lithium ou autres composés (Roskill, 2009, cf. Tab.6).

Les plaques et ustensiles de cuisson représentent environ 90 % de cette consommation.

Le tableau 6 ci-après récapitule les consommations récentes de lithium dans les secteurs du verre et de la céramique.

⁶ Le spodumène naturel $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$ cristallise dans le système monoclinique, et il change de structure cristalline au dessus de 1080°C pour passer en système quadratique, le β -spodumène.

Secteur	Forme utilisée	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Verre	Carbonate de lithium (en t Li ₂ CO ₃)	4 185	4 310	5 550	6 450	6 850	6 240	6 300	
	Minéraux de lithium (en t Li ₂ O)	2 675	2 330	2 640	2 790	2 890	3 150	3 500	
	Total en t Li contenu	2 029	1 892	2 269	2 508	2 630	2 636	2 810	
Céramiques	Carbonate de lithium (en t Li ₂ CO ₃)	7 235	6 150	6 470	7 260	7 600	7 700	7 400	
	Minéraux de lithium (en t Li ₂ O)	4 250	4 110	4 250	4 200	4 300	4 040	3 900	
	Total en t Li contenu	3 334	3 065	3 190	3 315	3 425	3 323	3 202	
Vitrocéramique	Carbonate de lithium (en t Li ₂ CO ₃)	2 000	1 900	2 100	2 500	2 700	2 800	2 900	
	Minéraux de lithium (en t Li ₂ O)	1 800	1 900	2 000	2 100	2 300	2 500	2 600	
	Total en t Li contenu	1 212	1 240	1 324	1 445	1 576	1 687	1 753	
Total	Carbonate de lithium (en t Li ₂ CO ₃)	13 420	12 360	14 120	16 210	17 150	16 740	16 600	
	Minéraux de lithium (en t Li ₂ O)	8 725	8 340	8 890	9 090	9 490	9 690	10 000	
	Total en t Li contenu	6 575	6 197	6 783	7 268	7 631	7 647	7 764	

Tableau 6 - Consommation de lithium dans les secteurs du verre et des céramiques, 2002-2008 (estimations Roskill, 2009)

En moyenne de 2002 à 2008, la consommation cumulée en lithium du secteur verres et céramiques aura crû de 2,8 % par an. Après la crise de 2009 et ses séquelles en 2010-2011, il est attendu une croissance similaire d'ici à 2020, de l'ordre de 3 à 4 % par an.

3.2.2. Batteries et piles

Des quantités croissantes de lithium et de composés de lithium sont utilisées dans les industries des piles (non-rechargeables) et des batteries rechargeables.

La consommation mondiale de lithium dans le secteur des piles était estimé en 2008 à 245 t de Li contenu, et dans celui des batteries à 3 940 t de Li contenu (16 fois plus), en forte croissance.

Batteries rechargeables (accumulateurs) au lithium

La technologie dominante des batteries rechargeables au long du XX^{ème} siècle a été celle des batteries plomb - acide sulfurique, toujours très largement utilisée dans les transports (véhicules à moteurs thermiques), les groupes électrogènes et générateurs de secours (secteur médical, communication, batteries tampon des systèmes photovoltaïques) et autres dispositifs lourds. Les technologies sont éprouvées, mais ces batteries sont lourdes, avec un rendement énergétique rapporté au poids permettant difficilement des utilisations dans les appareils portables, et elles sont mal adaptées aux véhicules électriques en raison de la masse qu'elles imposent de transporter. Les batteries électriques au plomb - acide équipent toutefois aussi et encore la grande majorité des nombreux vélos électriques utilisés en Chine.

Les technologies de batteries de petite taille et plus légères se sont surtout développées à partir de 1990, d'abord entraînées par la formidable croissance des produits électroniques nomades grand public (téléphones portables et smartphones, ordinateurs portables, tablettes, appareils photo et caméras vidéo, baladeurs musicaux et vidéo, consoles de jeu portables, etc.), puis plus récemment par l'amorce de développement de moyens de transports individuels électriques (automobiles, mais aussi vélos et scooters).

Au début des années 1990, il s'agissait surtout des batteries Nickel-Cadmium (NiCd). À partir de 1995 se sont développées les batteries Nickel-Hydrure de Metal ("Nickel-Metal Hydride", NiMH), qui ont l'avantage de ne pas de contenir de cadmium, métal lourd toxique. Ce sont des batteries NiMH qui ont équipé les premiers véhicules hybrides électriques (Toyota Prius) et restent encore dominantes dans ce secteur.

Les batteries au lithium, de type Lithium-ion, se sont surtout développées depuis la fin des années 1990 et prennent une part croissante du marché. Les technologies Lithium-ion donnent une meilleure densité d'énergie par rapport à leur masse et à leur volume que les batteries NiCd et NiMH (voir Tableau 7).

Des batteries Lithium-Métal-Polymère (LMP) ont été développées plus récemment pour les secteurs du véhicule électrique, en particulier par le groupe Bolloré pour sa BlueCar (qui équipe le service Autolib à Paris), mais aussi dans les secteurs des satellites et des télécommunications.

Enfin de nouvelles technologies Lithium-Soufre, potentiellement encore plus efficaces, en sont au stade de la recherche et développement.

Type de batterie	capacité massique d'énergie (Wh/kg)	capacité volumique d'énergie (Wh/l)	Puissance en pointe (W/kg)	Tension d'un élément	Nbre de cycles	Effet mémoire*	Auto- décharge par mois	Coût (€/Wh, 2004)
Li-ion	150 - 190	220 - 400	1 500	3.6 V	1 200	non	2%	2
Li-polymère	150 - 190	220 - 330	250	3.7 V	200 - 500	non	2%	1.5 - 2
Li-phosphate	120 - 140	190 - 220	800	3.2 V	2 000	non	5%	1 - 1.8
Li-air	1 500 - 2 500	nd		3.4 V	nd	non	?	
Li-métal polymère	110	110	320	2.6 V	nd	non	?	
NiMH	60 - 110	220 - 330	900	1.2 V	1 500	oui	>30%	1.5 - 2
NiCd	45 - 80	80 - 150		1.2 V	2 000	oui	>20%	0.6
Pb-acide	30 - 50	75 - 120	700	2.25 V	500 - 1 200	oui	5%	0.2

* Baisse de capacité liée à des cycles incomplets de charge-décharge

Sources : Schwarz (ADEME), 2005 ; adapté avec Hocquard, 2009

Tableau 7 - Comparatif des performances des principaux types de batteries.

L'intérêt d'avoir des batteries les plus légères possibles et les moins volumineuses possibles à performance énergétique égale est évident pour tous les appareils nomades ainsi que pour les véhicules électriques.

Les batteries au lithium sont aussi appelées à un fort développement pour le stockage de l'électricité produite par les énergies renouvelables intermittentes, éolienne et photovoltaïque.

Pour 2007, alors que le marché du véhicule électrique avec batteries au lithium était anecdotique (les véhicules hybrides tels que la Prius de Toyota utilisaient des batteries NiMH), Roskill (2009) estimait la répartition des usages des batteries au lithium comme suit (Fig.4) :

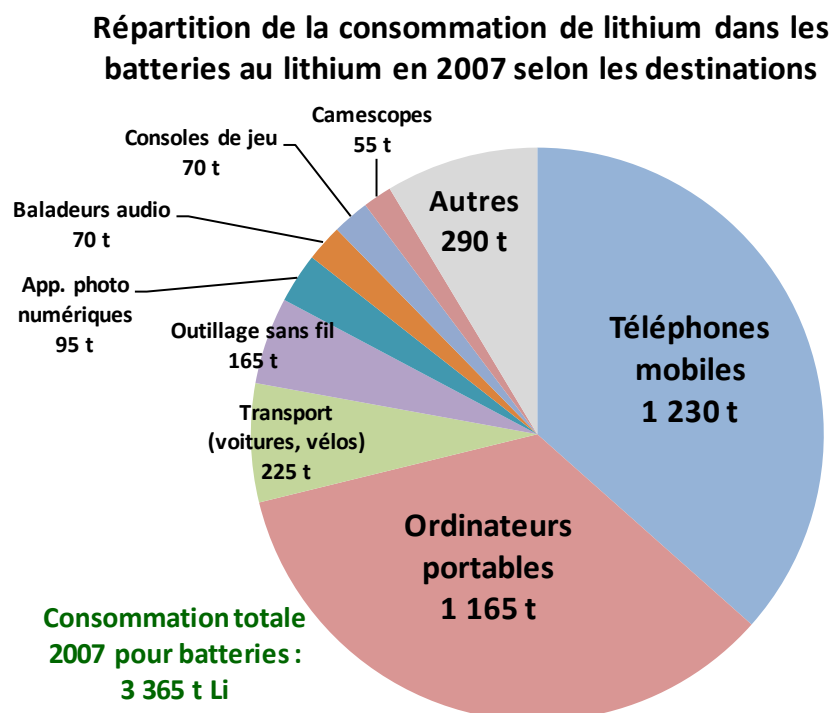


Figure 4 - Répartition de la consommation de lithium dans les batteries au lithium en 2007 selon les applications (source : Roskill, 2009)

Dans les batteries lithium-ion, le lithium est utilisé :

- pour la cathode, sous forme d'oxyde mixte de lithium et d'un autre métal : cobalt (cobaltate de lithium, LiCoO_2), manganèse (spinelle de manganèse-lithium, LiMn_2O_4), nickel (LiNiO_2), ou de plusieurs autres métaux ($\text{Li}(\text{Co},\text{Ni},\text{Al},\text{Mn})\text{O}_2$), ou de phosphate de lithium et de fer (LiFePO_4). En 2008, la part des cathodes en cobaltate de lithium était de 73 %.
- pour l'électrolyte, sous forme surtout d'hexafluorophosphate de lithium (LiPF_6) mais aussi de divers autres sels complexes de lithium (LiBF_4 , LiAsF_6 , LiI , LiClO_4 , LiCF_3SO_3 , $\text{LiN}(\text{CF}_3\text{SO}_2)_2$, $\text{LiN}(\text{C}_2\text{F}_5\text{SO}_2)_2$, $\text{LiB}(\text{C}_2\text{O}_4)_2$...) dans des solvants organiques ou dans des polymères solides.

L'anode est généralement en carbone (graphite) mais parfois en titanate de lithium $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$.

Dans les batteries lithium-métal-polymère, l'anode est en lithium-métal.

À noter que dans les batteries NiMH, l'électrolyte, essentiellement de l'hydroxyde de potassium (potasse, KOH) peut aussi contenir de l'hydroxyde de lithium (LiOH).

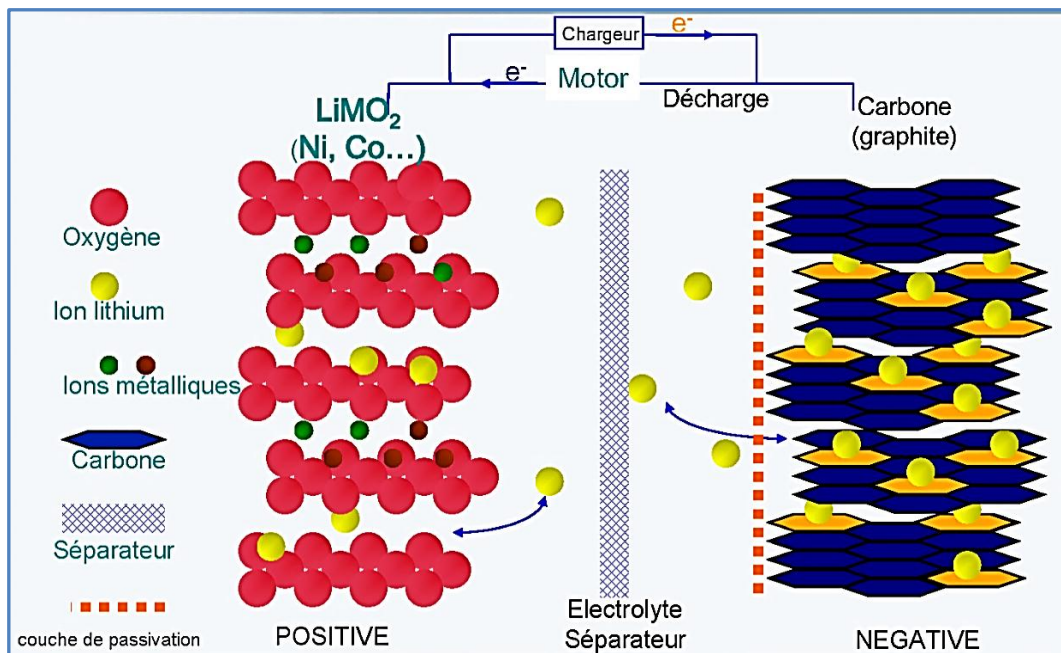


Figure 5 - Schéma de fonctionnement d'une batterie Li-ion (© Guibert, Saft, 2010)

Le marché des batteries pour **appareils électriques et électroniques portables (nomades)** a atteint une certaine maturité mais devrait poursuivre un développement en raison de la diversification des appareils et de l'accès d'un plus grand nombre de consommateurs à ces produits. Roskill (2009) prévoyait une croissance de la demande comprise entre 4 et 10 % par an, avec une hypothèse de base à 6,9 %. Saft (2010) en estimait la croissance annuelle à 8 à 10 %, avec une demande en 2020 de 4,5 kt de lithium.



Figure 6 - Exemples de batteries au lithium pour ordinateur portable, téléphone portable et appareil photo

Mais c'est surtout le secteur de la **voiture électrique**, émergeant et encore bien loin de sa maturité, qui offre un très gros potentiel de croissance de demande, susceptible d'influer de manière très significative sur le marché global du lithium à moyen terme. Ce secteur est complété par la demande pour d'autres moyens de transports tels que le **vélo** et le **scooter électrique**.

Enfin, le développement des productions d'énergies renouvelables mais intermittentes (éolien, solaire) demande le développement de solutions de **stockage de l'énergie électrique de réseau fixe**. Si ce stockage par accumulateurs était encore largement basé sur des accumulateurs plomb-acide (sites isolés de type relais téléphoniques, par exemple), les solutions par batteries au lithium sont en fort développement.

Des projets de "smart grid" (réseaux intelligents) pour l'alimentation de quartiers entiers avec de l'énergie solaire ou éolienne sont en cours d'étude ou de lancement, comme le projet pilote de Nice-Grid lancé par l'Ademe et piloté par ERDF à Carros, dans la communauté urbaine Nice-Côte d'Azur, et associant Saft pour le volet stockage.

Des projets sont lancés aussi aux États-Unis, au Japon, en Chine, au Canada.

En janvier 2010, Saft prévoyait pour 2020 environ 10 000 systèmes de stockage de 1 MW, nécessitant 1,65 kt de lithium.

Les véhicules électriques :

Les véhicules électriques développés actuellement et nécessitant des batteries sont essentiellement de 3 types, généralement distingués dans la plupart des études statistiques et prévisionnelles, les "EV", les "HEV" et les "PHEV".

1- **Les EV** (*Electrical vehicles*) : véhicules équipés d'un moteur exclusivement électrique. Fonctionnement très simple (moteur électrique classique, d'un excellent rendement énergétique). Le moteur est alimenté par des batteries (NiMH, Li-ion ou Li-métal polymère) rechargeables sur secteur ou sur bornes de recharge spécifiques. Les handicaps sont leur faible autonomie électrique, et toujours le coût de ces batteries et du véhicule comparé aux équivalents thermiques. Les avantages sont l'absence de consommation de carburants fossiles directe, de rejet de CO₂ direct, et de pollution sonore ou de particules. Certains pourront objecter que ces avantages sont à moduler par le fait que l'électricité a dû être produite quelque part, par des sources pas forcément renouvelables, éventuellement par des centrales nucléaires (non toujours consensuelles), voire par des centrales thermiques à fuel ou à charbon qui auront consommé le carburant non consommé par le véhicule. La longévité des batteries, leurs coûts, l'autonomie, la sécurité et le poids font toujours l'objet de Recherche et Développement intenses pour leur amélioration. Ces véhicules ont d'abord eu des marchés de niche (batteries au plomb puis NiMH, très faible autonomie kilométrique, donc essentiellement des déplacements sur sites industriels). Ils commencent seulement à toucher le public, avec la généralisation des batteries au lithium, avec de premiers lancements fin 2008 et 2009, puis plusieurs lancements de véhicules électriques en France fin 2011 (cf. 6.2.7) et, par exemple, le lancement en décembre 2011 des "Autolib" (voitures électriques en libre-service dans Paris) avec des Bluecars de Bolloré, équipées de batteries LMP. La Fig.7 illustre un assemblage de batteries en modules et "package" pour un véhicule électrique (Mitsubishi i-MiEV).

2- **Les HEV** (*Hybrid Electrical Vehicles*) : véhicules hybrides électriques. Ce sont jusqu'à présent essentiellement des véhicules à moteur thermique avec appoint électrique. Elles sont équipées, en sus du moteur thermique classique, d'un moteur

électrique d'appoint fonctionnant sur batteries qui se chargent par le moteur thermique en roulant et par l'énergie récupérée lors des freinages.

La voiture peut être entraînée par chaque moteur séparément ou par les deux moteurs ensemble. Une gestion de la transmission complexe permet toutes les combinaisons. L'autonomie de ces véhicules n'est pas limitée par l'autonomie des batteries, ce qui les rend utilisables sur de longs trajets et à vitesse élevée, sur autoroute par exemple. Le système a l'avantage de récupérer une bonne partie de l'énergie gaspillée par les véhicules thermiques seuls en particulier lors des freinages. Le basculement sur moteur électrique est surtout intéressant aux faibles vitesses, auxquelles le rendement du moteur thermique est moins bon, et pour diminuer la pollution urbaine. Mais l'autonomie sur batterie seule est très faible (une dizaine de km).

Ce type de véhicules est arrivé sur le marché avec le début de la commercialisation de la Toyota Prius en 1997, d'abord avec des batteries NiMH. Plusieurs autres marques ont commercialisé des modèles depuis lors, avec un transfert progressif vers les batteries Li-ion (Mercedes S400 Blue Hybrid depuis 2009). Le nombre de véhicules HEV en circulation serait désormais de 2,3 millions de véhicules (Toyota, 2011).

- 3- Les PHEV (Plug-in Hybrid Electrical Vehicles) : ce sont des HEV dont les batteries peuvent aussi être rechargées sur secteur, comme la nouvelle génération de Toyota Prius. Le moteur est hybride mais ouvre la possibilité de recharger la batterie sur un réseau électrique extérieur au véhicule. Le moteur thermique est actionné dès que les batteries sont déchargées ou bien au-delà d'un seuil de vitesse. Les batteries utilisées sont désormais généralement des batteries Li-ion.

Disposant du même avantage que HEV sur les EV, elles peuvent permettre de rouler tout électrique sur des distances de 25 à 60 km.

Un autre système PHEV est un véhicule à motorisation de roulage purement électrique, mais avec un moteur thermique d'appoint faisant uniquement tourner un générateur qui recharge les batteries en cas de besoin.



Figure 7 - Illustration des composants d'une batterie lithium de véhicule électrique (EV).
Exemple de la Mitsubishi i-MiEV (CEIS, 2011, d'après www.mitsubishi-motors.com)

La quantité de lithium utilisée pour les batteries des véhicules électriques dépend des types de véhicules, des autonomies kilométriques en mode électrique recherchées, des modèles, des types de batteries utilisées.

Le tableau 8 ci-dessous donne des ordres de grandeur des quantités de lithium nécessaires pour certaines catégories de véhicules électriques et de batteries d'après Gaines et Nelson (2010), sur la base d'une consommation de 186 Wh/km.

Type de batterie Li-ion	Electrolyte	Hexafluorophosphate de lithium (LiPF ₆)															
	Anode	Graphite												Titanate de lithium Li ₄ Ti ₅ O ₁₂			
	Cathode	LiCoO ₂ ou Li(Co,Ni,Al,Mn)O ₂				LiFePO ₄				Spinelite LiMn ₂ O ₄				Spinelite LiMn ₂ O ₄			
Type de véhicule	Type de véhicule	HEV	PHEV	PHEV	EV	HEV	PHEV	PHEV	EV	HEV	PHEV	PHEV	EV	HEV	PHEV	PHEV	EV
	Autonomie kilométrique en mode électrique	6.5 km	32 km	64 km	160 km	6.5 km	32 km	64 km	160 km	6.5 km	32 km	64 km	160 km	6.5 km	32 km	64 km	160 km
Quantité de lithium par véhicule (en kg Li)	Pour les cathodes	0.34	1.36	2.75	6.88	0.196	0.796	1.61	4.02	0.145	0.587	1.18	2.96	0.287	1.165	2.31	5.78
	Pour l'électrolyte	0.04	0.104	0.202	0.505	0.045	0.136	0.264	0.528	0.029	0.087	0.17	0.425	0.049	0.167	0.335	0.838
	Pour les anodes	0.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.301	1.21	2.43	6.07
	Total	0.37 kg	1.46 kg	2.95 kg	7.39 kg	0.24 kg	0.93 kg	1.87 kg	4.55 kg	0.17 kg	0.67 kg	1.35 kg	3.39 kg	0.64 kg	2.54 kg	5.08 kg	12.69 kg

Tableau 8 - Quantification des besoins en lithium pour différents véhicules électriques et batteries. Adapté d'après Gaines et Nelson (2010)

Plus généralement, le tableau 9 ci-dessous donne un comparatif des besoins en lithium pour divers secteurs d'utilisation des batteries Li-ion, d'après Roskill (2009) repris de Trade Press, sur une base moyennée estimée de 80 g de lithium par kWh.

(NB : Les quantités obtenues pour les véhicules électriques peuvent différer de ceux du tableau 8, mais les regroupements et consolidations ne sont pas les mêmes, et les ordres de grandeurs sont cohérents. Les quantités ne sont qu'indicatives, diffèrent d'une marque à l'autre, d'un modèle à l'autre, d'une version à l'autre, et évoluent dans le temps avec les progrès de R&D).

	Voltage (V)	Courant (Ah)	Capacité (Wh)	Lithium (g Li)
Matériel électrique et électronique portable				
Téléphone mobile	3.7	0.95	3.5	0.3
Appareil photo numérique	3.7	1.2	4.4	0.4
Baladeur MP3/MP4	3.7	1.6	5.9	0.5
Console de jeu portable	3.7	1.8	6.7	0.5
Caméscope	7.4	1.3	9.3	0.7
Outillage sans fil	18.0	3.0	54.0	4.3
Ordinateur portable	14.8	4.5	67.0	5.4
Moyens de transport				
Vélo électrique	24.0	9.6	230	18
Scooter électrique	48.0	40.0	1 920	154
HEV (ex: Mercedes S400)			3 000	240
PHEV (ex: Chevrolet Volt)			16 000	1 280
EV (ex: Th!nk City)			27 000	2 160
EV sportive (ex: Roadster Tesla)	375.0	141.3	53 000	4 240

Tableau 9 - Comparatif des besoins en lithium pour divers objets utilisateurs de batteries au lithium (par unité d'objet). Source : Roskill (2009) d'après Trade Press.

Les prévisions d'évolution du marché des véhicules électriques et de son taux de pénétration dans le parc automobile global sont assez variables selon les auteurs.

Hocquard (2009) présentait un comparatif d'une dizaine de prévisions disponibles alors, qui prévoyaient pour 2015 un nombre de véhicules électriques vendus de 2 à 4 millions d'unités pour les plus pessimistes à 6 à 8 millions d'unités pour les plus optimistes. Il avait lui-même modélisé un scénario de pénétration, repris dans le tableau 10, arrivant à 6,5 % de part de marché en 2020, et en retenant aussi une hypothèse haute à 10 % à cette échéance.

Sur la base de 2 hypothèses de répartition entre HEV, PHEV et EV et de la quantité moyenne de besoins en lithium qui en découleraient (Tableau 11), il en déduit les besoins en lithium en 2020 pour le secteur des véhicules électriques selon l'hypothèse la plus basse (6,5 % de pénétration dont 60 % de HEV) et la plus haute (10 % de pénétration dont 60 % d'EV) de 4,3 et 12,8 kt de Li respectivement (Tableau 12).

	Nbre de véhicules total (millions d'unités)	Proportion de véhicules électriques	Nbre de véhicules électriques (millions d'unités)	
2012	54.92	0.5%	0.27	
2013	56.35	0.9%	0.51	
2014	57.81	2.2%	1.27	
2015	59.20	2.5%	1.48	
2016	60.86	2.9%	1.76	
2017	62.44	3.3%	2.06	
2018	64.06	4.0%	2.56	
2019	65.73	5.0%	3.29	
2020	67.44	6.5%	4.38	scénario de base
2020	67.44	10.0%	6.74	scénario haut

Tableau 10 - Estimation de la pénétration du marché par les véhicules électriques à l'horizon 2020 (Hocquard, 2009)

	HEV	PHEV	EV	Moyenne mix 1	Moyenne mix 2
Qté LCE/véhicule	1.2 kg	7.2 kg	15.0 kg	10.1 kg	5.2 kg
Qté Li/véhicule	0.23 kg	1.35 kg	2.82 kg	1.9 kg	1.0 kg
hypothèse de mix 1	30%	10%	60%		
hypothèse de mix 2	60%	20%	20%		

Tableau 11 - Quantité de lithium (en LCE ou en Li) contenu selon le type de véhicule électrique considéré (Hocquard, 2009)

	Taux de pénétration des VE en % du total	Nombre de VE vendus	LCE par véhicule électrique	Demande totale en 2020	
				comptée en LCE	comptée en Li
Hypothèse haute	10%	6.74 M unités	10.1 kg	68.1 kt	12.8 kt
Hypothèse basse	6.5%	4.38 M unités	5.2 kg	22.8 kt	4.3 kt

Tableau 12 - Estimation de la quantité de lithium demandée par le secteur des batteries pour véhicules électriques à l'échéance 2020 (d'après Hocquard, 2009)

Roskill a présenté en janvier 2012 une estimation à 6 millions de véhicules électriques vendus, dont encore 1,1 millions de PHEV avec batteries NiMH et 4,9 millions de PHEV, HEV et EV avec batteries au lithium (Fig.8).

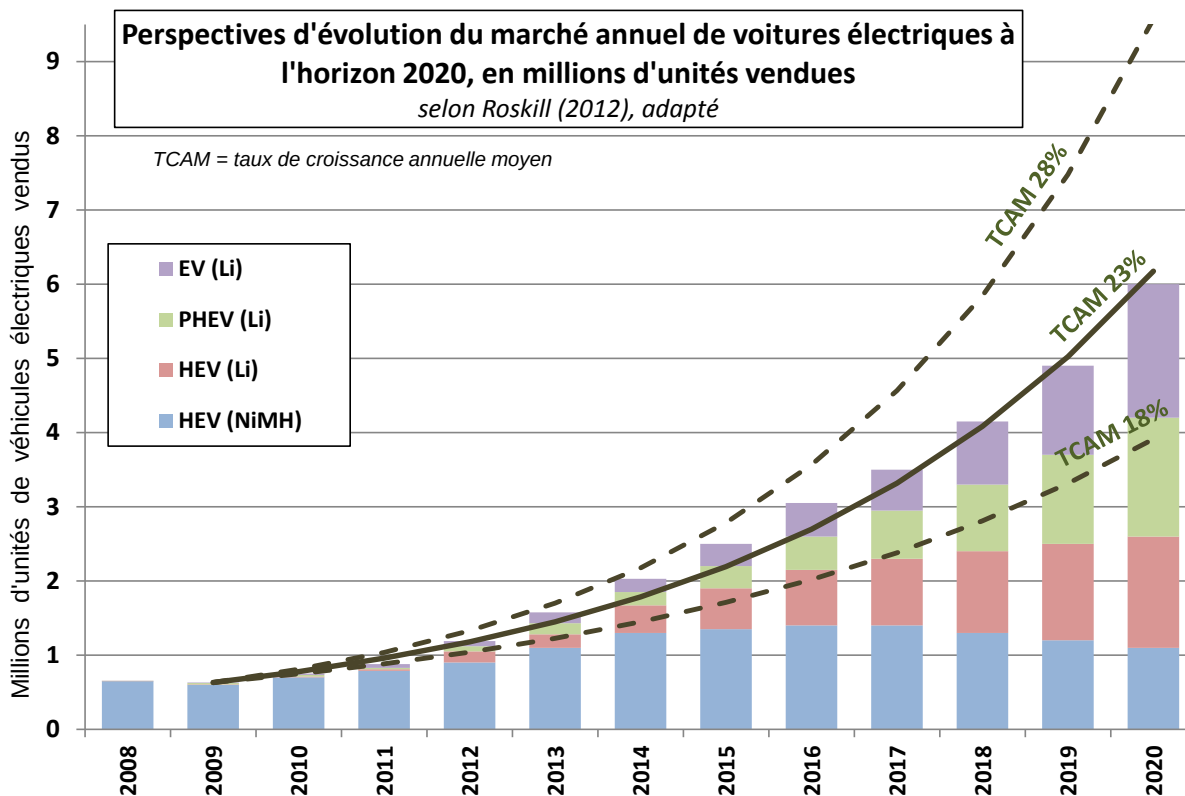


Figure 8 - Perspective d'évolution du marché du véhicule électrique à l'horizon 2020, selon Roskill (2012).

Selon les hypothèses de motorisations et des types de batteries au lithium, la demande pourra être de 8,2 à 16,5 kt de lithium en 2020 (Tableau 13).

	HEV Li	PHEV	EV	Total
Nombre de véhicules électriques vendus en 2020 (Roskill, 2012)	1.5 M unités	1.6 M unités	1.8 M unités	4.9 M unités
Demande unitaire en Li, hypothèse basse (exemples Tab.9)	0.24 kg	1.3 kg	3.2 kg	
Demande totale en Li pour VE en 2020, hypothèse basse	0.36 kt	2.05 kt	5.8 kt	8.2 kt Li
Demande unitaire en Li, hypothèse haute (moyenne Tab.8)	0.36 kg	2.1 kg	7 kg	
Demande totale en Li pour VE en 2020, hypothèse haute	0.54 kt	3.36 kt	12.60 kt	16.5 kt Li

Tableau 13 - Estimation des besoins en lithium pour les batteries des véhicules électriques en 2020, dans l'hypothèse de 6 millions de véhicules électriques vendus dont 4,9 au lithium (Roskill, 2012) et des hypothèses hautes et basses de besoins par véhicule.

De son côté, la société française Saft présentait en janvier 2010 une perspective à 2020 de 10 millions de voitures électriques nécessitant 35 kt de lithium.

En fait, le développement du véhicule électrique et son taux réel de pénétration s'est fait plus lentement que ce qui était prévu avant la crise de 2008. La demande pourrait cependant commencer à s'accroître avec l'augmentation soutenue des prix du pétrole et des carburants.

Il y aura aussi une demande croissante de batteries au lithium pour les vélos électriques, dont le marché commence à se développer en Occident avec des batteries au lithium, et dont le marché était déjà très développé en Chine (plus de 22 millions d'unités vendues chaque année) mais avec des batteries au plomb et dont une partie pourra basculer vers des batteries au lithium, plus chère mais bien plus légères.

En 2009, Roskill estimait à 285 t la quantité de lithium consommée en 2008 pour les batteries du secteur des transports, essentiellement pour les vélos électriques, la consommation pour les voitures électriques étant encore balbutiante. Il prévoyait alors une demande d'environ 2 610 t à l'échéance 2013 (hypothèse moyenne) au total pour les transports, dont 690 t pour les vélos et scooters (taux de croissance annuel de 19 % pour ces derniers).

Globalement, la demande pour le secteur des transports pourrait passer à 12 - 16 kt en 2020 (cf. plus haut) pour les voitures et 2,4 kt pour les autres transports (en extrapolant les chiffres 2008-2013 de Roskill), soit un total de 14,4 à 18,4 kt Li, soit un taux de croissance annuel combiné de 38 à 41,5 % à partir des 285 t de 2008.

Tous usages de batteries confondus, la consommation aurait été de l'ordre de 5 kt en 2011 et attendue, dans l'hypothèse de base, vers 26,9 kt en 2020 (extrapolé de Roskill, 2012), soit une croissance d'environ 18,5 % qui est le taux prévu par TRU en 2011.

Piles au lithium de grande consommation

Les piles de grande consommation comprennent les piles au zinc-graphite (piles Leclanché), les meilleur marché, les piles alcalines, plus performantes, et les piles au lithium, bien plus chères mais plus petites à énergie délivrée égale, et de plus grande durée de vie. Les piles au lithium fonctionnent aussi dans une plus large gamme de températures (typiquement de -60°C à + 85°C).

Les piles Leclanché et les piles alcalines sont souvent commercialisées sous forme cylindrique allongée ("piles-bâton") ou prismatiques (parallélépipédiques). Les piles au lithium peuvent être commercialisées sous des formes similaires, mais aussi sous forme cylindrique aplatie ("piles-bouton"), utilisées préférentiellement chaque fois que de très petites tailles et des longues durée de vie sont requises (montres, calculatrices, pacemakers, etc.).

Les piles au lithium ont commencé à arriver significativement sur le marché à partir de 1981.



Figure 9 - Exemples de piles au lithium du commerce (bouton, cylindrique, prismatique)

Dans les piles, le lithium est utilisé sous forme métallique à 99,9 % de pureté. L'amélioration technologique a permis d'abaisser la quantité de lithium de 0,1 g à 0,088 g Li par cellule de pile.

Globalement, le marché des piles était estimé à 16 milliards d'US\$ en 2005, et celui des piles au lithium à 1,1 milliard d'US\$ en 2007 (Roskill, 2009, d'après Frost and Sullivan).

En nombre de cellules de piles au lithium, la production serait passée de 1,8 milliard d'unités en 2000 à 2,8 milliards en 2008, soit une croissance de 5,7 % par an.

Le Japon reste le premier producteur mondial de piles au lithium avec près de 50 % de la production (avec Panasonic/Sanyo en tête des sociétés productrices), la Chine augmentant sa part année après année, estimée à 30 % en 2008.

La croissance de la demande en lithium dans le secteur des piles est attendue à environ 3,1 % par an, un peu plus faible que celle des piles elles-mêmes en raison d'une baisse attendue de la quantité de lithium nécessaire par cellule. Elle passerait ainsi de 245 t en 2008 à 285 t en 2013 (Roskill, 2009).

Elle pourrait cependant croître davantage, à 310 t en 2013, si davantage de piles-bâton Leclanché ou alcalines venaient à être remplacées par des piles au lithium.

Les quantités de lithium utilisées par ce secteur des piles restent cependant très faibles par rapport au secteur des batteries rechargeables (accumulateurs).

Piles thermiques au lithium

(informations extraites de ASB-Group)

Parallèlement aux piles au lithium de grande consommation, il existe une branche plus spécialisée des "piles thermiques au lithium".

Les piles thermiques sont des piles non rechargeables et inertes avant leur utilisation, qui peuvent être stockées sans entretien très longtemps et qui réagissent instantanément (quelques dixièmes de seconde) à leur activation.

Elles sont constituées de cellules dont l'électrolyte est solide et est activé par fusion par des pastilles chauffantes activables (activation thermique).

Leur mise au point est issue des besoins de la recherche spatiale, de l'aéronautique et de la Défense et sont conçues pour résister à des environnements extrêmes (températures très basses ou très élevées, vibrations, chocs, vide, très hautes ou basses pressions).

Elles sont généralement créées sur mesure pour répondre aux exigences des utilisateurs (puissance nécessaire, durée de fonctionnement, taille, poids, design).

Les piles thermiques sont utilisées comme source d'énergie pour des applications comme :

- Les énergies de secours pour des applications industrielles (systèmes de sécurité pour forage pétrolier, centrales nucléaires, systèmes de surveillance, etc.) ;
- Les alimentations de systèmes électroniques embarqués, dans les missiles, les torpilles, les engins sous-marins, les systèmes de défense terrestres, navals et aériens, et dans le milieu de l'aéronautique en général ;
- Les lanceurs spatiaux, pour l'alimentation d'actionneurs électriques et d'éjecteurs pyrotechniques ;
- Les sièges éjectables d'avions de chasse.



Figure 10 - Pile thermique au lithium (© www.asb-group.com)

Le groupe français ASB-Group et ses filiales ASB (AéroSpatial Batteries) et MSB (Missile & Space Batteries) est le leader européen et n°2 mondial de la spécialité.

Les quantités de lithium absorbées par ce secteur ne sont pas encore comptabilisées.

3.2.3. Graisses lubrifiantes

Le secteur des graisses lubrifiantes est le troisième secteur utilisateur de lithium après les verres / céramiques et les batteries, avec une consommation d'environ 2 390 t Li en 2008 (11 % de la consommation mondiale de lithium).

Par rapport aux huiles lubrifiantes, liquides, les graisses lubrifiantes sont des fluides visqueux, utilisées lorsqu'un lubrifiant liquide s'avère inadapté. C'est le cas lorsque le lubrifiant a vocation à rester dans un mécanisme (roulements, etc.).

Ces graisses contiennent un lubrifiant liquide, des additifs (antioxydants pour allonger la durée de vie de la graisse, additifs extrême-pression contre la rayure...) et un ou plusieurs agents épaississants. En général, une graisse est composée de 70 à 95 % d'huile, de 3 à 20 % d'un ou plusieurs épaississants, et de 0 à 10 % d'un ou plusieurs additifs.

L'épaississant est généralement un "savon métallique" résultant de la réaction d'un acide gras (stéarique, oléique) avec un hydroxyde métallique comme le lithium mais aussi le calcium, le sodium, l'aluminium ou le magnésium.

Les savons de lithium sont les plus utilisés. On distingue les graisses simples au lithium obtenues par réaction d'hydroxyde de lithium hydraté avec un seul acide gras, et les graisses complexes avec plusieurs acides gras.

Les graisses à savon lithium sont de bonnes graisses multi-usages : maintien de bonnes propriétés lubrifiantes dans une large gamme de températures, bonne résistance à l'eau et à l'oxydation, bonne dispersibilité et pompabilité, stabilité au cisaillement, point de goutte élevé et bonne compatibilité avec les additifs.

Les savons à base de calcium sont utilisés lorsqu'une bonne résistance à l'eau et de bonnes propriétés d'adhésion sont requises. Les autres types de savons métalliques comme le sodium, l'aluminium sont utilisés en quantités plus marginales.

La production mondiale de graisses lubrifiantes a été de 1,05 Mt en 2007, dont 0,61 Mt de graisses simples au lithium (59 % du total) et 0,15 Mt de graisses complexes au lithium (15 % du total).

En ordre de grandeur, une graisse simple au lithium peut contenir environ 0,2 % de lithium, et une graisse complexe environ 0,3 % Li.

Le marché (production et consommation) mondial des graisses au lithium a augmenté de 3,7 % par an en moyenne entre 2000 et 2007, dont 7,8 % pour la Chine et 2,3 % pour les pays de l'OCDE.

3.2.4. Industrie de l'aluminium

Environ 1 505 t de lithium ont été utilisées en 2008 pour la production métallurgique d'aluminium, soit environ 6 % de la consommation mondiale.

L'aluminium métallique est produit par électrolyse de l'alumine Al_2O_3 fondue dans un bain de cryolite (Na_3AlF_6) (Procédé Hall-Héroult).

Divers additifs sont ajoutés dans le bain pour améliorer l'efficacité du procédé, abaisser le point de fusion/solidification du bain (comme les fluorures de calcium CaF_2 ou d'aluminium AlF_3), ou pour diminuer les émissions polluantes, en particulier de fluor.

L'ajout de carbonate (ou parfois de chlorure) de lithium au bain donne du fluorure LiF par réaction avec le fluorure d'aluminium. Un bain contenant 2 à 3 % de LiF permet en particulier les avantages suivants :

- Abaissement du point de fusion ;
- Abaissement de la température de fonctionnement de 12 à 18°C ;
- Meilleure conductivité électrique ;
- Consommation électrique abaissée de 2 à 4 % ;
- Consommation de carbone (des cathodes) abaissée de 1 à 2 % ;
- Émissions de fluor réduites de 40 à 50 %.

La quantité de lithium ajoutée est cependant minimisée pour éviter d'en retrouver trop de traces dans l'aluminium métallique produit, ce qui serait pénalisant. L'utilisation de lithium n'est donc pas généralisée. 29 fonderies d'aluminium, essentiellement en Europe et en Amérique du Nord représentant environ 12 % de la production mondiale d'aluminium, utilisaient des bains au lithium en 2007 (Roskill, 2009, d'après Helge Forberg).

Pour 60 kg de cryolite nécessaires à la production d'une tonne d'aluminium, on utilise entre 0 et 3 % de LiF . Si 2 % de LiF sont ajoutés dans 60 kg de cryolite, le besoin est de 1,2 kg de LiF soit 1,7 kg de Li_2CO_3 ou encore 0,32 kg de Li par tonne d'aluminium produite.

La consommation mondiale d'aluminium devrait continuer à croître dans les prochaines années. Toutefois, l'augmentation de la production se faisant surtout hors Europe et Amérique du Nord, elle ne devrait pas se traduire par une augmentation équivalente de lithium, attendue plus modérée, sachant qu'il n'est pas prévu qu'une part croissante de fonderies adopte les bains au lithium. L'éventail d'augmentation possible de la consommation de lithium dans le secteur de l'aluminium est donc assez large. Roskill (2009) prévoyait une croissance annuelle comprise entre 0 et 4,6 %, retenant une hypothèse moyenne de 2,4 % amenant la consommation à 1700 t Li en 2013, vs 1505 t en 2008. En janvier 2012, Roskill a passé sa prévision à 20 % de décroissance annuelle pour ce secteur d'ici 2020.

3.2.5. Traitement de l'air

Le secteur du traitement de l'air consomme environ 6 % du lithium mondial, à équivalence avec le secteur de la métallurgie de l'aluminium. Ce secteur regroupe 3 sous-secteurs, le refroidissement, la déshumidification et la purification de l'air par élimination du CO_2 .

Refroidissement par absorption

Le refroidissement ou climatisation par absorption (et non par compression qui nécessite de l'électricité) permet de produire du froid à partir d'une source de chaleur.

Le fluide frigorigène utilisé est une solution aqueuse concentrée de bromure de lithium (LiBr).

Les systèmes réfrigérants par absorption sont plus chers à fabriquer et à opérer que les systèmes à compresseur électrique, mais ils sont privilégiés lorsqu'il y a des chaleurs en excès produites par des procédés industriels ou dans les zones éloignées des réseaux de distribution d'électricité (réfrigérateurs à gaz ou à pétrole).

L'usage de ces systèmes réfrigérants par absorption est largement plus répandu en Asie (Chine, Japon) qu'en Europe ou en Amérique.

La demande mondiale en bromure de lithium pour ce secteur était estimée à 13 050 t en 2008, soit 1 045 t de lithium contenu.

Déshumidification et dessiccation

Les dessiccants sont des matériaux avides d'eau, absorbant très efficacement l'humidité de l'air. Ils sont utilisés en particulier dans l'industrie alimentaire et pharmaceutique.

Un des dessiccants les plus efficaces est le chlorure de lithium (LiCl), utilisé depuis les années 1940, et capable d'absorber environ 10 fois son poids en eau.

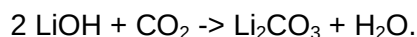
Il devient cependant déliquescent et donc corrosif lorsqu'il est saturé, et demande donc à être régulièrement régénéré (débarrassé de son eau par une source de chaleur).

Les déshumidificateurs au lithium représenteraient de l'ordre de 10 % du marché des déshumidificateurs.

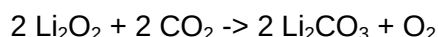
La consommation en chlorure de lithium pour ce secteur est estimée à 270 t en 2008, dont 150 t au Japon. Ce qui représentait 44 t de lithium.

Purification de l'air, élimination du CO₂.

Dans des espaces fermés (capsules spatiales, sous-marins, etc.), des hydroxydes ou oxydes alcalins sont utilisés pour éliminer le gaz carbonique exhalé par les occupants), comme LiOH.H₂O ou LiOH, selon la réaction :



On peut même utiliser du peroxyde de lithium Li₂O₂ qui non seulement absorbe le CO₂ mais dégage de l'oxygène en présence d'humidité, selon la réaction :



Le caractère irréversible des réactions fait que ce mode de purification devient vite coûteux à mesure que l'espace à traiter est conséquent.

La consommation annuelle de lithium pour la purification de l'air est estimée à 5 t/an.

Globalement, pour les 3 secteurs de traitement de l'air consolidés, la consommation de lithium a été de l'ordre de 1 100 t Li en 2008. Roskill (2009) prévoyait une croissance de la consommation du secteur de l'ordre de 1,7 % par an dans les quelques prochaines années, entre une fourchette basse de -1,4 % et une fourchette haute de +2,6 % par an en cas de bon développement des techniques de réfrigération et de dessiccation à énergie solaire.

3.2.6. Caoutchouc et thermoplastiques

Le lithium est utilisé sous forme de butyllithium (C_4H_9Li) comme catalyseur (initiateur) des réactions de polymérisation de divers types de caoutchoucs synthétiques : les élastomères styrène-butadiène (SBR), les caoutchoucs polybutadiènes (BR), et les copolymères styrène-bloc (SBC) ou "caoutchoucs thermoplastiques" (tuyaux et raccords, ustensiles ménagers, agents ignifugeants, fongicides, peinture acrylique...).

La polymérisation consiste à convertir des monomères souvent des dérivés du pétrole (exemple styrène (C_8H_8), butadiène (C_4H_6)) en caoutchouc synthétique ou en thermoplastiques.

Les caoutchoucs styrène-butadiènes sont les caoutchoucs synthétiques les plus largement utilisés.

La production mondiale de caoutchoucs synthétiques était estimée à 13,58 Mt en 2007, la France étant le 5^{ème} producteur mondial après les USA, la Chine, le Japon et Taiwan.

L'industrie des pneumatiques est la plus grande consommatrice de caoutchoucs synthétiques. Elle consommerait environ 60 % de caoutchouc naturel et 40 % de caoutchoucs synthétiques.

Parmi les autres applications, on pourra citer l'enduction, le chewing-gum ou les balles de golf dont l'intérieur est en polybutadiène etc.

La polymérisation d'une tonne de solution de styrène-butadiène consomme environ 0,3 kg de butyllithium, celle d'une tonne de butadiène 0,14 kg. Ces chiffres ou leur moyenne sont utilisés pour déterminer le tonnage de lithium utilisé dans le caoutchouc et les thermoplastiques.

Environ 730 t de lithium auraient été consommés, sous forme de butyllithium, pour la production de caoutchoucs synthétiques et de thermoplastiques en 2008, soit environ 3,4 % de la consommation mondiale de lithium.

Compte tenu d'une prévision de poursuite de la croissance de la production de pneus en particulier, Roskill (2009) prévoit une croissance de la consommation de butyllithium d'environ 4,2 % par an dans les quelques prochaines années, en fait dans une fourchette de +1,8 % (scénario bas) à 6,4 % (scénario haut).

3.2.7. Coulée continue de l'acier

La coulée continue est une technique qui permet la réalisation de profilés de section pleine ou creuse de diverses formes (carrées, hexagonales, rondes, méplates, etc.) à partir de métal en fusion. Le métal en fusion dans un four passe dans une filière en graphite refroidie. La barre profilée totalement solidifiée est tractée par des galets servant aussi de guides. Elle est ensuite tronçonnée selon la longueur souhaitée.

Cette technique est utilisée pour de nombreux métaux de base et alliages, et de manière marginale pour le secteur de l'acier. La production de profilés d'acier par coulée continue aurait été de 1,2 Mt en 2007, soit 0,1 % de la consommation mondiale d'acier.

Pour la coulée continue de l'acier, de l'oxyde de lithium est ajouté au produit fondu soit sous forme de carbonate de lithium (qui se décompose en oxyde à la température du bain) soit même sous forme de minéraux (spodumène ou pétalite), pour en améliorer la fluidité et le comportement et accélérer la coulée. Les quantités ajoutées varient de 0 à 5 % de Li_2O dans le bain en fusion.

Roskill (2009) estimait la consommation de lithium dans le secteur de la coulée continue de l'acier à 990 t Li. Mais le calcul de la consommation de lithium dans ce secteur est délicat à effectuer, par manque de données chiffrées exhaustives.

La reprise attendue de la consommation d'acier, en particulier en Chine, à partir de 2012, devait entraîner une croissance de la demande en lithium pour la coulée continue d'environ 2,5 % par an (de 0,6 % en estimation basse à 4,1 % en estimation haute).

3.2.8. Pharmacie et chimie fine

En pharmacie, le lithium est utilisé, principalement sous forme de carbonate, pour le traitement du trouble bipolaire (syndrome maniaco-dépressif)⁷, en complément de traitement des dépressions⁸ et divers autres troubles neuro-psychiatriques.

⁷ L'institut National de la Santé américain estime que le trouble bipolaire affecte au moins 2,3 millions de personnes aux Etats-Unis, et un peu plus de 1 % de la population mondiale.

⁸ L'épisode dépressif majeur (EDM), tel qu'il est communément admis dans les classifications internationales, a une prévalence de 3 % sur 6 mois, de 4 à 5 % sur 1 an (Hommes 3 % - Femmes 6 %) et de 12 % sur la vie entière (Hommes 10 % - Femmes 12 %). Certaines études font état d'un risque de suicide divisé par 10 pour les patients traités au lithium.

Aux États-Unis, les traitements à base de lithium (sous forme de carbonate de lithium Li_2CO_3 , de citrate de lithium $\text{Li}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$ ou d'orotate de lithium $\text{LiC}_5\text{H}_3\text{N}_2\text{O}_4$) représentaient, en 2005, 17 % des prescriptions contre les troubles bipolaires.

Pour les phases maniaques aiguës, la prescription individuelle peut atteindre 1,8 g de Li_2CO_3 par jour (soit 0,34 g de Li contenu).



Figure 11 - Exemples de gélules pharmaceutiques de carbonate et orotate de lithium

Le marché est actuellement essentiellement limité au monde occidental (Europe, Amérique du Nord et Australie) et au Japon, les traitements médicamenteux des troubles neuropsychiatriques étant moins pratiqués dans le reste du monde.

Le lithium est aussi utilisé pour des crèmes dermatologiques (succinate de lithium). Au niveau de la recherche médicale, il y a des études pour l'usage de certains composés du lithium pour le traitement de certains cancers, de l'alcool-dépendance, de la lutte contre la tuberculose résistante.

Il est aussi utilisé dans la production de certains inhibiteurs de protéases dans le traitement du sida.

La consommation de lithium dans le secteur pharmaceutique aurait été de 450 t de carbonate de lithium-équivalent en 2008, soit 85 t de lithium contenu.

Divers composés organiques du lithium ("organolithiens", butyllithium déjà cité pour les caoutchoucs, mais aussi autres alkylolithiums tels que le méthyllithium, l'hexyllithium, aryllithiums, alkoxydes de lithium), ainsi que l'amide de lithium et des hydrures de lithium et autre métal sont utilisés dans la chimie fine, en particulier comme intermédiaires pour la production de divers produits pharmaceutiques, de traitements agricoles ou de traitements de surface.

À titre d'exemples, le butyllithium ($\text{C}_4\text{H}_9\text{Li}$) est utilisé dans la synthèse de certains antibiotiques et antihistaminiques, le méthyllithium (CH_3Li) dans la synthèse des vitamines A et D, des stéroïdes ou de divers analgésiques, l'amide de lithium (Li^+NH_2^-) dans celle des antihistaminiques et dans la transestérification (obtention d'un ester à partir d'un autre ester et d'un alcool) utilisée en parfumerie.

Roskill (2009) estimait la consommation mondiale de lithium en chimie fine à 350 t/an, en 2008, avec une fourchette de croissance pour les prochaines années entre 2,5 et 6,3 % par an selon les scénarios.

3.2.9. Alliages aluminium-lithium

Des alliages aluminium-lithium sont utilisés dans les industries aéronautique et spatiale pour leur légèreté. L'ajout de 1 % de lithium à l'aluminium abaisse la densité de 3 % et augmente son module d'élasticité de 6 %.

Divers alliages ont été développés et élaborés par Alcoa, Rio-Tinto-Alcan (secteur désormais passé à Constellium) et UC-Rusal.

Une quinzaine d'alliages Al-Li sont commercialisés, avec des teneurs allant de 1,1 à 3,8 % Li, quelques % de Cu, et quelques fractions de pour-cent variables de Mg, Zr, Fe ou Si.

La société Constellium, issue en 2011 de la restructuration d'Alcan Engineered Products (anciennement filiale de Rio-Tinto-Alcan, auparavant Alcan, qui avait lui-même absorbé Péchiney en juillet 2003) et de la cession de la majorité au fonds d'investissements américain Apollo Management, produit entre autres des alliages d'aluminium-lithium pour les industries aéronautiques et spatiales, en particulier dans ses usines d'Issoire (63) et Montreuil-Juigné (49).

Dans l'industrie spatiale, l'alliage Al-Li 2195 (1,5 % Li) est utilisé depuis 1998 notamment pour les réservoirs externes des navettes spatiales de la NASA. Des alliages Al-Li d'Alcoa sont aussi prévus dans les fusées Arès en développement. La NASA a retenu des alliages de Constellium pour son futur vaisseau spatial Orion destiné à s'arrimer à la Station Spatiale Internationale et même à aller sur la Lune.

Dans l'industrie aéronautique civile, des alliages d'aluminium-lithium sont de plus en plus utilisés, en particulier pour des pièces de structure. Roskill (2009) cite les exemples suivants :

- l'Airbus A380 contient environ 13,4 t d'alliage Al-Li (soit environ 5 % de la masse de l'appareil), et l'Airbus A380-F environ 22,7 t (soit environ 9 % de la masse de l'appareil, qui comprend par ailleurs de 22 % de composites, 3 % de composites laminés, et 10 % d'alliages d'acier et de titane) ;
- l'Airbus A350 devrait contenir 40,3 t d'alliage Al-Li, soit 23 % de sa masse totale ;
- des alliages Al-Li sont également utilisés dans le Boeing 777, dans le Bombardier C-Series (10,4 t soit 23 % de sa masse), et en moindres quantités dans les Airbus 330 et 340 plus anciens ;
- dans l'industrie aéronautique militaire, l'Eurofighter contiendrait environ 550 kg d'alliage Al-Li, les F16 américains de Lockheed environ 260 kg d'alliage Al-Li ;
- l'hélicoptère EH101 d'Agusta Westland contient environ 5 t d'alliage Al-Li 8090 (à 2,5 % Li).



Figure 12 - Airbus A350 (© www.airbus.com)

Au total, les tonnages de lithium utilisés dans ce secteur restent modestes, à environ 70 t de lithium en 2007, pour environ 5 000 t d'alliage Al-Li.

Les prévisions de livraison d'Airbus A380, A350, des appareils militaires etc. avaient conduit Roskill (2009) à pronostiquer un accroissement de la consommation de lithium en 2013 de 2,2 % (hypothèse basse) à 9,4 % (hypothèse haute), soit une consommation de 80 à 120 t selon la conjoncture des industries aérospatiales.

Début 2012, des signaux semblent annoncer une dynamisation du secteur : le 25 janvier 2012, le géant américain de l'aluminium Alcoa a annoncé un investissement de 90 M US\$ pour l'augmentation de capacité de production d'alliages Al-Li de son usine de Lafayette, dans l'Indiana (USA), et déclaré être en train d'augmenter de 30 % la capacité d'alliage Al-Li de Pennsylvanie, après avoir déclaré début janvier qu'elle prévoyait une croissance de la demande du secteur aérospatial de 10 à 11 %.

En décembre 2011, le producteur américain de produits semi-finis d'aluminium Aleris a annoncé la construction d'une nouvelle usine d'alliage Al-Li à Coblenz, en Allemagne.

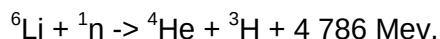
3.2.10. Électronique

Du niobate de lithium (LiNbO_3) et du tantalate de lithium (LiTaO_3) sont utilisés en électronique pour leurs propriétés électro-optiques, acoustiques, piézoélectriques et pyroélectriques, en particulier pour des éléments de filtres d'ondes acoustiques de surface dans les télécommunications (téléphones cellulaires et relais) et l'électronique grand public (téléviseurs, lecteurs et enregistreurs DVD, etc.).

Les niobate et tantalate de lithium sont produits par fusion de carbonate de lithium avec de l'oxyde de niobium et de l'oxyde de tantale respectivement. La consommation de ce secteur est estimée à 30 à 50 t de carbonate de lithium, soit 6 à 10 t de lithium. Elle pourrait rester à ce niveau car de nouveaux composés concurrents sont développés.

3.2.11. Fusion thermonucléaire militaire et civile

L'isotope 6 du lithium, qui est extrait du lithium naturel qui en contient 7,5 %, est utilisé pour produire du tritium par bombardement neutronique selon la réaction



Le tritium est un isotope radioactif de l'hydrogène (${}^3\text{H}$), dont le noyau est formé d'un proton et de deux neutrons, dont la période radioactive (demi-vie) est de 12,32 ans. Il est utilisé pour les réactions de fusion nucléaire⁹ dans les bombes thermonucléaires (bombes H), ainsi que pour la recherche sur la fusion thermonucléaire civile (programme ITER par exemple).

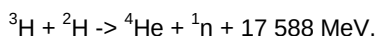
En raison de sa demi-vie assez courte, le tritium n'existe qu'à l'état de traces dans la nature¹⁰. Les besoins sont donc couverts par la fabrication artificielle de tritium, qui peut être soit produit spécialement par l'action de neutrons sur le lithium comme décrit plus haut, soit récupéré dans l'eau lourde des réacteurs nucléaires à eau lourde de type canadien (Candu).

Les quantités de lithium nécessaires pour ces usages sont faibles par rapport aux autres usages.

Il est toutefois intéressant de noter que, dans une publication sur les ressources et besoins en lithium de 1976 sur des études financées par l'administration américaine, les espoirs de développement de la fusion nucléaire civile conduisaient à évaluer les futurs besoins en lithium pour cette filière, selon diverses hypothèses technologiques retenues, entre 220 et 4 140 t de lithium pour 8,6 GWe produits par fusion en 2010 (date hypothèse, alors, du démarrage commercial de la production d'électricité par fusion nucléaire), et entre 1 880 et 20 750 t de lithium pour 270 GWe en 2030 (Bogart, 1976). Dans le haut de la fourchette, il s'agirait de besoins proches de la totalité de la production actuelle de lithium. Ces échéances n'ont évidemment pas été respectées.

Mais si les recherches menées entre autres avec ITER finissent par aboutir à des solutions technologiques commerciales, il conviendra de remettre à jour les perspectives de besoins en lithium. Les calculs les plus récents mentionnent un besoin de 300 g/j de tritium pour une puissance de 800 MW (www.iter.org). Si le tritium est généré à partir du lithium 6, cela représenterait 219 kg de ${}^6\text{Li}$, nécessitant d'enrichir au moins 2,9 t de lithium naturel. Le lithium 7 "appauvri" devrait cependant pouvoir être transféré aux autres usages non dépendant de sa composition isotopique.

⁹ La fusion thermonucléaire consiste à fusionner deux atomes très légers avec dégagement d'énergie. L'une des principales réactions recherchées est la fusion d'un atome de deutérium (${}^2\text{H}$) avec un atome de tritium (${}^3\text{H}$) selon la réaction



Le deutérium est un isotope naturel stable de l'hydrogène qui compose 0,015 % de l'hydrogène naturel. Ainsi les océans contiennent 33 g de deutérium par m³. En revanche le tritium doit être produit artificiellement.

¹⁰ Il se produit en permanence du tritium dans la haute atmosphère, en particulier par réaction des neutrons rapides du rayonnement cosmique sur les atomes d'azote dans la stratosphère par la réaction ${}^{14}_7\text{N} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + {}^3_1\text{H}$. Comme l'hydrogène, il est difficile à confiner et il s'en échappe toujours un peu des réacteurs nucléaires civils. Il en a également été relâché par les essais nucléaires atmosphériques passés.

En raison de cette application, le lithium est considéré par le Chili comme une substance d'intérêt nucléaire, et son exploitation est réglementée par la Commission Chilienne de l'Énergie Nucléaire.

3.2.12. Autres usages

Des composés de lithium peuvent être utilisés en quantités minimales dans diverses autres applications comme par exemple :

Photographie argentique : Divers sels de lithium (LiCl , Li_2SO_3 , Li_2SO_4) sont utilisés pour le développement photographique.

BTP : Certains composés de lithium (Li_2CO_3 , Li_2SO_4 , LiOH) sont utilisés comme additifs dans certains ciments spéciaux pour accélérer la prise.

Traitement de l'eau : de l'hypochlorite de lithium (LiClO) est utilisé pour la désinfection des piscines, par exemple.

Teinture : L'acétate de lithium ($\text{LiC}_2\text{H}_3\text{O}_2$) et l'hydroxyde LiOH sont utilisés comme additifs dans certains procédés de teinture de textiles et de polymères.

Pyrotechnie : Le nitrate de lithium donne une couleur rouge.

Métallurgie : Du lithium peut être ajouté lors de la fusion du cuivre pour en réduire la porosité.

3.3. USAGES DU LITHIUM PAR COMPOSÉS

Comme cela ressort de l'inventaire des usages par domaines d'utilisation décrit en 3.2 ci avant, le marché des usages du lithium se partage entre les composés suivants :

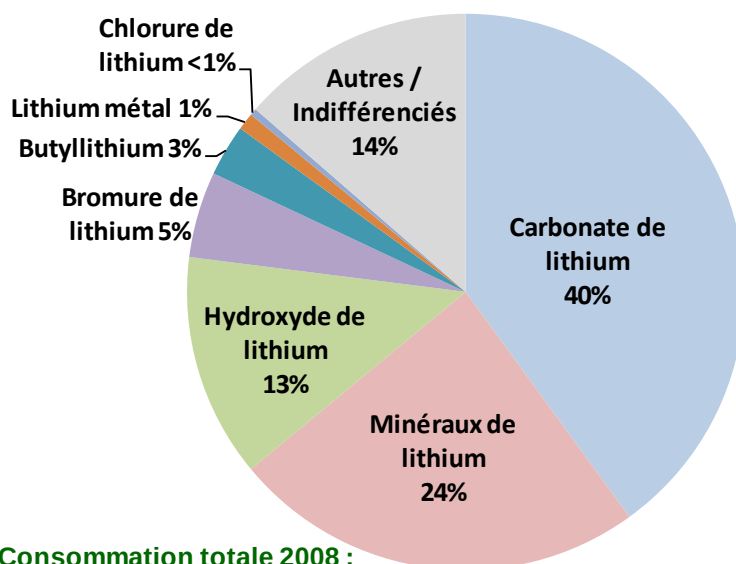
- les différents minéraux de lithium (spodumène, lépidolite, pétalite, amblygonite) sont achetés aux producteurs miniers par l'industrie des verres et céramiques et dans la coulée continue sans conversion préalable vers un composé du lithium. Ce compartiment pèse environ un quart du marché ;
- les composés de lithium de base, à savoir le carbonate de lithium (Li_2CO_3) et l'hydroxyde de lithium ($\text{LiOH.H}_2\text{O}$), qui peuvent être produits soit à partir des saumures, soit à partir des minéraux (cf. 4.4), le chlorure de lithium, qui peut être produit à partir des saumures ou par transformation ultérieure du carbonate ou de l'hydroxyde ;
- le lithium métallique, obtenu par électrolyse à haute température du mélange chlorure de lithium – chlorure de potassium ;
- les autres composés chimiques de lithium, destinés à des utilisations spécifiques et à la chimie (voir éventail des usages en 3.2 ci-avant), parmi lesquels on pourra citer le bromure de lithium (LiBr), l'aluminate de lithium (LiAlO_2), le nitrure de lithium (Li_3N), le nitrate de lithium (LiNO_3), le phosphate de lithium (Li_3PO_4), le

borohydrure de lithium (LiBH_4), l'acétate de lithium ($\text{LiC}_2\text{H}_3\text{O}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), l'oxyde de lithium-manganèse (LiMn_2O_4), l'oxyde de cobalt-lithium (cobaltate de lithium LiCoO_2), le phosphate de fer-lithium (LiFePO_4), le butyllithium ($\text{C}_4\text{H}_9\text{Li}$), etc.

Les deux dernières catégories sont produites par transformation des composés de base, carbonate, chlorure et hydroxyde, eux-mêmes produits à partir des ressources naturelles extraites (saumures et minéraux).

En 2008, selon Roskill (2009), la consommation par composés se répartissait approximativement comme suit (Fig.13) :

Répartition de la consommation de lithium par composé en 2008 *(source: Roskill, 2009)*



Consommation totale 2008 :
21,3 kt Li *(Roskill, 2009)*

Figure 13 - Répartition indicative de la consommation de lithium par composés. Exemple de 2008 (Roskill, 2009).



Figure 14 - Carbonate de lithium (© www.lithium-stocks.net)

3.4. SUBSTITUTIONS

Dans les batteries, la substitution du lithium est possible, en utilisant des technologies anciennes (NiMH par exemple), mais les batteries au lithium ont actuellement la meilleure capacité énergétique par unité de masse et de volume. Le lithium étant le plus léger de tous les métaux et ayant le plus fort potentiel électrochimique, il est probable qu'il reste le matériau préférentiel pour les batteries des équipements nomades (ordinateurs et tous appareils électroniques portables, etc.) et les véhicules électriques. Des recherches continuent cependant à être menées avec d'autres types de substances.

Dans les piles non rechargeables, les anodes peuvent être éventuellement remplacées par du calcium, du magnésium, du mercure ou du zinc (USGS, 2011).

Le lithium peut être substitué par des flux à sodium ou potassium pour la verrerie et les céramiques.

Des savons de calcium ou d'aluminium peuvent être utilisés comme substituts aux savons de lithium pour les graisses lubrifiantes.

Les alliages Al-Li peuvent être remplacés par des composites.

Toutefois, lorsque le lithium est choisi c'est qu'il présente des performances supérieures dans l'état actuel des connaissances.

3.5. PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION DE LA DEMANDE

De nombreuses analyses ont été menées ces récentes années pour évaluer les perspectives de croissance de la demande en lithium, en particulier pour les batteries, en raison, entre autres, des perspectives de développement du véhicule électrique, et pour évaluer les capacités de production possibles pour y faire face.

Les points de vue des différents analystes et des industriels du secteur sont désormais régulièrement exposés dans des publications, des articles, sur des sites spécialisés, et sont partagés et débattus à l'occasion d'une conférence annuelle "Lithium Supply & Market Conférence", organisée par Metal Bulletin / Industrial Minerals, dont la première s'est tenue en janvier 2009 à Santiago, la deuxième en janvier 2010 à Las Vegas, la troisième en janvier 2011 à Toronto et la 4^{ème} en janvier 2012 à Buenos Aires.

Côté demande, la plupart s'accordent pour prévoir une croissance comprise entre 2 et 5 % par an pour tous les secteurs de consommation du lithium (cf. 3.2 ci avant) sauf pour le secteur des batteries au lithium, appelé à une croissance bien plus forte (15 à 19 %), celui des alliages Al-Li, appelé à une croissance de 6 à 10 %, et celui de la production d'aluminium (ou le lithium n'est pas indispensable), attendu en stagnation, voire en déclin.

Concernant les batteries, l'un des paramètres déterminant est le taux de pénétration attendu du marché automobile par les différents types de véhicules électriques, HEV, PHEV et EV. Et pour ce paramètre, les avis sont assez divergents :

- En 2009, Chemetall anticipait une production de 6,9 millions de véhicules électriques en 2020, dont 1 million de HEV avec batteries NiMH et 5,9 millions avec batteries Li-ion, nécessitant **27 kt Li** (sur la base de 4,5 kg Li par véhicule en moyenne) ;
- En janvier 2010, Saft prévoyait un total de production de 10 millions de véhicules électriques en 2010, nécessitant 35 kt de Li contenu, mais aussi 10 000 systèmes de stockage de réseau de 1 MWh (pour les énergies renouvelables discontinues, éolien et photovoltaïque) nécessitant 1,65 kt de Li contenu, et une croissance de 8 à 10 % des besoins pour les appareils portables (téléphones, ordinateurs, appareils photo, consoles, outils) nécessitant 4,5 kt de Li en 2020, soit un total de **41,15 kt** de Li.
- En janvier 2011, à la 3^{ème} conférence "Lithium Supply & Markets" TRU prévoyait pour 2020 une production de 5,35 millions de véhicules électriques, un besoin en lithium pour batteries (tous usages de batteries confondus) de **21,1 kt** de Li contenu, et de **46 kt** avec tous les autres usages du lithium ;
- En janvier 2012, à la 4^{ème} conférence "Lithium Supply & Markets", Roskill prévoyait une production de 6 millions de véhicules électriques dont environ 5,5 avec batteries au lithium et 0,5 de HEV avec batteries NiMH. Roskill prévoyait aussi une demande de stockage de réseau dans une fourchette de 3 à 12 MWh. La demande totale en lithium était évaluée à **54,5 kt** Li contenu.

Le tableau 14 récapitule des taux de croissance attendus par secteurs selon les auteurs, et la figure 15 illustre une hypothèse moyenne compatible avec les prévisions du tableau compte tenu de leurs larges fourchettes d'incertitudes. Elle est construite sur une hypothèse de croissance annuelle de la demande de 18,8 % pour les secteurs des batteries et piles, de 3,1 % pour les secteurs des verres et céramiques, des lubrifiants, du traitement de l'air, des caoutchoucs et polymères, de la coulée continue, de -1,2 % pour le secteur de l'aluminium et de 4,2 % pour les autres usages (dont les alliages Al-Li).

La modélisation aboutit à un Taux de Croissance Annuel Combiné (TCAC) de 8,5 % et une demande en lithium en 2020 de 54 kt de Li contenu, soit 287 kt de LCE, ce qui est globalement conforme à la prévision de Roskill présentée en janvier 2012 (54 kt) mais plus optimiste que celle de TRU (46 kt).

La part consommée par le secteur des batteries dans cette modélisation serait de 26,9 kt en 2020, ce qui est plus optimiste que la prévision de TRU exprimée en 2011 et 2012 (21,1 kt) mais moins que l'anticipation de Saft en 2010.

Cette modélisation, comme celles auxquelles il est fait référence, doivent être prises avec de larges fourchettes d'incertitude.

Globalement, on peut considérer qu'il faut anticiper une croissance de la demande globale en lithium entre 6 et 10 %, soit une consommation de Li comprise entre 44 et

61 kt (230 à 325 kt LCE) par an à l'échéance 2020, avec une part croissante pour le secteur des batteries qui devrait représenter une bonne moitié de la consommation dès 2020.

Au-delà de 2020, le recyclage des batteries mises en service 10 ans auparavant devrait commencer à approvisionner le marché, mais tant que ce marché ne sera pas mature et stabilisé, compte tenu de la croissance de la demande, même un recyclage total des batteries mises en services 10 ans auparavant ne pourra fournir qu'une faible proportion des nouveaux besoins¹¹.

	Taux de croissance annuel moyen selon les auteurs					
	2008-2013 selon Roskill 2009			2008-2020 selon Yaksic et Tilton 2009	2010-2020 selon TRU 2011	2012-2020 selon Roskill 2012
	hypothèse basse	cas de base	hypothèse haute			
Verres et céramiques	1.5%	3.5%	5.5%	3.0%	3.5%	4.0%
Batteries pour EV	43.6%	55.7%	68.9%	15.0%	18.7%	64.0%
Batteries pour autres	4.0%	6.9%	9.9%			13.0%
Piles	1.2%	3.1%	4.8%	8.0%	3.1%	9.0%
Lubrifiants	2.0%	3.0%	4.0%	5.0%		5.0%
Aluminium	0.0%	2.4%	6.0%	0.0%	-1.2%	-20.0%
Traitement de l'air	-1.4%	1.7%	2.6%	5.0%	3.1%	3.0%
Caoutchouc et polymères	1.8%	4.2%	6.5%	4.0%	3.3%	5.0%
Pharmacie et chimie fine	2.5%	4.5%	6.3%		3.2%	4.0%
Coulée continue	0.6%	2.5%	4.1%		5.1%	3.0%
Alliages Li-Al	2.3%	6.1%	9.4%			4.0%
Electronique	0.0%	0.0%	0.0%			
Autres	2.6%	4.9%	7.0%			
Total (combiné)	3.0%	5.8%	8.6%		6.4%	7.5%

Tableau 14 - Taux de croissance annuel moyen de la consommation de lithium par secteur d'ici 2020, selon les auteurs

¹¹ Mathématiquement, si la consommation d'un matériau quelconque augmente de 15 % par an et s'il est intégralement recyclé exactement au bout de 10 ans d'utilisation (100 % de recyclage), le matériau recyclé issu de la consommation de l'année n-10 ne permet de subvenir qu'à 25 % de la consommation de l'année n. Cette proportion descendrait à 11 % de couverture pour un taux de croissance annuel de 25 %.

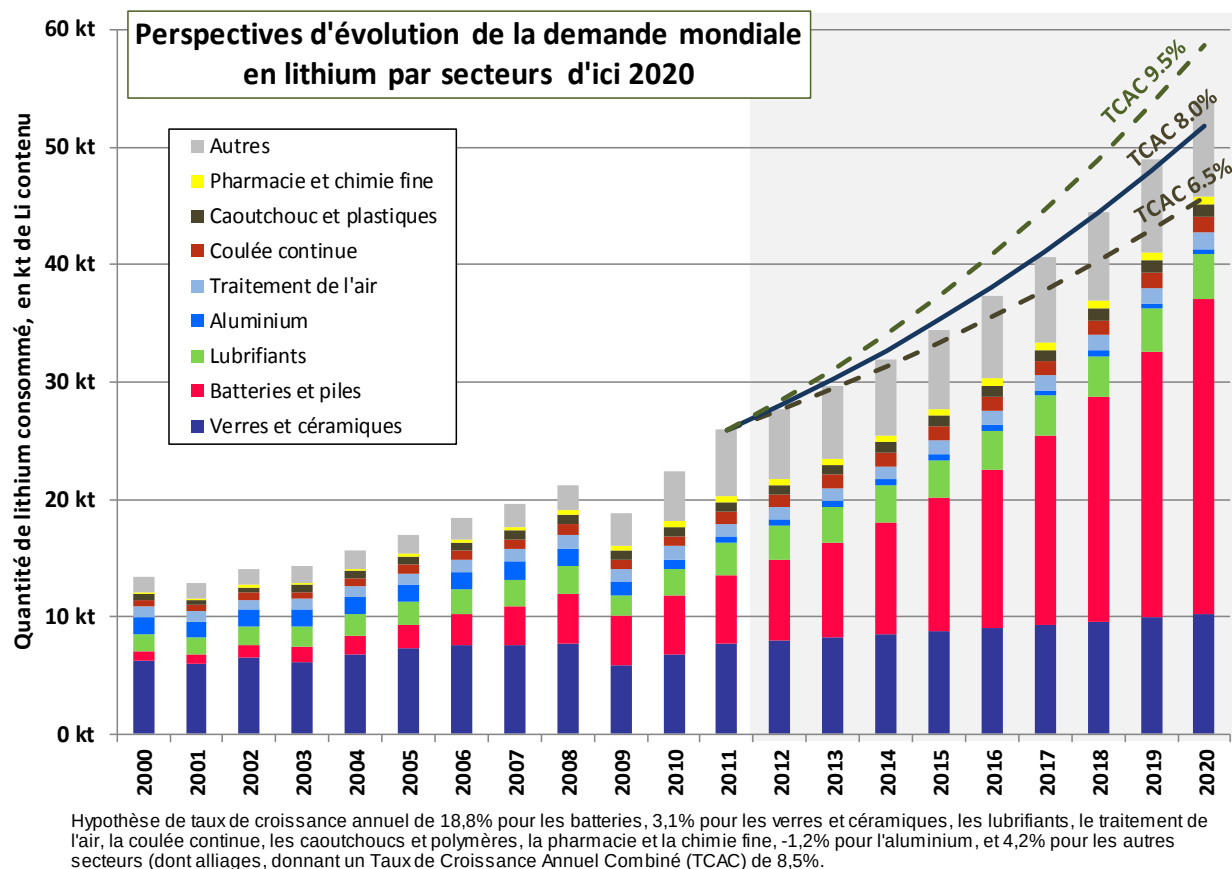


Figure 15 - Illustration d'une perspective d'évolution de la demande mondiale en lithium par secteurs.

Gruber and Medina (2010) et Gruber, Medina et al. (2011) ont proposé une modélisation des besoins en lithium d'ici 2100, avec des hypothèses de croissance de PIB mondial de 2 et 3 %, de recyclage optimisé (90 % des batteries recyclées, récupération de 90 % du lithium), d'une production de véhicules atteignant 630 millions par an, et d'une pénétration progressive des véhicules électriques passant à 100 % à partir de 2083. Ils ont calculé qu'ainsi, la demande cumulée en lithium de 2010 à 2100 tous usages confondus, serait de 19,6 Mt Li, dont 3,2 Mt pour des usages autres que les batteries, 3,6 Mt pour les batteries d'appareils portables, et 12,8 Mt pour les batteries de véhicules. Les ressources mondiales déjà répertoriées devraient permettre de satisfaire une telle demande (cf. Chapitre 4).

4. L'offre : ressources et production mondiale

4.1. LES SOURCES DE LITHIUM

4.1.1. Abondance du lithium dans l'écorce terrestre

Le lithium se situe, par ordre d'abondance décroissante, au 32^e rang sur 83 éléments significativement présents dans l'écorce terrestre¹².

Son abondance moyenne dans la croûte terrestre (« clarke ») est estimée à 20 ppm (20 g/t), du même ordre que le niobium. Il est trois fois moins abondant que le cuivre (60 ppm) mais plus abondant que le plomb (14 ppm) (CRC Handbook of Chemistry and Physics, 2011).

L'eau de mer contient environ 0,18 mg de lithium par litre.

4.1.2. Les minéraux de lithium

Le lithium ne se rencontre jamais libre dans la nature. En dehors des ions en solutions salines dans les saumures (salars, eaux souterraines géothermales etc.) et dans l'eau de mer, le lithium se rencontre sous forme de divers minéraux, essentiellement de silicates et silico-aluminates plus ou moins complexes (spodumène, pétalite, lépidolite, hectorite, etc.) et des phosphates (amblygonite, triphylite, etc.) pour les plus importants d'entre eux. On dénombre au total environ 145 espèces minérales.

Le tableau 15 liste les minéraux majeurs de lithium.

À noter que le spodumène peut former des cristaux gigantesques, généralement pierreux, dans certaines pegmatites, avec un record historique de 14 m de long pour un cristal dans la mine désormais fermée d'Etta, au Sud-Dakota (cf. Fig.16). Il peut aussi former des cristaux de qualité gemme, éventuellement colorés en rose ("kunzite", Fig.17) ou vert ("hiddénite"), utilisés en joaillerie.

¹² Les éléments naturels portent les numéros atomiques de 1 à 92, mais les n° 43 (technétium) et 61 (prométhium), instables, n'existent pratiquement pas naturellement, et 7 éléments lourds, Po, At, Rn, Fr, Ra, Ac et Pa sont fortement radioactifs et n'existent qu'à l'état d'infra-traces à courte durée de vie, produits par la décroissance radioactive naturelle de l'uranium et du thorium.

Minéral	Formule	Teneur théorique en Li	Teneur théorique en Li ₂ O	Teneur théorique en LCE*	Teneur commerciale en Li
Spodumène	LiAlSi ₂ O ₆	3.73%	8.0%	19.9%	de 1.3 à 3.6% Li
Pétalite	LiAlSi ₄ O ₁₀	2.27%	4.9%	12.1%	de 1.6 à 2.1% Li
Eucryptite	LiAlSiO ₄	5.51%	11.9%	29.3%	2.3% Li
Bikitaïte	LiAlSi ₂ O ₆ .H ₂ O	3.40%	7.3%	18.1%	
Lépidolite	KLi ₂ AlSi ₃ O ₁₀ (OH,F) ₂	~3.84%	~8.3%	~20.5%	de 1.4 à 1.9% Li
Zinnwaldite	KLiFeAl ₂ Si ₃ O ₁₀ (F,OH) ₂	1.59%	3.4%	8.5%	
Amblygonite	LiAlPO ₄ (F,OH)	4.73%	10.2%	25.2%	de 3.5 à 4.2% Li
Montebrasite	(Li,Na)AlPO ₄ (OH,F)	1 à 4%			
Lithiophyllite	LiMnPO ₄	4.43%	9.5%	23.6%	
Triphylite	LiFePO ₄	4.40%	9.5%	23.4%	
Hectorite	Na _{0.3} (Mg,Li) ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	~1.93%	~4.1%	~10.3%	
Jadarite	LiNaSiB ₃ O ₇ (OH)	2.85%	6.1%	15.2%	
Zabuyelite	Li ₂ CO ₃	18.79%	40.4%	100%	
Elbaïte	Na(Li _{1.5} Al _{1.5})Al ₆ Si ₆ B ₃ O ₂₇ (OH) ₄	1.11%	2.4%	5.9%	

* LCE : Equivalent en carbonate de lithium (Lithium Carbonate Equivalent)

Tableau 15 - Les principaux minéraux de lithium et leur composition.



Figure 16 - Photo historique d'un cristal de spodumène de 14 m de long excavé dans la mine d'Etta (Sud-Dakota) en 1904, parue dans *Economic Geology*, Vol.20 (1925). (Source : www.giantcrystals.strahglen.org)



Figure 17 - Kunzite de Maharitra, Madagascar (www.webmineral.brgm.fr, Photo U.de Cayeux)

4.1.3. Types de gisements

Les concentrations de lithium en permettant une exploitation économique sont de deux types majeurs très différents :

- les saumures des "salars", qui sont de grands lacs salés partiellement asséchés que l'on rencontre en particulier dans les hauts plateaux andin et tibétain, qui représentent environ 60 % des ressources mondiales actuellement identifiées en lithium et assurent environ 2/3 de la production mondiale de lithium (généralement sous forme de carbonate) ;
- les minéraux lithinifères concentrés dans certaines pegmatites et certaine coupoles granitiques et greisens, assez largement répartis dans le monde. Ces gisements représentent environ 26 % des ressources mondiales actuellement identifiées en lithium et couvrent environ 1/3 de la production mondiale de lithium contenu. De cette production, 2/3 est utilisée directement sous forme de minéral (verrerie et céramiques), et 1/3 est transformé en carbonate de lithium et autres composés.

Il existe aussi des concentrations et gisements potentiels non-conventionnels, en cours d'étude, et dont certains pourraient arriver en production dans les prochaines années :

- l'hectorite, une argile (smectite) lithinifère, dont il existe un gisement en cours d'étude au Nevada (Kings Valley) dont la préfaisabilité a été remise en décembre 2011 ;
- la jadarite, un minéral boro-lithinifère dont il existe un gisement en cours d'étude en Serbie (Jadar) ;
- des saumures géothermales ;
- des saumures de champs pétroliers ;
- éventuellement même les océans.

Historiquement, le lithium a d'abord été exploité à partir des minéraux, et en particulier avec les pegmatites de Caroline du Nord (Kings Mountain, Bessemer City). La production de lithium à partir des saumures n'est devenue significative qu'à partir de la

fin des années 1980 et les années 1990. La première production à partir de saumures date de 1964 par Foote à Silver Peak / Clayton Valley au Nevada. L'exploitation du Salar de Atacama (Chili) a commencé en 1984 par Chemetall, rejoint par SQM en 1997. L'exploitation du Salar del Hombre Muerto (Argentine) a débuté en 1995. En Chine, l'exploitation des saumures n'aurait commencé qu'en 2004, avec une montée en puissance à partir de 2007. Les mines de pegmatite de Caroline du Nord ont fermé en 1991 en raison du coût inférieur d'exploitation des saumures.

Chacun des types de gisements est décrit plus en détail dans les sections 4.1.4 à 4.1.9 ci-après.

4.1.4. Les saumures des "salars"

Les "salars" sont des lacs salés en milieu désertique et en bassins endoréiques¹³. Les éléments mis en solution par lessivage des bassins versants par les eaux de pluie convergent vers ces lacs où ils se concentrent par évaporation. Les salars présentent souvent une croûte de sels en surface, et des saumures¹⁴ en dessous ou en imprégnation des pores et interstices de la croûte de sel.

Lorsque les terrains drainés comprennent des formations magmatiques suffisamment alcalines, il peut y avoir concentration significative de lithium dans les saumures (0,02 % à 0,2 %).

Mais tous les lacs salés ne contiennent pas de saumures : certains sont secs. Et par ailleurs les saumures ne présentent pas toutes des concentrations en lithium économiques. Il faut un apport spécifique en lithium par le lessivage de certaines roches magmatiques siliceuses alcalines. Les salars à saumures riches en lithium sont donc assez rares, et se limitent essentiellement à l'Altiplano andin (Chili, Bolivie, Argentine), au Sud-Ouest des États-Unis, et au plateau tibétain (Tibet, Qinghai, en Chine).

Ce n'est qu'exceptionnellement que l'on peut y rencontrer du lithium sous forme de sel cristallisé : dans le lac salé de Zabuye, au Tibet, a été identifié le carbonate Li_2CO_3 naturel cristallisé, nommé zabuyélite.

Plus d'une cinquantaine de salars sont connus dans l'altiplano andin (Chili, Bolivie, Argentine). Leur inventaire et l'évaluation de leur potentiel en lithium n'est pas achevé, en raison des zonalités et de la localisation très spécifique des secteurs enrichis en lithium.

Les principaux salars exploités actuellement, entre autres pour le lithium, sont :

- le Salar de Atacama, au Chili, exploité au nord par SQM / Potash Corp. et au sud par SCL / Chemetall (Fig.18). Ce salar est exceptionnel par ses qualités et ses

¹³ Bassins fermés sans écoulement vers la mer.

¹⁴ Solutions salines saturées.

teneurs élevées en lithium. Pour SQM, le plus gros producteur, le lithium n'est qu'un co-produit de l'exploitation des saumures, avec le chlorure et le sulfate de potassium. Il y a plusieurs autres salars dans les environs, plus petits et non encore totalement évalués ;

- le Salar del Hombre Muerto, en Argentine, dont une partie est exploitée par FMC ;
- le lac salé de Silver Peak, au Nevada (USA), exploité par Chemetall ;
- le lac salé de Zabuye, au Tibet, et les lacs salés du bassin de Qaidam, en particulier les lacs de Xitai (= West Tajnar), Dongtai (=East Tajnar) et Qarhan (= Charhan), au Qinghai, en Chine.

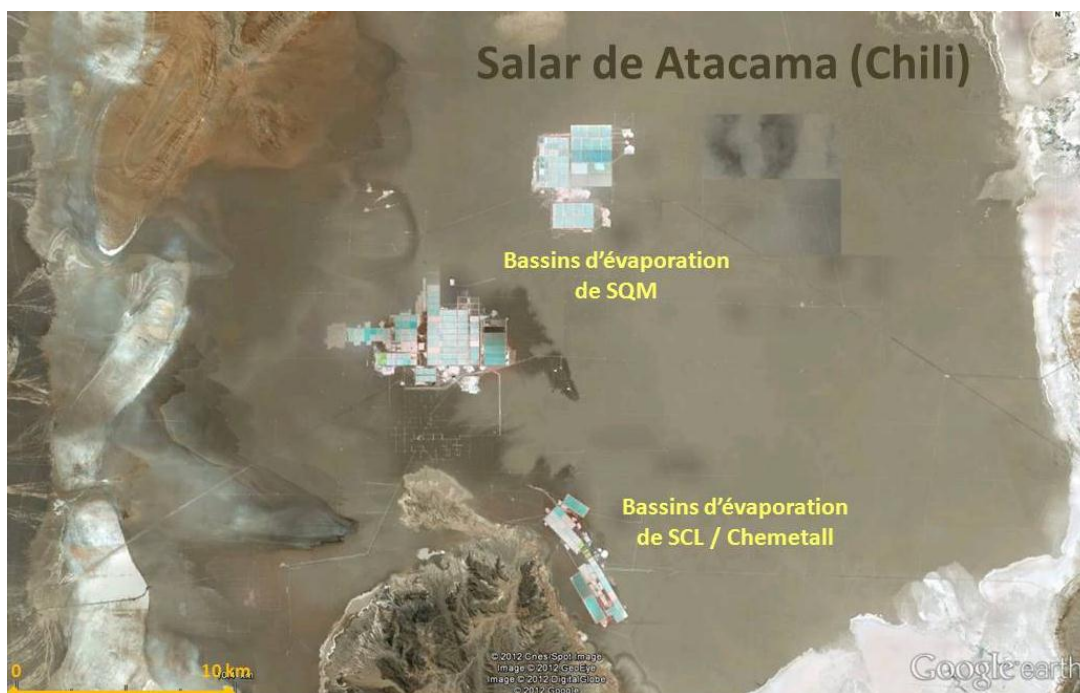


Figure 18 - Les bassins d'évaporation de SQM et SCL dans le Salar de Atacama, vus de satellite (source: Google Earth)

Les principaux salars à lithium sont listés en Tableau 16 avec leurs caractéristiques. Nombre d'entre eux sont en cours d'évaluation, certains par des juniors, parmi lesquels on pourra citer les Salars del Rincon, de Olaroz et de Cauchari en Argentine.

Le Salar de Uyuni, en Bolivie (Fig.19), non encore exploité industriellement, contiendrait l'une des plus grandes accumulations de lithium en saumure. Mais le gouvernement bolivien ne favorise pas les investissements étrangers et entend le développer via sa société d'état Comibol. Le Salar est aussi pénalisé par un ratio Mg/Li de 19, beaucoup plus élevé que dans les Salars de Atacama (6,4) et del Hombre Muerto (1,4). Le Rio Grande, qui alimente le Salar de Uyuni, draine les volcanites acides de la région du Lipez et mène le lithium au salar. Le soufre présent dans ce complexe volcanique semble jouer un rôle important dans la mobilisation du lithium par lessivage météorique.



Figure 19 - Le Salar de Uyuni, en Bolivie (source : Wikimedia Commons)

Parmi les facteurs d'exploitabilité d'une saumure pour le lithium, outre la teneur en lithium, le ratio de la teneur en magnésium sur la teneur en lithium doit être le plus bas possible. En effet, ces saumures sont exploitées par évaporation solaire dans des bassins successifs. Les chlorures de sodium puis de potassium cristallisent dans les premiers bassins, mais le chlorure de magnésium a tendance à rester avec celui de lithium, ce qui nécessite ensuite une séparation chimique coûteuse. Les exploitants chinois ont toutefois surmonté la difficulté et produisent du carbonate de lithium à petite échelle depuis 2004 et sont montés en capacité depuis 2007 (cf. Tab.21) à partir des salars du Qinghai dont les rapports Mg/Li sont très élevés (40 à 60).

Le taux d'évaporation est fondamental aussi : il faut que le taux d'évaporation soit largement supérieur à la pluviométrie (milieu le plus désertique possible) d'une part pour permettre la concentration naturelle des divers sels, mais d'autre part pour rendre efficace la concentration artificielle des saumures et la cristallisation des sels dans des bassins d'évaporation au soleil, qui est le procédé de récupération le plus économique. D'après le tableau 16, le cas le plus favorable et de loin est le Salar de Atacama. Le temps de séjour des saumures dans les bassins d'évaporation est de plusieurs mois, et d'éventuelles pluies viendraient rediluer les saumures, ce qui pénaliserait par exemple le Salar de Uyuni, en Bolivie, soumis à une saison des pluies entre novembre et mars (200 mm/an en moyenne), alors que le Salar de Atacama est dans une région où il ne pleut pratiquement jamais (<15 mm/an).

Les ressources globales en lithium dans les salars étaient estimées à 17,7 Mt de Li contenu par Evans en 2009. Le cumul des ressources du tableau 16 atteint 21 Mt.

Récapitulatif des principaux salars à ressources en lithium identifiées, et des saumures géothermales et de champs pétrolières

(sources : Roskill, 2009 ; Evans, 2009 ; Sites Internet des sociétés)

Pays	Province	Gisement	Statut	Société	Société mère	Surface Salar	Altitude	Mg/Li	Taux d'évaporation (mm/an)	Date démarrage	Date fermeture	Teneur moy. Li	Res-source Li (kt)
SALARS "CONVENTIONNELS"													
Chili	Antofagasta	Salar de Atacama (N)	Production	SQM (Soc. Química y Minera de Chile)	PotashCorp	3 000 km²	2 450 m	6,4	3 700	1997		0.140%	6 300 kt
	Antofagasta	Salar de Atacama (S)	Production	SCL (Sociedad Chilena de Lito)	Chemetal	2 450 m	2 450 m	6,4	3 700	1984		130-420 mg/l	
	Atacama	Salar de Pedernales				335 km²	3 400 m					1 240 mg/l	220 kt
	Atacama	Salar de Maricunga				145 km²	3 760 m	8				863 mg/l	
	Atacama	Salar de la Isla et voisins ("Salares 7")	Exploration	Lithium3 Energy	OTCBB: LIE		4 360 m						
Argentine	Catamarca	Salar del Hombre Muerto (Fenix)	Exploration	Talison Lithium	TSX: TLH		4 100 m	1,37	2 600	1997		0.052%	800 kt
	Catamarca	Salar del Hombre Muerto (Sal de Vida)	Production	Minera del Altiplano	FMC	565 km²	4 100 m	2,2	2 600	2015		754 mg/l	1 359 kt
	Salta	Salar de Rincon	Pilote	Lithium1 / KORES	TSX-V: LI	280 km²	3 910 m	8,5	2 600	2012		0.033%	1 118 kt
	Salta	Salar de Ratonés		Rincon Lithium	Sentient	38 km²	3 850 m						
	Salta	Salar de Centenario		Rodinia Lithium	TSX-V: RM	59 km²	3 950 m						
Juizuy	Juizuy	Salar de Olaroz (+ Cauchari, ORL)	Construction	Oroobre / Toyota Tsusho	TSX: ORL	140 km²	3 980 m	2,4	2 600	2013		690 mg/l	1 210 kt
Juizuy	Juizuy	Salar de Cauchari (+ Olaroz, LAC)	Faisabilité	Lithium Americas	TSX: LAC	44 km²	3 960 m	2,8	2 600	2014		632 mg/l	1 517 kt
Catamarca	Catamarca	Salar de Diablillos		Rodinia Lithium	TSX-V: RM		3 970 m	3,7	2 600	2015		556 mg/l	529 kt
Salta/Juizuy	Salta/Juizuy	Salar de Salinas Grandes		Oroobre / Rodinia Lithium			3 415 m						
Salta	Salta	Salar de Mariana (Lullailaco)	Exploration	International Lithium	TNR Gold	160 km²	3 760 m					0.044%	
Bolivia	Potosi	Salar de Uyuni	Pilote	Gerencia Nacional de Recursos Evaporiticos	Combol	10 000 km²	3 660 m	18,6	1 500			0.053%	5 500 kt
	Potosi	Salar de Pastos Grandes	Exploration	New World Resources / Lithium3 Energy		118 km²	4 450 m					0.164%	
Onoro	Onoro	Salar de Coipasa		Gerencia Nacional de Recursos Evaporiticos	Combol	3 300 km²	3 660 m					0.034%	200 kt
Chine	Tibet	Zhabuye	Production	Tibet Minerals / BYD			4 435 m	0,001	2 300	2008		0.068%	1 530 kt
	Tibet	DongxiangCuo (DXC)	Faisabilité	Zhong Chuan (retrait de Sterling Group Ventures le 30/10/2011)			4 800 m	0,22	2 300			0.040%	181 kt
Qinghai	Qinghai	West Tailnaer (XTai)	Production	Qinghai Citic Guoan			2 690 m		3 560	2010			
Qinghai	Qinghai	East Tailnaer (DongTai)	Production	Qinghai Citic Guoan / Qinghai Lithium Co.			2 690 m	40 à 60	3 560	2004		0.030%	2 020 kt
Qinghai	Qinghai	Qarhan / Chaerhan	Production	Qinghai Lanke			2 690 m		3 560	2009			
Qinghai	Qinghai	Da Qaidam					3 250 m		3 560				
USA	Nevada	Silver Peak / Clayton Valley	Production	Chemetal Foote Corp.	Chemetal		1 310 m	1,43	1 000	1966		0.020%	300 kt
	Nevada	Clayton Valley		Rodinia Lithium	TSX-V: RM		1 310 m		1 000				
	California	Searles Lake	(ne produit plus Li)	Searles Valley Minerals			495 m	125	1 000	1978		0.005%	20 kt
	Nevada	Fish Lake	Exploration	International Lithium									
	Utah	Great Salt Lake	Prod. de Mg	US Magnesium LLC	TNR Gold		1 280 m	250	1 800			0.004%	520 kt
TOTAL SALARS "CONVENTIONNELS"													
23 325 kt													
SAUMURES GEOTHERMALES													
USA	Californie	Brawley / Salton Sea	Pilote	Simbol Minerals / Itochu			-70 m	1,3		2011		0.020%	316 kt
France	Alsace	Soultz-Cronenbourg (Nord Alsace)	R&D					1,0				0.018%	300 kt
616 kt													
TOTAL SAUMURES GEOTHERMALES													
SAUMURES DES CHAMPS PETROLIFERES													
USA	Arkansas/Texas	Smackover						20				0.015%	750 kt
Canada	Alberta	Fox Creek/Beaverhill						10				0.012%	515 kt
Russie	Irkoutsk	Znamenskoye						60				0.048%	33 kt
1 298 kt													
TOTAL SAUMURES DE CHAMPS PETROLIFERES													
25 239 kt													
TOTAL TOUTES SAUMURES (hors Mer Morte et Océans)													
POUR MÉMOIRE, MERS ET Océans													
Israël/Jordanie		Mer Morte					-415 m	2 000				0.001%	2 000 kt
Monde		Océans					0 m	7 000				0.000%	

Tableau 16 - Récapitulatif des principaux gisements de lithium en saumure répertoriés

4.1.5. Les minéraux de lithium en roche

Les gisements à minéraux de lithium (spodumène, pétalite, amblygonite, lépidolite, etc.) sont pour la plupart des pegmatites granitiques¹⁵ particulières appelées "LCT" (pour lithium, césium, tantale). La majorité des pegmatites LCT sont des filons étroits ne dépassant pas 1 ou 2 m d'épaisseur et de moins d'une centaine de mètres d'extension. Mais certaines de ces pegmatites atteignent des dimensions importantes ("pegmatites LCT zonées géantes") et sont exploitables à échelle industrielle, comme Greenbushes en Australie-Occidentale, Bernic Lake au Manitoba et Lacorne au Québec, Foote/Kings Mountain en Caroline-du-Nord, Bikita au Zimbabwe, Manono et Kitiotolo en RDC, qui constituent d'importants gisements exploités ou susceptibles d'être exploités pour le lithium, mais aussi pour divers autres métaux : tantale, étain, béryllium.

Des minéraux à lithium sont également disséminés dans certaines coupoles de leucogranites péralumineux à tantale et étain (exemple d'Échassières, en France) et leurs apex ou bordures greisenisés. Il s'agit alors le plus souvent de lépidolite, zinnwaldite et amblygonite.

Les teneurs en lithium varient selon les minéraux. Le tableau 15 au paragraphe 4.1.2 liste les principaux minéraux à lithium et leur composition.

Le spodumène représente le principal tonnage de minéraux à lithium exploité.

Le plus gros gisement exploité est la pegmatite de Greenbushes, en Australie Occidentale (Fig.20), où Talison Lithium Ltd produit désormais plus de 300 kt de concentré de spodumène par an, contenant 8 à 9 kt de Li contenu, soit plus d'un quart de la production mondiale de lithium.

¹⁵ Les pegmatites sont des roches magmatiques silicatées à gros grains ; elles correspondent aux produits de fin de cristallisation des magmas enrichis en éléments volatils : H₂O, CO₂, F, Cl, B. Les plus fréquentes se rencontrent en association avec le magmatisme felsique et sont couramment dénommées pegmatites granitiques. Elles se disposent de manière concentrique autour des intrusions granitiques, dans l'encaissant. Une pegmatite est composée principalement de quartz, feldspaths et micas, avec de nombreux minéraux accessoires, à forte valeur économique, sources de Li, Cs, Nb, Ta, Sn, Mo, U, et Be. De manière générale, les gisements sont associés aux pegmatites de profondeur moyenne (3,5 à 7 km) et aux pegmatites miarolitiques ou coupoles subvolcaniques de faible profondeur.

Les pegmatites forment généralement des corps de petites dimensions (moins d'une centaine de mètres), leur morphologie est souvent complexe, en pipe, amas ou lentilles.

Les corps sont souvent zonés avec :

- une zone de bordure à grain fin, avec quartz, feldspath et micas ;
- une zone à grain moyen, de même composition minéralogique ;
- une zone intermédiaire à minéraux économiques de Li (spodumène, amblygonite) ;
- un cœur quartzeux, éventuellement enrichi en béryl (Be), cassitérite (Sn) et wolframite (W).



Figure 20 - La mine à ciel ouvert de Greenbushes (Australie-Occidentale).
(© www.talison-lithium.com, Image Library, Image # 0863-tal-112.jpg)

Historiquement, les pegmatites de Caroline du Nord (district de Kings Mountain) ont été un producteur majeur de lithium jusqu'à la fermeture de la dernière mine en 1998 en raison de la nouvelle concurrence des saumures.

Les autres exploitations importantes de minéraux sont celles de Bernic Lake, au Canada (Tanco / Cabot), qui a produit de l'ordre de 22 kt de spodumène par an mais a suspendu sa production en 2009, de Bikita, au Zimbabwe (Bikita Minerals), qui produit de l'ordre de 30 kt/an de minéraux, essentiellement de la pétalite, et un peu de spodumène et minéraux divers, et plusieurs exploitations au Sichuan et au Jiangxi, en Chine, qui produisent environ 46 kt/an de spodumène. Il existe d'autres exploitations moins importantes au Brésil (spodumène et pétalite), au Portugal, en Espagne et en Inde (lépidolite). En France, le gisement d'Échassières produit des sables et roches broyées lithinifères en sous-produit du kaolin.

De nombreux autres gisements sont en cours d'investigation, au Canada, en Australie, en Finlande, etc.

Le tableau 17 liste les principaux gisements de lithium en minéraux pris en compte.

Les ressources en minéraux à lithium des pegmatites et coupoles granitiques étaient estimées à 7,6 Mt de lithium contenu par Evans en 2009. Le cumul des ressources du tableau 17 atteint 12,3 Mt.

Pays	Province	Gisement	Statut	Société	Bourse ou Société mère	Minéraux	Date démarrage	Date fermeture	Réserves minérales	Teneur Li réserves (%)	Réserves e Li (kt)	Ressource minérale	Teneur Li ressource (%)	Ressource Li (kt)	Source
MINÉRAUX "CONVENTIONNELS"															
Afghanistan	Onuzgan	Taghawlor												680 kt	USGS/Afgh. Geol. Survey
	Konar	Pasghushta												545 kt	USGS/Afgh. Geol. Survey
	Konar	Jamanak												209 kt	USGS/Afgh. Geol. Survey
Australie	Konar	Drungul												118 kt	USGS/Afgh. Geol. Survey
	WA	Greenbushes	Production	Talisson-Lithium	TSX: TLH	Spodumène								857 kt	Talisson Lithium 2011
	WA	Mount Cattlin	Production	Galaxy Minerals	ASX: GXY	Spodumène								92 kt	
	WA	Mount Marion	Construction	Reed Resources / Mineral Resources	ASX: RDR / AS	Spodumène								69 kt	
Argentine	Catamarca	Ipiaca	Ancienne mine				1970	1978							
	Catamarca	Reflejos del Mar	Ancienne mine				1959	1978							
Autriche	Kärnten	Koralpe													
Bésil	Minas Gerais	Cachoeira / Araçuaí	Production	Cia Brasileira de Lito		Spodumène								75 kt	Roskill 2009
	Minas Gerais	Itinga	Suspendu	Arqueana de Mineros e Metais		Spodumène								23 kt	
	Minas Gerais	Volta Grande / Mibra	Pilote	Cia Industrial Fluminense		Spodumène									
Canada	Manitoba	Bernic Lake	Suspendu	Tanco	AMG NV (NYSE)	Spodumène								100 kt	Roskill 2009
	Manitoba	Strider / Wekusko Lake	Exploration		Cabot	Spodumène		2009						19 kt	
	NW Territoires	Moose	Exploration	Redinia Lithium	TSX-V: RM	Spodumène								24 kt	
	Ontario	Separation rapids / Big Whopper	Exploration	International Lithium Corp	TSX-V: ILC	Spodumène								3 kt	
	Ontario	Separation rapids / Big Mack	Faisabilité	Avalon Rare Metals	TSX: AVL	Péritelite			7.7 Mt	0.65%	50 kt	11.6 Mt	0.62%	72 kt	
	Ontario	Separation rapids / Big Mack	Scoping	Pacific Iron Corp		Péritelite						0.3 Mt	0.69%	2 kt	
	Ontario	Georgia lake	Exploration	Rock Tech Lithium	TSX-V: RCK	Spodumène						7.7 Mt	0.49%	35 kt	
	Québec	James Bay / Cyr	Faisabilité	Lithium One : Galaxy resources (TSX)	TSX-V: LI	Spodumène						22.2 Mt	0.58%	129 kt	Lithium1 2011
	Québec	Lac Beauport / Quebec Lithium	Construction	Canada Lithium	TSX: CLQ	Spodumène	2013		17.1 Mt	0.44%	75 kt	104.2 Mt	0.55%	574 kt	Canada Lithium 2012
	Québec	Moban	Scoping	Peniya	ASX: PEM	Spodumène						5.3 Mt	0.70%	37 kt	
	Québec	Whabouchi	Faisabilité	Nemaska Lithium	TSX: NMX	Spodumène	2013					29.5 Mt	0.71%	210 kt	
Chine	Xinjiang	Koktokay	Epulsé			Spodumène	1946	1999						0 kt	
	Xinjiang	Dahongliutan / Heitan	Production	Xinjiang Heitan Xinlong Mining Co		Spodumène									
	Sichuan	Jiajika	Production	Sichuan Mineral Industry	Etat	Spodumène						80.3 Mt	0.59%	477 kt	Roskill 2009
	Sichuan	Maerkang	Production	Sichuan Sheng	CITIC Group	Spodumène	1989							224 kt	
	Jiangxi	Ningdu	Production	Ningdu Taiyu Lithium Industry		Spodumène	2007							325 kt	Clarke & Herben
	Jiangxi	Yichun	Production	Yichun Huli		Lépidolite								325 kt	
	Sichuan	Jinchuan	Production	Sichuan Jinchuan Lithium Minerals		Spodumène	1988							224 kt	Roskill 2009
	Sichuan	Lijiangou	Production	Sichuan Dexin		Spodumène	2008							52 kt	
	Hunan	Pingjiang / Hupai	Production	Pingjiang Nonmetal Mine		Lépidolite						70.7 Mt	0.26%	181 kt	
	Hunan	Daodian	Standby	Hunan Daodian County Govt											
	Sichuan	Keeyin													
	Sichuan	Zhuosijia													
	Henan	Lushi				Spodumène						20.0 Mt	0.46%	93 kt	
Congo DR	Tanganyika	Manono	Standby	Lushi Guampo Town Govt		Spodumène						144.1 Mt	0.58%	836 kt	Roskill 2009
	Tanganyika	Kitorido	Ancienne mine			Spodumène	1919							310 kt	Roskill 2009
Espagne	Salamanca	Mina Feli	Production	Minera del Duero	SAMCA	Lépidolite	1919								
	Galicia	Doadre / Presqueiras	Exploration	Solid Resources Inc	TSX-V: SRW	Spodumène						9.8 Mt	0.25%	25 kt	Solid resources, Dec. 2011
Finlande	Ostrobothnie Centr	Laitari + Oukovesi	Exploration	Keilber Oy	Nordic Mining	Spodumène			1.3 Mt	0.47%	5.9 kt	40.0 Mt	0.43%	13 kt	BRGM
France	Auvergne	Echassières	Production	Société des Kaolins de Beauvoir	Imerys	Lépidolite						8.4 Mt	0.36%	130 kt	BRGM
	Bretagne	Trégunc	Inactif			Lépidolite, amblygonite								31 kt	

Tableau 17 - Principaux gisements de lithium en minéraux répertoriés

Pays	Province	Gisement	Statut	Société	Bourse ou Société mère	Minéraux	Date démarrage	Date fermeture	Réserves minéral	Teneur Li réserves (%)	Réserves Li (kt)	Ressource minéral	Teneur Li ressource (%)	Ressource Li (kt)	Source
MINÉRAUX "CONVENTIONNELS" (suite)															
Irlande	Carlow / Wicklow	Blackstairs Mt / Leinster	Exploration	International Lithium Corp	TSXV: ILC	Spodumène						2.0 Mt	0.63%	13 kt	Roskill 2009
Malaisie		Bourjouni	Epulsé			Péridotite, lépidolite	1945	1998				0.3 Mt	1.40%	4 kt	
Namibie		Karibib	Production	Soc. Mineira de Pegmatites		Lépidolite								0 kt	
Portugal		Guarda + Mesquitela												10 kt	
Russie	Moumansk	Kolnozerskoye				Spodumène						70.2 Mt	0.53%	372 kt	RFML 2010
	Moumansk	Palmostundrovskoye				Spodumène						28.0 Mt	0.58%	163 kt	RFML 2010
	Gorny Altai	Alakshinskoye				Spodumène						18.2 Mt	0.51%	93 kt	RFML 2010
	Tyva	Tastyskoye				Spodumène						41.1 Mt	0.68%	279 kt	RFML 2010
	Irkutsk	Goltsouye				Spodumène						50.6 Mt	0.37%	186 kt	RFML 2010
	Irkutsk	Belorechenskoye				Spodumène						14.3 Mt	0.52%	74 kt	RFML 2010
	Irkutsk	Uliskoye				Spodumène						33.0 Mt	0.51%	167 kt	RFML 2010
	Chita	Zavinskoye	Suspendu			Spodumène		1997				29.0 Mt	0.32%	93 kt	RFML 2010
	Sakha	Kosterskoye				Spodumène						166.7 Mt	0.28%	465 kt	RFML 2010
Tchéquie	Bohème	Cinovek / (Zinnwald)	Ancienne mine			Antbygonite, lépidolite									
	Moravie	Rozna	Ancienne mine			Spodumène									
USA	North Carolina	Kings Mountain	Fermé			Spodumène	1951	1986						200 kt	Yakscic et Tilton, 2009
	North Carolina	Bessmer City / Cherryville	Fermé			Spodumène	1962	1998						335 kt	Yakscic et Tilton, 2009
	North Carolina	Divers non développés	Fermé			Spodumène								2 600 kt	Yakscic et Tilton, 2009
	South Dakota	Elita	Fermé			Spodumène	1883	1959							(Mine historique)
Zimbabwe		Bikita	Production	Bikita Minerals (Pvt) Ltd		Péridotite	1952				23 kt	1.6 Mt	1.40%	23 kt	
TOTAL MINÉRAUX "CONVENTIONNELS"															
ARGILES (HECTORITE)															
USA	Nevada	Kings Valley	Faisabilité	Western Lithium		Hectorite	2015		27.1 Mt	0.40%	107 kt	92.5 Mt	0.38%	348 kt	Western Lithium 2011
	Nevada	Borate Hills	En suspens	American Lithium Minerals	OTC-BB: AML	Argiles				0.28%			0.28%		
TOTAL ARGILES															
JADARITE															
Saoudie		Jadar	Pré-faisabilité	Rio Tinto					40.0 Mt	0.66%	263 kt	125.3 Mt	0.84%	1 045 kt	Rio Tinto 2011
TOTAL JADARITE															
TOTAL TOUS MINÉRAUX															
1 045 kt															
13 632 kt															

Tableau 17 (suite) - Principaux gisements de lithium en minéraux répertoriés

4.1.6. L'hectorite

L'hectorite ($\text{Na}_{0,3}(\text{Mg,Li})_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) est une argile magnésienne lithinifère, dont plusieurs occurrences sont connues aux États-Unis. La principale est celle de Kings Valley (Nevada, 0,395 % Li), mais d'autres indices à plus faible teneur sont répertoriés, à Spor Mountain (Utah, 0,11 % Li, dans les tuffs exploités pour le béryllium), à Yavapai (Arizona, 0,10 % Li), Kramer (Californie, 0,19 % Li), et aussi à Begadic en Turquie.

Il n'en existe encore aucune exploitation de ce type dans le monde.

Le gisement de Kings Valley, dans le nord du Nevada, consiste en des remplissages tuffacés à hectorite de la caldeira volcanique de MacDermitt. Il est exploré depuis quelques années par la société junior Western Lithium. Elle a publié une étude de pré faisabilité en décembre 2011. Les réserves prouvées et probables sont de 27,1 Mt à 0,395 % Li, soit 107 kt de lithium contenu, sur des ressources totales de 90,4 Mt à 0,27 % Li, soit 240 kt de lithium contenu. L'étude prévoit un démarrage en 2015 à 13 kt/an de carbonate de lithium (1,2 kt Li), passant progressivement à 26 kt/an (2,4 kt Li). Soit de 4 à 8 % de la production mondiale actuelle de lithium.

Les ressources globales en hectorite étaient estimées à 2 Mt de lithium contenu par Evans en 2009. Le tableau 17 n'a retenu que les ressources déclarées par Western Lithium.

4.1.7. La jadarite

La jadarite ($\text{LiNaSiB}_3\text{O}_7(\text{OH})$) est un minéral de bore et de lithium découvert en 2006 par la compagnie Rio Tinto près de la rivière Jadar en Serbie. Le projet Jadar a été évalué par Rio Sava Exploration, filiale locale de Rio Tinto. L'une des couches contient une ressource de 125,3 Mt @ 1,8 % Li_2O et 13,1 % B_2O_3 , soit 1,05 Mt de Li contenu. Le potentiel géologique serait double. Ces ressources permettraient à la société de produire 60 kt/an de Li_2CO_3 (soit 5,6 kt Li) et 300 kt/an d'acide borique pendant 20 ans. La profondeur de la couche, de 300 à 600 m, impliquerait une exploitation souterraine. Rio Tinto a lancé une étude de pré faisabilité en 2011, prévue sur 2 ans.

4.1.8. Les saumures géothermales

Les fluides géothermaux sont fréquemment salins et variablement minéralisés en lithium. Les synthèses récentes sur les ressources mondiales en lithium (Evans, Tahil, Roskill, 2009) mentionnent comme exemple à teneur significative le site du Sud du Lac "Salton Sea" (Brawley), dans l'extrême Sud de la Californie, avec 200 ppm Li, où son exploitation est activement étudiée (cf. plus bas), mais aussi Mammoth Lakes, dans le Centre-Est de la Californie (jusqu'à 200 ppm Li). Ces mêmes synthèses mentionnent quelques autres exemples où l'exploitation du lithium a pu un temps être envisagée, avec des teneurs plus modérées comme à El Tatio, au Chili (47 ppm), ou des teneurs plus modestes comme à Wairakei en Nouvelle Zélande (13 ppm Li), à Reykjanes, à 40 km de Reykjavik, en Islande (8 ppm). De telles teneurs semblent assez fréquentes dans les fluides géothermaux mais il n'en existe pas d'inventaire exhaustif.

À Brawley (Californie), la société Simbol Materials (ex-Simbol Mining) cherche à récupérer le lithium, mais aussi le manganèse et le zinc contenus dans les saumures géothermales qui alimentent déjà un groupe de centrales géothermiques de 288 MW sur la rive sud du lac Salton Sea (Salton Sea KGRA (Known Geothermal Resources Area), près de la frontière mexicaine. Un pilote de démonstration de récupération du lithium a été présenté en 2010. La société affiche une volonté de passer à une production significative de lithium d'ici à 2020. La société japonaise Itochu a pris une participation de 20 % dans le projet.

Des teneurs comparables en lithium ont été répertoriées en France, en particulier dans la nappe du Trias du nord de l'Alsace (150 à 220 mg/l¹⁶) et dans certains sites géothermaux du Bassin Parisien et de Limagne (cf. 4.2.2). Des teneurs intéressantes ont aussi été répertoriées dans les champs géothermiques italiens, jusqu'à 480 mg/l dans les couches profondes des Champs Phlégréens, mais avec des réservoirs de faible dimension.

Les ressources globales en lithium des saumures géothermales sont mal connues, seules celles de Salton Sea sont prises en compte par Evans (2009) au niveau de 0,3 kt Li (Evans, 2009). Dans la présente étude, nous ajouterons un potentiel équivalent pour la nappe du Trias d'Alsace du Nord (cf. 4.2.2 et Pauwels et al., 1991)

4.1.9. Les saumures des champs pétrolifères

Les eaux souterraines associées à certains gisements de pétrole et de gaz sont chargées en éléments (sels) dissous, et en particulier en lithium. Diverses eaux / saumures de champs pétrolifères ont été analysées en particulier en Amérique du Nord (USA, Canada), et des contenus en lithium de 50 à 700 mg/l ont été mesurés.

Aux États-Unis, les eaux souterraines de la formation pétrolifère jurassique Smackover, qui s'étend principalement du Texas à l'Arkansas, a fait l'objet d'une estimation de ressources, évaluées à 0,75 Mt Li contenu (Collins, 1976, repris par Evans, 2008), avec des teneurs citées de l'ordre de 173 mg/l. Des formations équivalentes se trouvent au Nord-Dakota, au Wyoming et en Oklahoma. Il est mentionné aussi du lithium dans les saumures du Paradox Basin, en Utah.

Au Canada, la société Channel Resources étudie les saumures lithinifères qui remontent avec les exploitations de gaz de Fox Creek (Alberta) et qui sont jusqu'à présent réinjectées sous terre. Un premier rapport technique a été publié en 2009.

L'inventaire des ressources globales en lithium des saumures des champs pétrolifères nord-américains n'est que partiel. Dans sa compilation des ressources en lithium, Evans (2008) ne reprend que celles de la Smackover Formation (0,75 Mt Li).

¹⁶ Certains auteurs publient les concentrations en lithium en ppm (parties par million) et d'autres en mg/l. Les ordres de grandeur sont équivalents, la teneur en ppm est égale à la teneur en mg/l divisée par la densité de la saumure, qui serait de 1 pour une eau pure mais peut monter à 1,2 pour une eau très salée.

Les saumures de Smackover sont exploitées dans l'Arkansas depuis 1961 pour le brome (Albermarle Corp. à Magnolia et Chemtura Corp. à Eldorado et Marysville, dans l'Arkansas). Leur production représente environ un tiers de la production mondiale de cet élément (USGS, 2010).

À noter que ces saumures situées sous les gisements de pétrole sont chaudes à une certaine profondeur et peuvent donc aussi être qualifiées de "géothermales". Il n'y a donc pas toujours de séparation nette entre ces deux types de saumures, comme dans le cas de la nappe du Trias en Alsace du Nord, où une partie des ressources géothermales étudiées sont sous-jacentes au gisement de pétrole de Pechelbronn.

4.1.10. Les océans

Pour mémoire, avec 0,18 mg/l de lithium en moyenne et un volume global des océans de 1,3 milliards de km³, la quantité totale de lithium présente dans les océans peut être estimée à 230 milliards de tonnes de lithium contenu.

L'exploitabilité du lithium à partir de l'eau de mer est envisagée depuis plusieurs décennies. Une étude de l'USGS de 1976 concluait déjà à sa faisabilité technique mais à un coût très supérieur au prix du lithium d'alors (Steinberg et Dang, 1976).

Elle a été à nouveau étudiée dans les années 1980 au Japon, avec un coût cité par Grosjean et al. (2011) de 80 US\$/kg (de carbonate)¹⁷.

Yaksic et Tilton (2009) citent, dans leur étude sur la courbe de disponibilité cumulée en fonction des coûts opératoires, un coût de 15 à 22 US\$/kg. C'est encore 10 fois le coût de production du Salar de Atacama. Les auteurs envisagent que cette extraction devienne pertinente au XXII^{ème} siècle.

La société sud-coréenne POSCO s'est associée en 2010 à un programme de R&D jusqu'en 2014 mené par l'Institut coréen des Géosciences et des Ressources Minérales et l'Institut de Recherche de Pohang des Sciences et Techniques Industrielles sur la possibilité d'extraire du lithium de l'eau de mer, dans l'objectif de produire entre 20 et 100 kt de carbonate de lithium par an.

La Mer Morte contient environ 10 mg/l de lithium, soit 50 fois plus que les océans, mais 20 fois moins que le plus pauvre des salars actuellement exploités (Silver Peak).

¹⁷ La référence citée par Grosjean date de 1988. On peut interpréter qu'il s'agit d'un coût avec les technologies de l'époque, qui ont pu évoluer.

4.2. RESSOURCES ET RÉSERVES

4.2.1. Évaluation globale des ressources et réserves

Les ressources globales en lithium ont fait l'objet de diverses compilations et publications, avec des points de vue assez divergents et des échanges quasi-polémiques entre divers auteurs. Il en résulte des estimations de ressources bien différentes entre les plus pessimistes et les plus optimistes, les évaluations pessimistes annonçant l'insuffisance des ressources en lithium pour permettre un passage massif du parc automobile mondial à l'électrique dans les prochaines décennies, les évaluations optimistes aboutissant à la conclusion inverse.

L'un des problèmes est, pour beaucoup de gisements de lithium, l'absence de calcul de ressources et réserves selon des données et des méthodologies fiables telles que désormais exigées par les normes canadienne NI43-101 ou australienne JORC de déclaration de ressources et réserves. Il s'agit souvent d'estimations, sans qu'il ait toujours été établi quelle part des ressources "géologiques" sont susceptibles d'être récupérables par une exploitation industrielle présente ou future.

À titre d'exemple, les estimations de ressources et réserves du Salar de Uyuni, en Bolivie, généralement présenté comme le plus gros gisement mondial de lithium, varient largement. Ses "réserves" en sont évaluées à 316 kt de lithium récupérables au maximum par Tahil (mai 2008), alors que la Gerencia Nacional de Recursos Evaporiticos (www.evaporiticos.gob.bo), la branche "ressources évaporitiques" de la Comibol, la société minière d'État bolivienne qui gère ce Salar, les déclare à 100 Mt de lithium-métal¹⁸ contenu (Rapport annuel 2010). Plus raisonnablement, les travaux de Balisan et Risacher (1981) en avaient estimé les réserves récupérables à 5,5 Mt (estimation non normalisée), chiffre repris par de nombreuses publications par la suite. Les estimations argumentées les plus récentes citent des ressources de 8,9 Mt (Evans, 2009) à 10,2 Mt Li (Grosjean, 2011).

Les estimations les plus étayées récentes convergent vers un ordre de grandeur de ressources mondiales identifiées à un ordre de grandeur de 30 Mt de lithium contenu (hors ressources océaniques). Les tableaux 13 et 14 et les figures 8 et 9 ci-après illustrent la répartition des estimations de l'USGS (2011) et d'Evans (2009), par pays pour le premier et par type de gisement pour le second.

En janvier 2011, l'USGS a publié les nouvelles mises à jour de ses estimations de réserves à 12,56 Mt de Li contenu, et de ressources à 32,5 Mt de Li contenu, comme illustré sur le tableau 18 et la figure 21 ci-après.

Les ressources retenues par Evans (2008 et 2009) totalisaient 29,3 Mt de lithium contenu (hors ressources océaniques). Le tableau 19 et la figure 22 illustrent leur répartition par type de gisement.

¹⁸ Il s'agit possiblement d'une erreur dans le Rapport Annuel : les ressources pourraient correspondre en fait à celles en carbonate de lithium, ce qui correspondrait à 18 Mt de lithium-métal contenu.

	Réserves	Ressources
Bolivie		9 000 kt
Chili	7 500 kt	7 500 kt
Chine	3 500 kt	5 400 kt
USA	38 kt	4 000 kt
Argentine	850 kt	2 600 kt
Brésil	64 kt	1 000 kt
RD Congo		1 000 kt
Serbie		1 000 kt
Australie	580 kt	630 kt
Canada		360 kt
Zimbabwe	23 kt	23 kt
Portugal	10 kt	10 kt
Total	12 565 kt	32 523 kt

Tableau 18 - Récapitulatif des réserves et ressources mondiales en lithium par pays, en kt de Li contenu, selon USGS (Jaskula, janv.2011)

Type de gisement	Ressources (Mt Li contenu)
Saumures de salars	17.70 Mt
Minéraux de pegmatites et greisens (spodumène, lépidolite)	7.60 Mt
Hectorite	2.00 Mt
Jadarite	0.95 Mt
Saumures de champs pétrolifères	0.75 Mt
Saumures géothermales	0.30 Mt
Total	29.30 Mt

Tableau 19 - Répartition des ressources mondiales en lithium par type de gisement (d'après Evans, 2009)

Des ressources de 30 Mt de lithium contenu correspondent à 1200 ans d'exploitation au rythme de 2010 de 25 000 t de lithium contenu extrait. On verra en 4.6 que même avec une prévision de forte croissance de la demande tirée par le développement des batteries Li-ion en particulier, lié à la croissance attendue de la part de marché du véhicule électrique dans le parc automobile mondial, les ressources en lithium déjà identifiées devraient largement couvrir les besoins pour le siècle à venir.

Il est de plus presque certain que de nouvelles ressources seront identifiées à moyen terme : tous les salars du "triangle du lithium ABC" (Argentine-Bolivie-Chili) n'ont pas encore été évalués ou pris en compte, de même pour les lacs salés du bassin de Qaidam et du Tibet en Chine. Les juniors qui explorent actuellement des pegmatites à lithium continuent à annoncer périodiquement de nouvelles ressources, et les saumures géothermales ou de champs pétrolifères minéralisées en lithium sont peut-être plus répandues que les quelques-unes répertoriées actuellement.

Répartition des ressources en lithium par pays

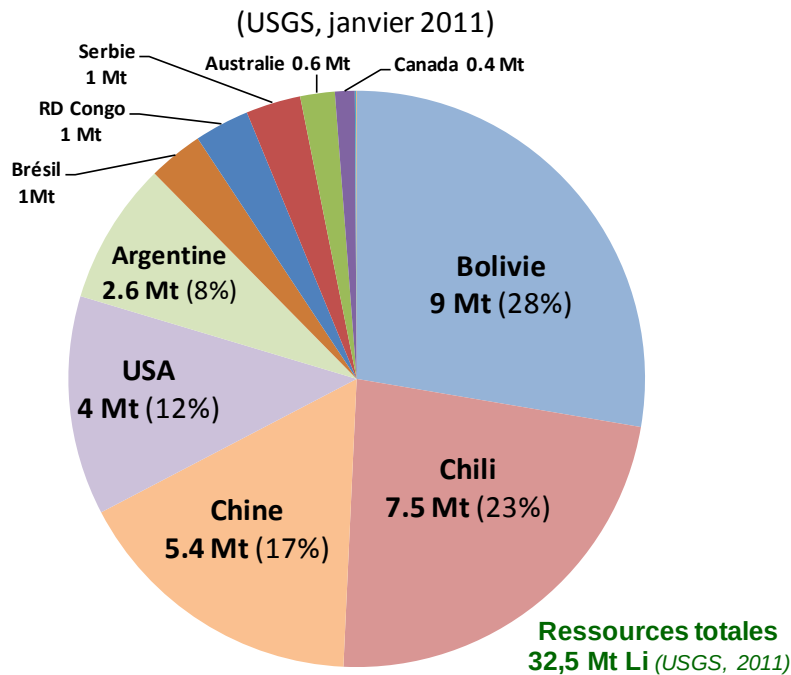


Figure 21 - Répartition des ressources mondiales en lithium par pays (d'après USGS, 2011)

Répartition des ressources mondiales en lithium par type de gisement

(d'après R.K.Evans, 2009)

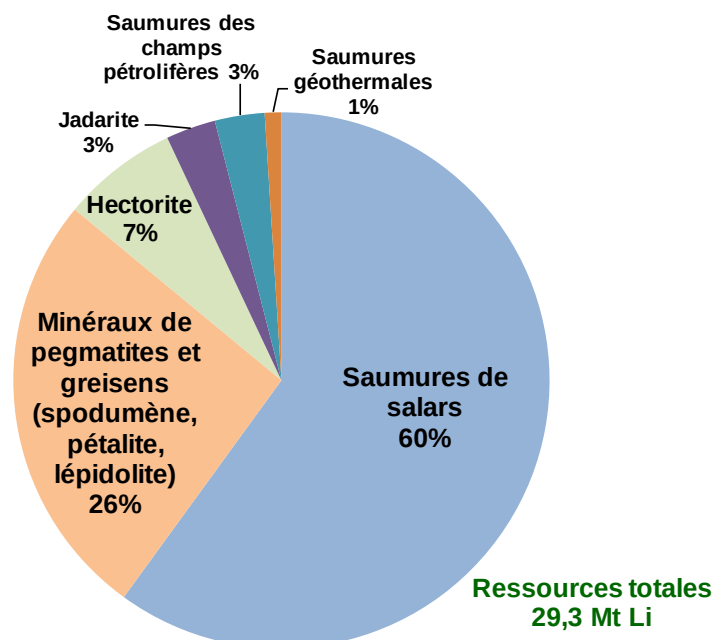


Figure 22 - Répartition des ressources mondiales en lithium par type de gisement (d'après Evans, 2009)

La consolidation des différentes sources de données compilées dans les tableaux 16 et 17 nous amène à des ressources d'environ 36,6 kt de lithium, réparties comme suit (Tableau 20) :

Type de gisement	Tonnage de lithium contenu
Salars "conventionnels"	21.06 Mt
Minéraux "conventionnels"	12.24 Mt
Saumures géothermales	0.62 Mt
Saumures des champs pétrolifères	1.30 Mt
Hectorite	0.35 Mt
Jadarite	1.05 Mt
TOTAL DES RESSOURCES MONDIALES EN LITHIUM	36.60 Mt

Tableau 20 - Récapitulatif des ressources mondiales en lithium répertoriées (source : Tableaux 16 et 17)

Les tableaux 16 et 17 précédents listaient les principaux gisements actuels ou étudiés de salars et autres saumures (géothermales, pétrolières) pour le premier, de minéraux pour le deuxième, avec leurs ressources estimées telles que rassemblées de diverses sources. Beaucoup ne sont pas des ressources certifiées avec les normes actuelles (JORC ou NI43-101), néanmoins elles sont probablement un bon indicateur des disponibilités actuellement répertoriées en lithium¹⁹.

Ces ressources ne sont pas exhaustives.

La figure 23 montre la répartition mondiale des gisements de lithium identifiés, par type et par classe de ressources,

¹⁹ Par rapport aux inventaires cités plus haut, ont en particulier été ajoutés une partie des ressources de minéraux en Afghanistan telles que répertoriées par l'USGS en 2007.

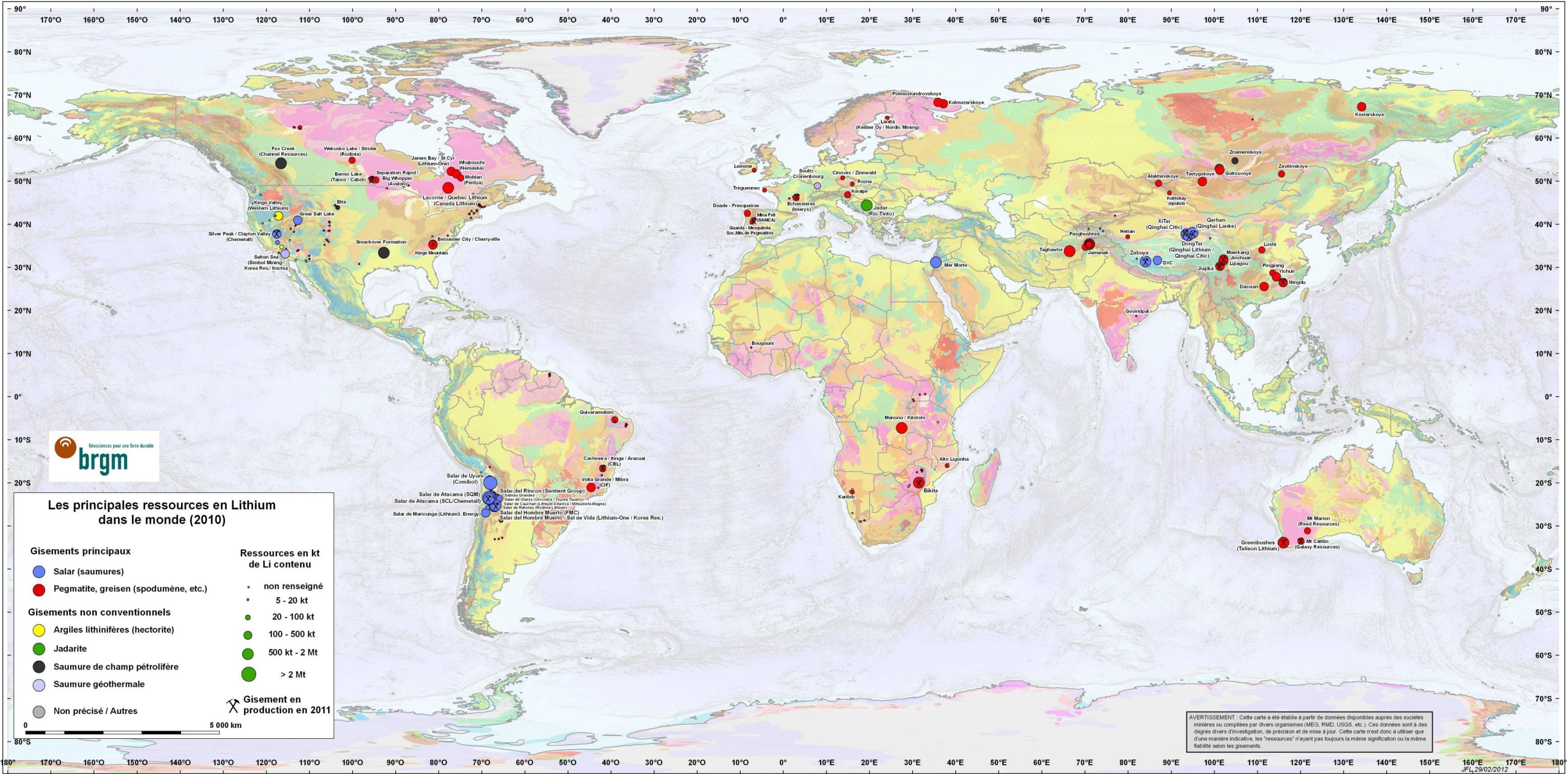


Figure 23 - Répartition mondiale des ressources en lithium répertoriées en 2011.

4.2.2. Les ressources de lithium en France métropolitaine

Minéraux

La France métropolitaine dispose de gisements de minéraux de lithium (essentiellement lépidolite, plus accessoirement de pétalite, amblygonite et montebrasite) qui ont été exploités ponctuellement et marginalement pour le lithium dans le nord-ouest du Massif Central (Échassières, Montebras, Monts d'Ambazac, voir Fig.24), ainsi qu'en Bretagne (Tréguennec). Ces gisements n'atteignent pas la dimension et les teneurs des gisements de minéraux de lithium actuellement exploités dans le monde et ne seraient pas actuellement économiques, mais il n'est pas exclu que certains puissent le devenir en cas de forte tension sur le marché du lithium.

Montebras (23) est exploité pour le feldspath (3 à 4 % de K_2O et 3 à 4 % Na_2O) et Échassières (03) essentiellement pour le kaolin. Ces deux gisements sont distants de plus de 80 km et appartiennent à une zone caractérisée par des intrusions leucogranitiques hercyniennes auxquelles est liée la minéralisation à lithium. Cette zone, orientée Est-Ouest, s'allonge sur près de 150 km pour 40 km de large. Outre les deux sites principaux de Montebras et Échassières, plusieurs indices mineurs à lépidolite et pétalite sont connus dans les Monts d'Ambazac (87) et à Crozant (23).

Le district se caractérise par des minéralisations du type LCT (lithium, césium, tantale), en disséminé et greisen comme à Échassières, ou en pegmatite comme dans les Monts d'Ambazac.

Échassières (03) : Le gisement d'Échassières est une coupole leucogranitique différenciée à Sn-W, également minéralisée en Li, Be et accessoirement Nb-Ta. C'est une coupole granitique complexe comprenant 3 unités granitiques (Beauvoir, Les Colettes et La Bosse, Fig.25). La partie supérieure kaolinisée des granites des Colettes et de Beauvoir est actuellement exploitée par le groupe Imerys (Imerys Ceramics France, anciennement Société des Kaolins de Beauvoir (SKB)). Le groupe en extrait principalement du kaolin, des sables lithinifères ("Félithe", environ 15 kt/an à 1,8 % Li_2O , Fig.26) comme flux pour la verrerie, et 20 kt/an de roche broyée à 0,9 % Li_2O comme flux pour l'industrie des tuiles. Le groupe récupère aussi de la cassitérite (60 t/an) et de la manganocolombite.

Historiquement, le gisement d'Échassières a été exploité pour l'étain (cassitérite, SnO_2) à l'époque gallo-romaine et ponctuellement à partir de 1861, pour le kaolin à partir de 1852, pour le tungstène entre 1913 et 1962.

Les ressources en lithium de la partie meuble et kaolinisée du granite actuellement exploitée par Imerys ne sont pas publiées. Sur la base d'une durée de vie espérée de 20 ans à la production actuelle de 15 kt de sables lithinifères à 1,8 % de Li_2O , ces ressources peuvent être estimées à 300 kt de sables contenant 48 kt de Li_2O .

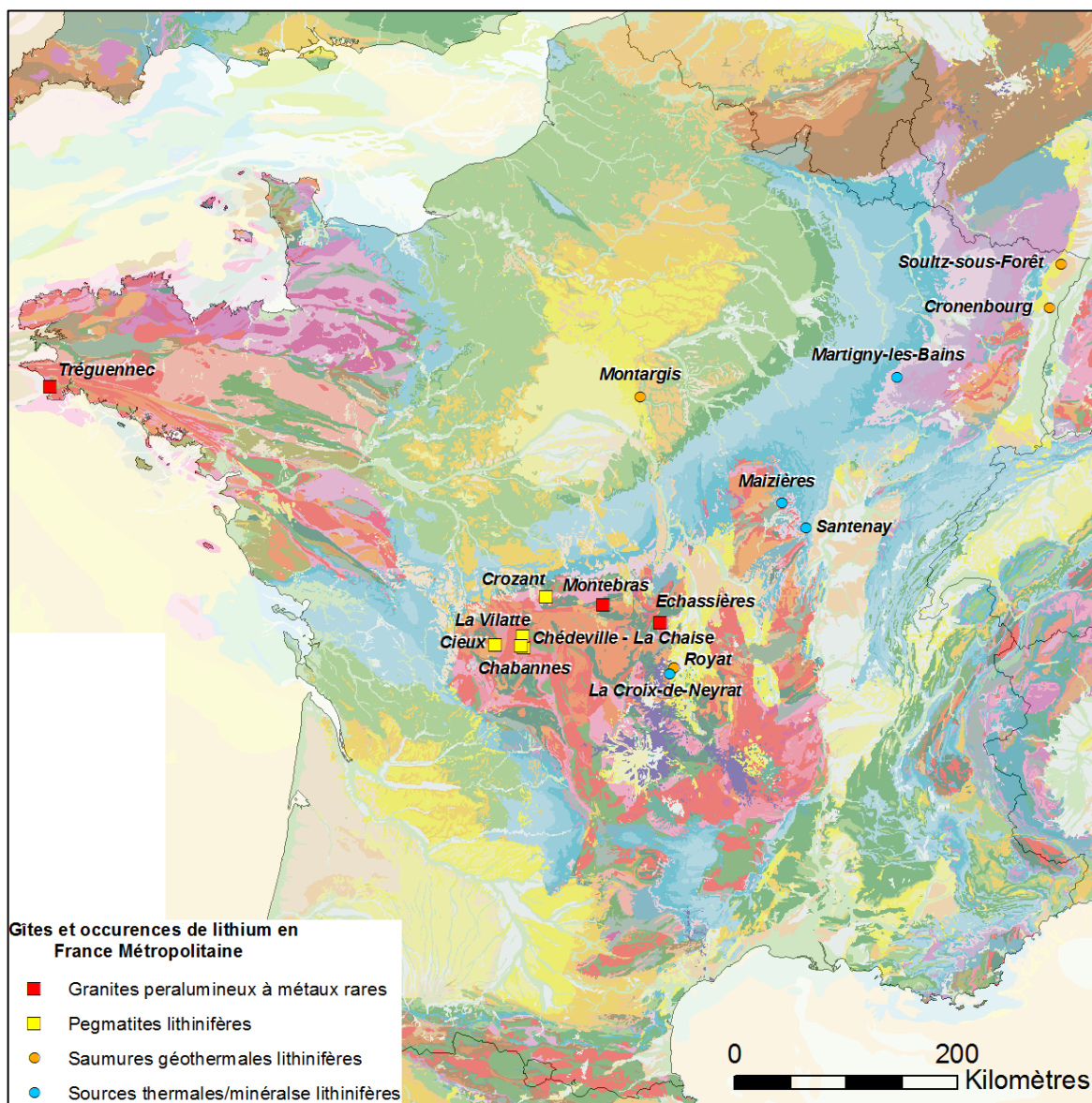


Figure 24 - Localisation des gîtes à lithium en France continentale

Mais une bonne partie du potentiel en lithium d'Échassières est située dans le granite albitique sain de Beauvoir (voir encadré p.88). L'ordre de grandeur de son potentiel en lithium est estimé à 280 kt Li_2O contenues à une teneur de 0,7 % Li_2O , essentiellement (à 95 %) sous forme de lépidolite (mica lithinifère) disséminée, mais aussi sous forme d'amblygonite et de montebrasite. Ce potentiel représenterait 130 kt de Li contenu. Dans les greisens de bordure, la lépidolite présente un faciès à grain fin avec des concentrations pouvant atteindre 50 % de la roche. Ces ressources ne sont cependant probablement pas valorisables dans les conditions économiques actuelles. Elles pourraient cependant le devenir en cas de forte tension sur le marché du lithium. À noter qu'en 1979, ces ressources représentaient 4 % des réserves mondiales connues de lithium (Grès, 1979) et qu'Échassières était donc considéré comme un gisement potentiel majeur de classe mondiale.

Les ressources connexes sont estimées à 20 kt Sn + 5 kt WO_3 + 5 kt Ta+Nb.

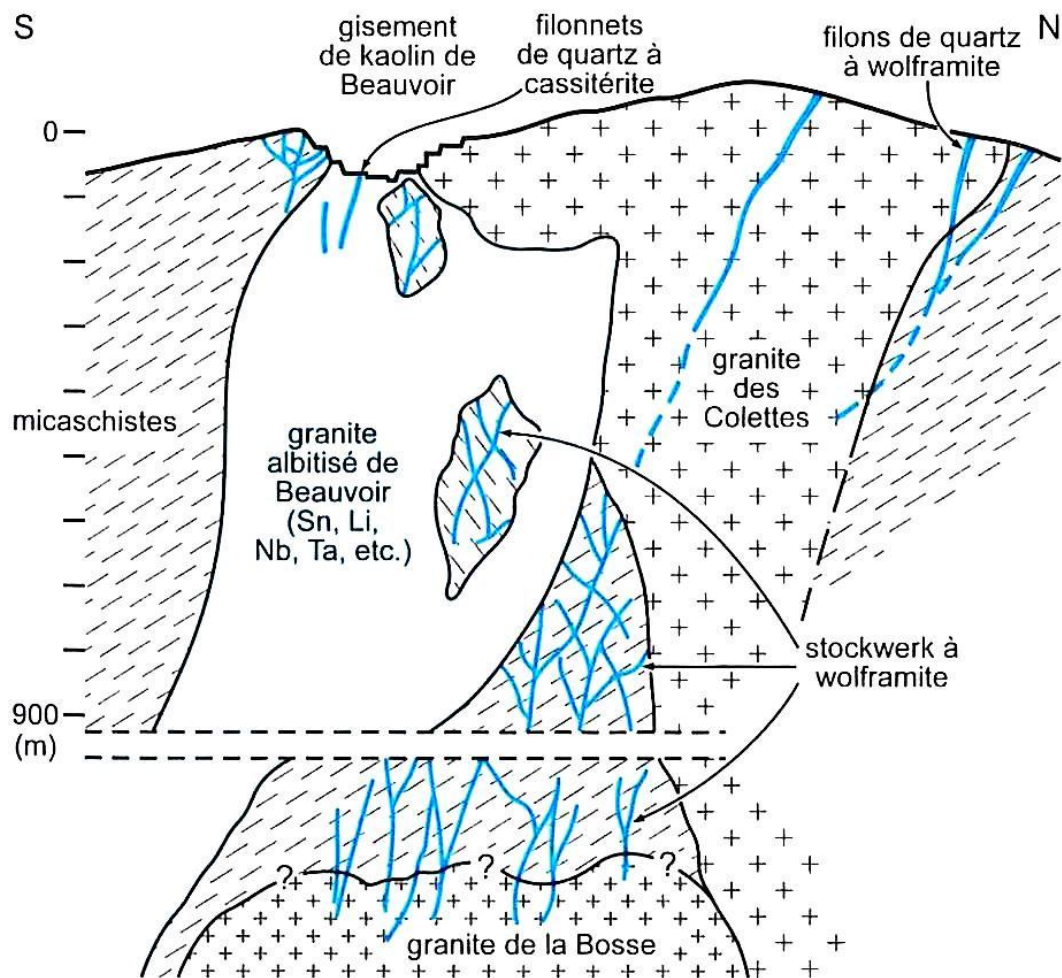


Figure 25- Coupe interprétative de la coupole granitique d'Échassières. La profondeur de 900 m correspond à celle du sondage de reconnaissance réalisé dans le cadre un programme Géologie Profonde de la France. (©Jébrak et Marcoux, 2008, d'après Cuney, 1992).



Figure 26 - Échantillon de félihte (sable lithinifère) d'Échassières produit par SKB

Le gisement à lithium du granite de Beauvoir (Echassières, 03)

(d'après Aubert, 1963 et 1969, Rosen, 1964-1966, Merceron et al., 1992, Cuney et al., 1992, Piantone, 2009)

Le gisement d'Echassières est une coupole leucogranitique différenciée complexe comprenant 3 unités granitiques (Beauvoir, Les Colettes et La Bosse), partiellement minéralisée en Sn, W, Li, Be, et accessoirement Nb et Ta.

La minéralisation à lithium est limitée au granite albitique de Beauvoir et à son contact. Elle se présente sous forme de dissémination de lépidolite, qui peut représenter jusqu'à 20 % du volume du granite, et accessoirement par l'amblygonite-montebbrasite. Dans les greisens de bordure la lépidolite présente un faciès à grain fin avec des concentrations pouvant atteindre 50 % de la roche.

Le granite de Beauvoir forme, à l'affleurement un apex d'un peu moins de 2 km², mis en place à la fin de l'orogénèse hercynienne (308 Ma +/- 2 Ma).

La composition minéralogique moyenne du granite de Beauvoir est la suivante :

Quartz	15 - 25 %
Albite	40 - 70 %
Feldspath potassique	5 - 15 %
Lépidolite	10 - 25 %
Topaze	1 à 5 %
Béryll	Traces
Apatite	Traces
Amblygonite-Montebbrasite	Traces
Herdérite	Traces
Cassitérite	Traces
Colombo-tantalite	Traces

La composition chimique moyenne du granite de Beauvoir dans sa partie non altérée, non kaolinisée et non greisenisée, obtenue à partir de 4 échantillons distants de 50 à 200 m les uns des autres est la suivante :

	Beauvoir 1	Beauvoir 2	Beauvoir 3	Beauvoir 4
SiO ₂	72,4 %	67,5 %	71,3 %	67,1 %
TiO ₂	0,0	0,0	0,0	0,0
Al ₂ O ₃	14,25	17,45	16,2	18,5
Fe ₂ O ₃	0,15	0,0	0,1	0,85
FeO	0,45	0,27	0,45	0,3
MnO	0,02	0,05	0,00	0,06
MgO	1,35	0,6	0,4	1,6
CaO	1,0	1,4	0,5	0,65
Na ₂ O	6,5	5,45	7,4	4,8
K ₂ O	1,75	2,6	1,4	3,1
Li₂O	0,86	1,25	0,6	1,04
P ₂ O ₅	0,55	0,9	0,1	0,49
F	0,7	1,09	0,85	2,0
Perte au feu	1,05	1,35	1,1	1,45

La teneur moyenne en lithium, potassium et fluor des lépidolites de Beauvoir, calculée sur 9 échantillons, est de 5,7 % Li₂O, 9,57 % K₂O et 2,42 % F.

Montebras (23) :

La coupole granitique de Montebras, en limite NE du département de la Creuse, est un petit massif intrusif dont la masse principale est un microgranite avec une couronne très claire à albite-muscovite ressemblant à un greisen, enrichie en cassitérite et tantalite fines, puissante de quelques mètres à quelques dizaines de mètres. Le contact avec le granite encaissant est souligné par un "stocksheider" pegmatitique métrique à grands feldspaths rouges (Jébrak et Marcoux, 2008). Le granite à albite-muscovite, très riche en feldspaths, est exploité en carrière par la Société des Feldspaths du Morvan (Groupe Imerys). La société a produit 230 000 t de feldspaths en 2000, destinés à l'industrie de la céramique (fabrication de grès porcelanés et émaillés). Son autorisation d'exploitation couvre 49 ha et est valide jusqu'en 2026, pour un plafond de 500 000 t/an de feldspaths. Mais le lithium n'est pas valorisé.

Des minéralisations lithinifères en amblygonite et montebrasite y sont rencontrées sous forme d'amas dans la partie quartzeuse de la couche de contact, avec des accumulations qui ont donné lieu à exploitation historique. La lépidolite se rencontre accessoirement sous forme de nids dans le faciès feldspathique de contact et plus dans les faciès ultra-micacés (greisens).

Historiquement, le cortège minéral de Montebras a successivement donné lieu à exploitation pour (Aubert, 1969) :

- l'étain (cassitérite, SnO_2) à l'époque gallo-romaine, puis entre 1865 et 1877 avec une production estimée à 60 t Sn, et ponctuellement en 1909 avec 15 t Sn ;
- l'amblygonite (phosphate de lithium) et accessoirement l'étain de 1882 à 1907, avec une production totale estimée à 2 000 t d'amblygonite et à 100 t d'étain pour la période considérée. Montebras était au début du XX^{ème} siècle l'une des principales sources de lithium du monde ;
- le feldspath par périodes depuis 1911 à nos jours, à travers différentes sociétés : Villeroy et Bosch, Péchiney, Denain Anzin Minéraux et enfin Imerys aujourd'hui.

La minéralisation résiduelle en amblygonite est marginale. La teneur moyenne du granite à albite et muscovite varie ainsi entre 0,08 % et 0,3 % Li_2O . Concernant le greisen à lépidolite, le BRGM estimait, en 1963, que ses perspectives de tonnage pourraient être de l'ordre de 500 kt à 1,5 % Li_2O , soit environ 3,5 kt Li contenu (Aubert, 1963). Mais il n'y a pas eu d'évaluation plus poussée ni plus récente de ces ressources, qui sont de toute façon modestes.

Chèdeville – La Chaise (87) : Dans les Monts d'Ambazac, au Nord de Limoges, il existe un vaste ensemble de pegmatites contenant des quantités variables de béryl, lépidolite et pétalite et colombo-tantalite. Nombre de ces pegmatites (Vilatte-Haute, Chabanne, Margnac, Le Mas-Barbu, Lamont, Chanteloube, Mazataud) ont été exploitées au XIX^{ème} et dans la première moitié du XX^{ème} siècle d'abord principalement pour le feldspath destiné aux porcelainiers de Limoges. Quelques tonnes de béryl en ont aussi été extraites entre 1907 et la 2^{ème} Guerre Mondiale.

Les pegmatites du champ de Chèdeville – La Chaise, de type sodolithiques, plus riches en minéraux de lithium (lépidolite, Fig.27 et 28, et pétalite, Fig.28), ont été

exploitées par Saint-Gobain entre 1929 et 1939. 7078 t de lépidolite²⁰ auraient été extraites, pour la verrerie, notamment pour le pyrex (Chatenet, 2008). Ce champ pegmatitique comprend 3 filons de plus de 1000 m de long dont seul celui du nord aurait été exploité. Sarcia (1957) en estimait les ressources à 300 kt de minerai à 3-4 % de Li_2O . Aubert (1962) ramenait l'estimation à 300 kt à 1 % Li_2O , ce qui représenterait 1,4 kt de Li contenu.

Anecdotiquement, la lépidolite est citée des pegmatites de La Vilate, Chabannes, Cieux, mais en quantités minimales et sans intérêt économique.



Figure 27 - Pegmatite à lépidolite dans une ancienne galerie de Chèdeville (Photo E.Gloaguen, BRGM)



Figure 28 - Lépidolite (paillettes mauves, photo de gauche) et pétalite (masse blanc-crème, photo de droite) de Chèdeville.

Tréguennec (29) : Le gisement de Tréguennec a été découvert et étudié dans le cadre de l'Inventaire Minier de la France. Sa typologie est similaire à celle d'Échassières. La reconnaissance d'un panneau kilométrique conduit au chiffrage préliminaire d'un potentiel de 66 kt Li_2O à une teneur de 0,78 % Li_2O , soit 30,6 kt Li contenu, sous forme de lépidolite (80 %) et d'amblygonite (20 %). Le gisement contient aussi environ 8,5 Mt

²⁰ Représentant environ 271 t de lithium contenu.

de feldspaths à 639 g/t Sn, 190 g/t Ta, 155 g/t Nb et 284 g/t Be, soit des ressources potentielles de 5 400 t Sn, 1 600 t Ta, 1 300 t Nb et 2 400 t Be (Lulzac, 1986).

Saumures

Des données de forages géothermiques et pétroliers en France ont fourni localement des teneurs en lithium dans les saumures d'un ordre de grandeur tout à fait comparable à celles dont l'exploitation est ou a pu être envisagée dans le monde.

Ainsi la nappe du Trias (Buntsandstein mais aussi Muschelkalk) en **Alsace du Nord** a fourni des teneurs de 148 mg/l à **Soultz-Sous-Forêts (67)**, avec un rapport Mg/Li de 0,95, et de 210 mg/l à **Cronenbourg (67)**, en banlieue NO de Strasbourg, avec un rapport Mg/Li de 0,6. Une partie de cette nappe est sous-jacente des gisements de pétrole de Pechelbronn (67) et peut donc aussi être qualifiée de saumure de champ pétrolifère.

Cette nappe avait été retenue comme cible prioritaire par des études de recherche menées sur les ressources potentielles en lithium des fluides géothermaux à la fin des années 1980 et au début des années 1990, en particulier par un programme "valorisation des fluides géothermaux contenant du lithium en vue d'une production industrielle", cofinancé par la Commission des Communautés Européennes, et ayant associé l'Institut mixte de recherches géothermiques du BRGM et les instituts de recherche italiens, le CNR de Rome et Euromin de Trieste (Pauwels et al., 1991). Une estimation du réservoir de la nappe du Trias d'Alsace du Nord avait conduit à estimer les ressources potentielles en lithium contenu entre 300 kt Li (hypothèse basse) et 2,2 Mt Li (hypothèse haute), la largeur de la fourchette étant due à un manque de données hydrodynamiques fiables. Pauwels et al. (1991) concluaient : "Cependant, un ordre de grandeur du million de tonnes est raisonnablement envisageable pour cette zone de 30 km x 30 km, ce qui confirme le fossé rhénan comme étant une réserve importante de lithium à l'échelle des gisements européens." Sur un bloc resserré à 15 km x 15 km autour de Merckwiller-Pechelbronn, la ressource serait de 200 à 300 kt de lithium. Pauwels et al. concluaient aussi : "l'extrême complexité de ces aquifères profonds nécessite néanmoins l'acquisition de nouvelles données hydrogéologiques précises pour pouvoir évaluer la qualité et la pérennité de toute exploitation de cette ressource". Ce même programme de recherche avait mené des essais de récupération de lithium par adsorption sur alumine, avec des résultats qualifiés de très encourageants. Il pourrait convenir de remettre à jour l'ensemble des résultats avec les technologies et le contexte économique actuel.

D'autres saumures avec des teneurs en lithium significatives en lithium ont été rencontrées par des forages géothermiques, comme dans le Keuper à **Montargis (45)**, jusqu'à 50 mg/l Li, à la **Croix-de-Neyrat (63)**, en bordure de la Limagne, 4 km au nord de Clermont-Ferrand, avec 81 mg/l Li (Pauwels et al., 1991). De nombreux sites géothermiques ont été explorés en France et de nombreuses analyses hydrogéochimiques existent mais resteraient à compiler dans une optique de recherche des meilleures concentrations en lithium.

Des sources thermales sont réputées être lithinées et ont été exploitées comme telles, comme à Martigny-les-Bains (88), Royat (63). La littérature mentionne aussi des sources chargées en sels de lithium en Bourgogne : la source de Maizière (21) contient 0,15 g/l de LiCl (Kremer, 1958) et celle de Santenay (21) 0,11 g/l de LiCl (Grès, 1979), soit respectivement 25 et 18 mg/l Li.

4.2.3. Les ressources de lithium en Guyane

Des pegmatites à spodumène, amblygonite et lépidolite sont répertoriées dans la **Crique Salva**, en périphérie NO du granite à biotite caraïbe d'Espérance, 214 km à l'ouest de Cayenne et 77 km au sud de Saint-Laurent-du-Maroni. Ces indices ont été explorés succinctement en surface, puits et tranchées en 1959-1960 (Lemarchand, 1960). La plus importante est l'indice "Lilas", avec une extension de la pegmatite de 400 m de long sur 20 m de puissance. Lemarchand (1960) en estimait le potentiel à une dizaine de milliers de tonnes de "concentré marchand", considéré ailleurs comme étant à 50 à 60 % de minéraux à lithium. Le potentiel serait donc de l'ordre de 240 t de Li contenu. Les travaux ont cependant été assez ponctuels, dans une zone très pauvre en affleurements, et il n'est pas exclu qu'une prospection détaillée mette en évidence des ressources plus significatives. Les indices voisins, plus petits, ont été nommés Tortue, Biche et Chicot.

D'autres indices de pegmatites à lithium existent quelques kilomètres au Nord-Est des précédents (Acouchi, Moustique, Terminus). Leurs ressources semblent faibles.

4.3. PRODUCTION

4.3.1. Statistiques de production

La production mondiale de lithium primaire se montait probablement à près de 28 800 t de lithium contenu en 2010. Il est toutefois difficile d'avoir un tonnage exact, car toutes les sociétés ne publient pas leur production.

En janvier 2011, l'USGS publiait une production 2010 de 25 300 t de Li contenu, hors production étatsunienne. Mais la production chilienne a pu être réévaluée avec des publications plus récentes. En décembre 2011, l'USGS mettait à jour son estimatif de production à 28 100 t de Li contenu, hors production étatsunienne, non publiée, tout en mentionnant que la production de Chemetall Foote au Nevada avait augmenté par rapport à l'année précédente. La production étatsunienne peut ainsi être estimée à au moins 700 t de Li contenu, et la production mondiale 2010 à 28 800 t de Li contenu.

En janvier 2012, Roskill citait une production totale 2011 de 161 kt LCE, ce qui correspond à 30,25 kt Li contenu.

Le tableau 21 récapitule les productions connues par producteurs et par source depuis 2001, et la figure 29 illustre la répartition de la production primaire par pays en 2010, en faisant l'hypothèse d'une production étatsunienne de 700 t de Li contenu et un total mondial de 28,8 kt. Compte tenu des données publiées par ailleurs, cela conduit à

estimer pour les "autres producteurs" en fig.28 une production de 2,1 kt pour l'année 2010, qui reste à vérifier. Elle pourrait représenter les productions du Portugal, du Brésil, de l'Inde, voire de la France.

La production du Portugal, non publiée pour 2010, a été comptée à un ordre de grandeur de 300 t (sous forme de minéraux), par extrapolation des années précédentes.

La production française annuelle de mixtes minéraux contenant du lithium du gisement d'Échassières (03) par le Groupe Imerys a été estimée par Roskill (2009) à :

- 15 kt de sable lithinifère (mélange quartz et lépidolite, principalement) à 1,8 % Li_2O , appelé "Félithe" et utilisé directement comme flux en verrerie. Ceci représente 125 t de Li contenu, et
- 20 kt de roche broyée à 0,9 % Li_2O , utilisé comme flux en tuilerie, et représentant 83 t de Li contenu.

Mais le Rapport Annuel d'Imerys de 2010 ("Document de Référence 2010") cite juste qu'Imerys produit du kaolin et des feldspaths dans l'Allier. Il ne fournit aucune information sur la quantité et les qualités qui y sont produites.

La production canadienne de Tanco (Bernic Lake) a été suspendue en 2009.

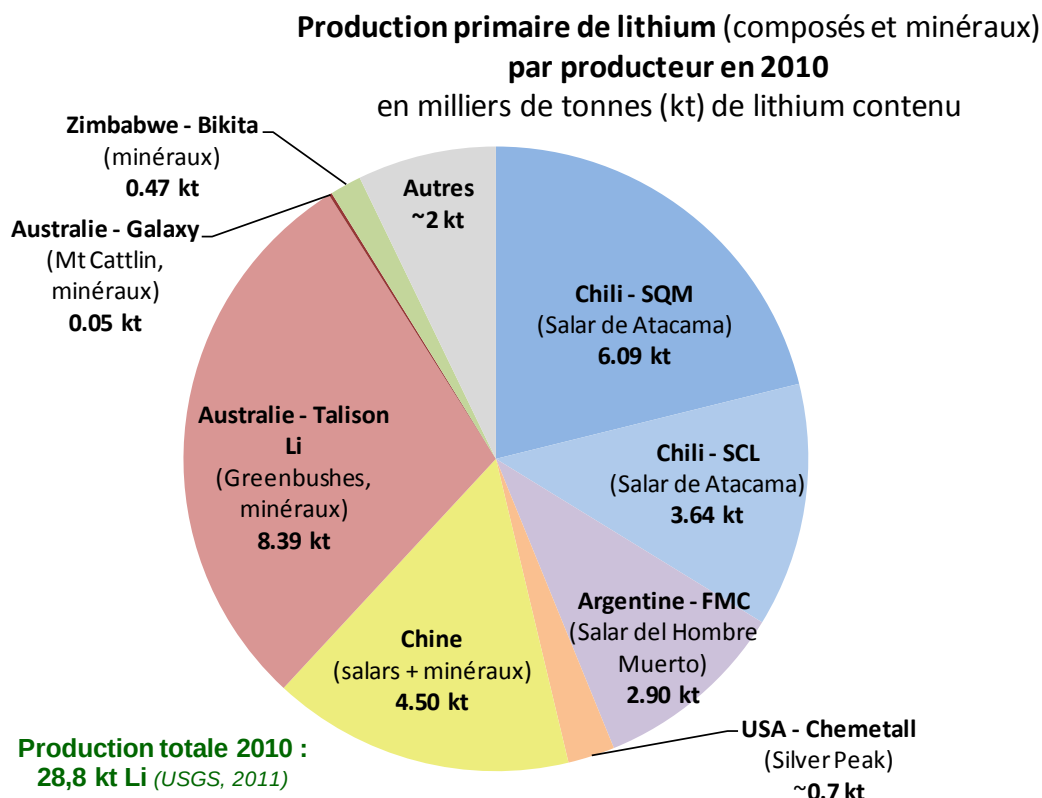


Figure 29 - Répartition de la production de lithium primaire (composés et minéraux) par producteur en 2010 (sources : USGS, Cochilco, sites sociétés, sauf USA : supposé).

Production primaire de lithium dans le monde de 2001 à 2010 (sources : Roskill, 2009, 2012 ; USGS, 2011 ; Cochilco ; Sociétés. Coûts opératoires ("opex") : Yaksic et Tilton, 2009)

Pays	Société	Gisement	Production, en t de lithium contenu (multiplier par 5,32 pour obtenir des t LCE)											Opex 2008	Produit
			2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	US\$/kg LCE	
Salars															
Argentine	FMC	Salar del Hombre Muerto	735	941	1 302	1 933	2 703	2 867	3 067	3 115	2 220	2 900	nc	2,4 - 2,9	Li2CO3, LiCl
Chili	SQM	Salar de Atacama-N	4 196	4 192	5 132	5 753	5 226	5 715	5 377	6 128	4 002	6 087	7 648	1,5 - 2,2	Li2CO3, LiCl, LiOH
Chili	SCL-Chemetail	Salar de Atacama-S	2 419	2 434	2 701	2 514	2 970	3 882	4 250	4 224	1 611	3 638	nc	1,5 - 2,2	Li2CO3, LiCl
Chine	Qinghai Guoan / Qinghai	Qaidam basin				38	56	94	470	564	3 760*	4 500*	nc	2,4 - 2,9	Li2CO3
Chine	Tibet Minerals	Zhabuye								376			nc	2,2 - 2,6	Li2CO3, LiOH
USA	Chemetail	Silver Peak/Clayton Valley	890	800	720	680	640	740	670	700	640	700**	nc	2,4 - 2,9	Li2CO3, LiOH
Total Salars			8 240	8 367	9 855	10 918	11 595	13 298	13 834	15 107	12 232	17 825			
Minéraux															
Australie	Talison-Li	Greenbushes	1 569	2 818	3 356	3 523	4 834	6 155	5 353	5 290	6 280	8 390	9 245	4,05	Spodumène
Australie	Galaxy Minerals	Mt Cattlin										47	1 834		Spodumène
Zimbabwe	Bikita Minerals	Bikita	704	685	236	267	731	585	680	585	400	470	nc	4,60	Pétalite, spodumène
Canada	Tanco	Bernic Lake	325	325	330	325	325	328	330	330	310		nc	4,63	Spodumène
Chine (Sichuan)		Maerkang, Jiajika, Lijiagou, Ji	636	631	650	668	687	687	742	928	*	*	nc		Spodumène, Li2CO3, LiOH
Chine	Jiangxi Ningdu TLIC	Ningdu											nc		Spodumène, Li2CO3
Portugal	Soc.Mineira de Pegmat	Guarda & Mesquitela	134	189	285	333	304	331	331	331	282	300**	nc	5,11	Lépidolite
Espagne	Miduesa (SAMCA)	Mina Feli	15	16	15	8	9	14	14	14	nc	nc	nc		Lépidolite
Inde	AMD		5	5	5	5	5	5	5	5	nc	nc	nc		Lépidolite
Brésil	CBL	Cachoeira (Araçuaí)	196	308	248	231	220	203	200	188	160	180	nc	5,11	Spodumène, Li2CO3, LiOH
Brésil	Arqueana de Minerios	Araçuaí & Itinga	9	32	21	25	29	30	30	30	nc	nc	nc		Pétalite
France	Imerys	Echassières	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	208	nc	nc	nc		"Felithe"(sable à lépidolite)
Total Minéraux			3 593	5 009	5 146	5 385	7 144	8 338	7 685	7 909	7 432	9 387			
Total Salars + Minéraux (en t de Li contenu)			11 833	13 376	15 001	16 303	18 739	21 636	21 519	23 016	19 664	27 212	30 250		
Total Salars + Minéraux (équivalent en t LCE)			62 975	71 187	79 835	86 762	99 731	115 146	114 522	122 491	104 653	144 821	160 990		

* Pour 2009 et 2010, la répartition de la production chinoise entre Salars et Minéraux n'a pas été communiquée. Les quantités reportées dans "salars" sont en réalité le cumul salars+minéraux

** Tonnages non publiés. Tonnages mentionnés ici uniquement de manière indicative estimée par extrapolation des années précédentes.

Tableau 21 - Production primaire de lithium par producteurs depuis 2001

4.3.2. Nature des produits expédiés des sites d'extraction

Au niveau des sites d'extraction, la transformation des produits extraits et leur forme d'expédition est variable (voir Tab.21) :

- Sur les salars, les sites produisent surtout du carbonate de lithium, mais aussi du chlorure de lithium et de l'hydroxyde de lithium. Les transformations en autres composés sont le plus souvent faites ailleurs, sur d'autres sites industriels voire dans d'autres pays, même si c'est éventuellement par les mêmes sociétés (Chemetall par exemple).

Nombre d'exploitants de salars produisent aussi, voire en majorité, du potassium, sous forme de chlorure, parfois de sulfate.

- Sur les exploitations de minéraux, certains livrent directement les concentrés de minéraux (spodumène, pétalite, lépidolite) pour utilisation directe en verrerie. Quelques-uns transforment les minéraux ou une partie d'entre eux en composés (carbonate et chlorure), comme en Chine ou au Brésil (CBL). Le spodumène de Caroline du Nord (Kings Mountain, Bessemer City) était aussi en partie converti en carbonate sur site du temps de son exploitation par Chemetall Foote dans les années 1960 à 1980.

Le plus gros producteur actuel de spodumène, Talison Lithium à partir de son gisement de Greenbushes en Australie, ne commercialise que du concentré de spodumène, mais une bonne partie est exportée en Chine pour y être transformée en carbonate, et Talison étudie l'implantation d'une usine de carbonate de lithium en Australie Occidentale (cf.6.1.4).

Au final, en 2011, l'approvisionnement en lithium primaire s'est partagé en approximativement 58 % sous forme de composés (carbonate, chlorure et autres) provenant des exploitations de saumures, 24 % sous forme de composés élaborés à partir de minéraux, et 18 % sous forme de minéraux utilisés tels quels directement, essentiellement en verrerie et céramiques (Lithium Americas, Nov.2011, d'après Signum Box, 2011). La figure 30 compare cette répartition avec celle de 2008 : on voit que de plus en plus de minéraux sont convertis en composés (essentiellement le spodumène australien de Greenbushes transformé en Chine).

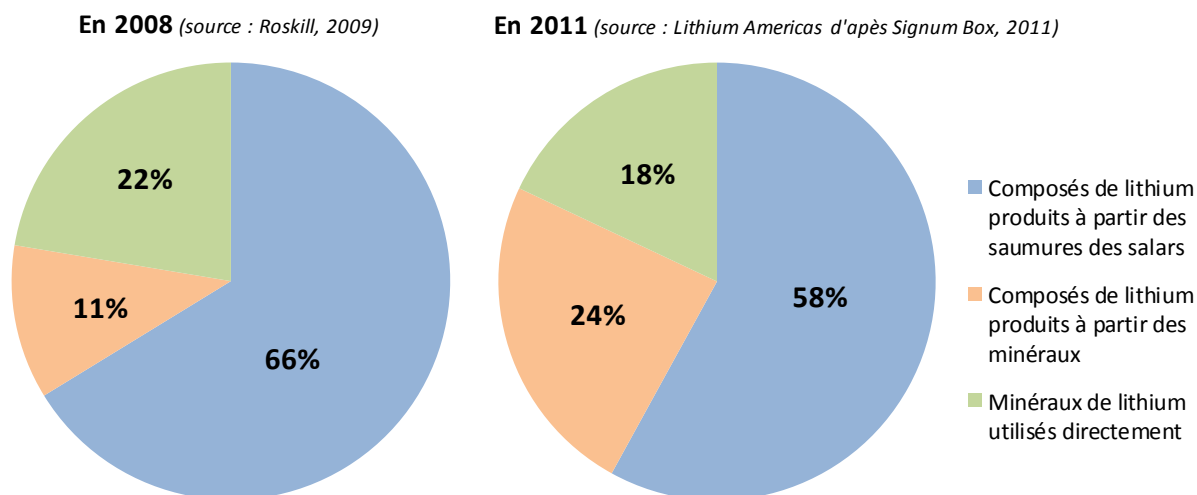


Figure 30 - Répartition des approvisionnements en lithium primaire par source en 2008 et 2011.

La figure 31 récapitule les filières de production et d'utilisation des composés de base.

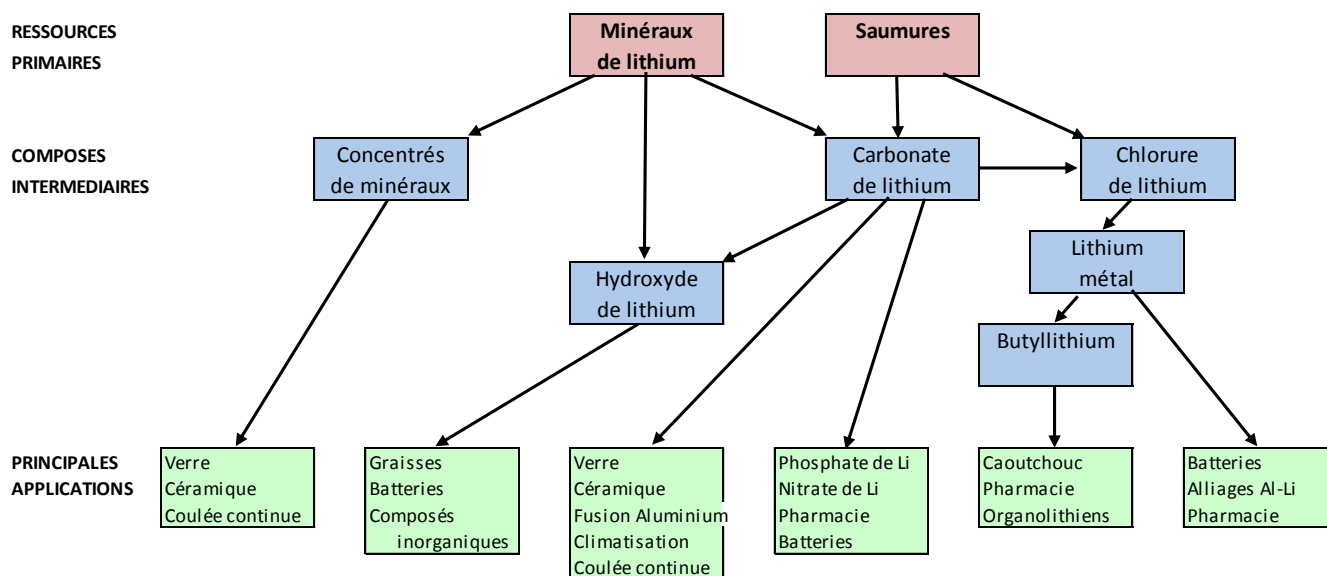


Figure 31 - Schéma simplifié des filières du lithium (adapté et simplifié d'après Yaksic et Tilton, 2009, et Roskill, 2009)

4.4. PROCÉDÉS DE PRODUCTION

4.4.1. Production de carbonate de lithium à partir des saumures

Du carbonate de lithium est actuellement produit à partir des saumures du Salar de Atacama (Chili), du Salar del Hombre Muerto (Argentine), de Silver Peak/Clayton Valley (Nevada, USA), de Zabuye (Tibet, Chine) et des salars de Dongtai, Xitai et Chaerhan (Qaidam Basin, Qinghai, Chine).

À Atacama, Silver Peak et au Qinghai, les saumures sont pompées à la surface où elles sont concentrées par évaporation au soleil dans une série de bassins successifs, dans lesquels sont récoltés d'abord le chlorure de sodium puis de potassium. Le lithium est ensuite précipité sous forme de carbonate par adjonction de chaux et de carbonate de sodium ("soda ash").

La Fig.32 schématise le procédé utilisé par Chemetall, d'après Garrett (2004), et la Fig. 33 celui utilisé par SQM.

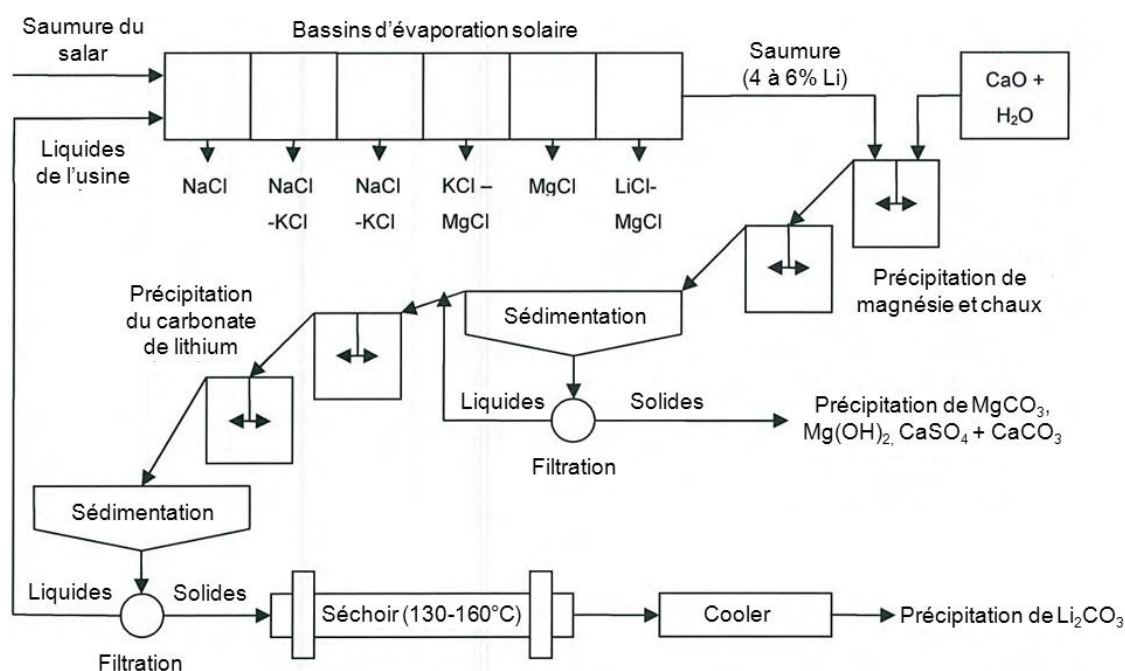


Figure 32 - Schéma de production du carbonate de lithium par Chemetall à partir des saumures du Salar de Atacama et de Silver Peak (adapté d'après Garrett, 2004).

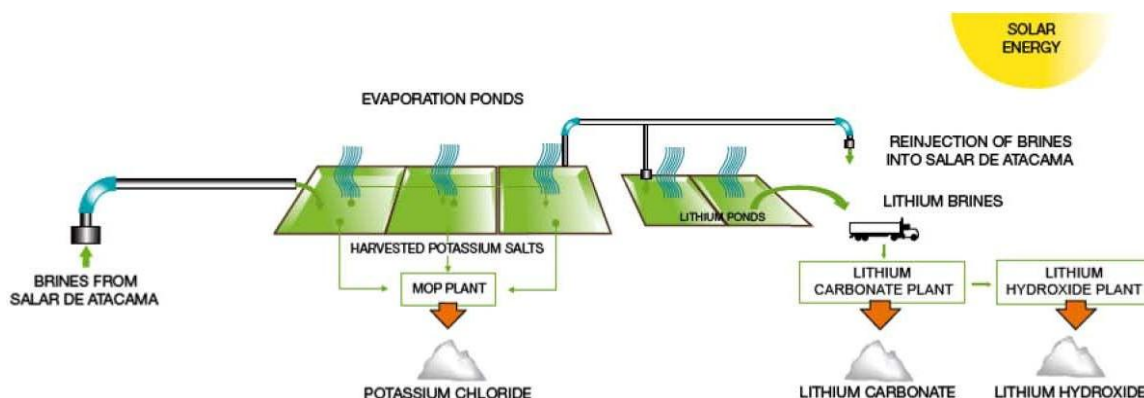


Figure 33 - Schéma de production du carbonate de lithium par SQM à partir des saumures du Salar de Atacama (source : www.sqm.com)

Le procédé utilisé par FMC en Argentine serait différent mais les détails n'en sont pas divulgués. La saumure initiale à 0,05 % Li passerait d'abord sur des pellets d'alumine polycristalline où le chlorure de lithium serait adsorbé, puis désorbé par lavage, plusieurs fois successivement, ce qui permettrait d'aboutir à une solution (saumure) à 1 % Li. C'est cette dernière saumure qui serait ensuite évaporée dans les bassins d'évaporation solaire. Contrairement à SQM et SCL au Chili, FMC ne récupère pas la potasse.

À Zabuye, au Tibet, compte tenu de l'altitude et de la latitude, les températures peuvent être très basses en hiver, et l'exploitant aurait adapté une méthode de concentration qui combine alternativement l'évaporation solaire et le gel : le gel par température très basse fait cristalliser certains sels. Mais le détail du procédé n'est pas publié.

4.4.2. Extraction et concentration des minéraux de lithium

Les minéraux de lithium sont exploités dans des mines à ciel ouvert à Greenbushes (Australie) et à Bikita (Zimbabwe). Ils sont exploités en mine souterraine par chambres et piliers dans certaines mines chinoises et l'étaient à Bernic Lake (Canada).

Le minerai est ensuite concentré par une série d'étapes :

- concasseurs primaires et secondaires ;
- broyeurs ;
- séparation en milieu dense (HMS – "Heavy Media Separation") ;
- Flottation ou séparation magnétique ;
- Filtrage, lavage et séchage.

Les concentrés de minéraux obtenus ont les teneurs standards suivantes (Roskill, 2009) :

- Concentré de spodumène de Greenbushes (Australie) : 5 % Li_2O
- Concentré de spodumène de Bernic Lake (Canada) : 7,28 % Li_2O

- Concentré de spodumène de Maerkang (Chine) : 6 % Li_2O
- Concentré de pétalite de Bikita (Zimbabwe) : 4,45 % Li_2O
- Concentré de pétalite d'Itinga (Brésil) : 4,35 % Li_2O
- Concentré de lépidolite de Yichun (Chine) : 4,65 % Li_2O

4.4.3. Production de composés de lithium à partir des minéraux

La conversion du spodumène et autres minéraux en carbonate ou hydroxyde de lithium peut se faire par deux procédés principaux, la voie acide et la voie basique.

La voie acide, la plus répandue, a été mise au point par Lithium Corporation of America, désormais FMC, et a été utilisée dans son usine de Bessemer City (Caroline du Nord, USA) entre 1956 et 1998. Les étapes en sont les suivantes :

- Grillage du spodumène- α autour de 1100°C pour le transformer en spodumène- β , plus facilement attaqué par l'acide sulfurique;
- Refroidissement et broyage du produit obtenu, et attaque par de l'acide sulfurique à chaud à $200\text{-}250^\circ\text{C}$, qui dissout le lithium sous forme de sulfate Li_2SO_4 . La pulpe est ensuite rincée à l'eau qui entraîne le sulfate de lithium en solution. Du calcaire est ajouté pour relever le pH et éliminer le fer et l'aluminium de la solution.
- La pulpe est ensuite filtrée. Un traitement à la chaux et au carbonate de sodium permet d'éliminer le calcium et le magnésium, avant une nouvelle filtration.
- La pulpe est alors neutralisée à l'acide sulfurique et concentrée dans un évaporateur à 250 g/l de Li_2SO_4 . Elle est alors retraitée au carbonate de sodium à $90\text{-}100^\circ\text{C}$ qui précipite le carbonate de lithium. (À Bessemer City, le sulfate de sodium résiduel était lavé, cristallisé et vendu en sous-produit).

CBL, au Brésil, utilise ce procédé, ainsi que certains transformateurs chinois.

La voie basique démarre par un grillage du spodumène en présence de chaux à $1030\text{ - }1040^\circ\text{C}$. Il se forme du silicate de calcium et de l'oxyde de lithium. Le clinker obtenu est ensuite lessivé à l'eau chaude qui forme de l'hydroxyde de lithium. La solution est alors concentrée et cristallisée en hydroxyde de lithium monohydraté ($\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$) ou séchée sous vide pour obtenir de l'hydroxyde de lithium LiOH . Ce procédé a été utilisé par Foote Mineral Company, désormais Chemetall, dans son usine de Kings Mountain, jusqu'en 1984. Il est aussi utilisé par certains transformateurs chinois.

4.4.4. Production du lithium métal

Le procédé classique dominant de production du lithium métallique est l'électrolyse d'un mélange chlorure de lithium (LiCl , 55 %) – chlorure de potassium (KCl , 45 %) anhydres fondus à 400°C . La réduction électrolytique du lithium se fait dans une cellule avec une cathode centrale en acier. Les anodes sont en graphite ou en alliage de titane. Une cloche située au-dessus de la cathode récupère le métal liquide en l'empêchant de réagir avec le chlore gazeux qui se dégage aux anodes.

Le procédé permet de récupérer 98 % du lithium contenu dans le LiCl. Une alimentation en LiCl et KCl de haute pureté permet d'obtenir du Li métal à 99,8 % de pureté.

D'autres procédés sont encore du domaine de la R&D, comme le procédé Limtech qui utilise directement du carbonate de lithium chloruré par le chlore dégagé par l'électrolyse, ou le procédé Raymor qui devait permettre la production de lithium directement à partir du spodumène.

4.5. RECYCLAGE

En dehors des piles et batteries au lithium, les autres usages (verrerie, coulée continue, graisses lubrifiantes, etc.) sont plutôt dispersifs et le lithium n'en est pas recyclé et pourrait difficilement l'être. Les verres contenant du lithium peuvent cependant être recyclés comme calcins en verrerie, mais ne sont pas alors comptés comme source de lithium dans la consommation de lithium par le secteur.

4.5.1. Recyclage des batteries

C'est surtout le secteur des batteries et piles au lithium qui devrait devenir une source importante de lithium secondaire. Le développement en masse de batteries avec le développement attendu de la voiture électrique impose de se préoccuper et d'optimiser le recyclage du lithium lorsque ces batteries arriveront en fin de vie. Mais jusqu'à récemment, la plupart des piles et batteries au lithium (batteries d'appareils nomades, ordinateurs portables, téléphones, etc.) étaient recyclées principalement pour en récupérer le cobalt, comme par exemple par la société belge Umicore.

La filière de récupération effective du lithium des piles et batteries se met désormais en place progressivement. Certains procédés sont encore du domaine de la R&D. Les sociétés qui produisent déjà du lithium recyclé à partir des batteries et piles sont :

- La société française Récupyl (www.recupyl.fr), depuis 2008, avec des nouvelles implantations à Singapour et aux États-Unis. Récupyl annonce un taux de récupération de 98 % par son procédé hydrométallurgique breveté (cf. 6.3.2). La quantité de lithium ou composés de lithium récupérés n'est pas publiée, elle est probablement encore anecdotique. Les coûts de production ne sont pas publiés non plus ;
- La société californienne Toxco Inc. (www.toxco.com), dans son usine de Trail, en Colombie Britannique (Canada).

Avec l'accroissement prévu du parc de véhicules électriques mondial, le recyclage du lithium des batteries deviendra indispensable et il deviendra un élément économique déterminant dans l'offre de lithium. Mais, si l'on considère une durée de vie des batteries de 10 à 15 ans (Chemetall, 2009), le recyclage ne deviendra significatif dans l'offre en lithium qu'à partir de 2025 ou 2030.

Il était craint en 2009 que le taux de recyclage restât faible en raison de pertes de métal durant le démantèlement de la batterie et de la collecte seulement partielle des

batteries en fin de vie. Mais les procédés semblent avoir été améliorés depuis (Récupyl), et on peut espérer à terme un taux de collecte des batteries en fin de vie équivalent au taux optimal de celui des batteries au plomb (90 %).

4.5.2. Recyclage des rebuts de fabrication

La quantité de carbonate de lithium par voiture électrique peut atteindre 20 kg. Pour fabriquer une telle batterie, il en faut 30 kg, c'est-à-dire que 10 kg sont en rebuts ("wastage factor"), qui peuvent être recyclés en boucle fermée, avec un retour relativement rapide de quelques mois dans la production. Toutefois, pour un démarrage de production massive, il y aura un retard du recyclage et donc un besoin en carbonate de lithium supérieur de 50 % au contenu réel des batteries (Hocquard, 2009).

4.6. PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION DE LA PRODUCTION

Les producteurs majeurs de lithium SQM, SCL et Talison Lithium ont tous annoncé des augmentations prochaines de leur capacité de production. Galaxy Resources à Mt.Cattlin qui vient de démarrer sa production, devrait monter en puissance, et de nouveaux projets devraient arriver en production : gisements de minéraux de Lacorne et Whabouchi au Québec, salars de Rincon, Orlaroz, Cauchari, Sal de Vida en Argentine, voire Salar de Uyuni en Bolivie, Hectorite de Kings Valley et saumure géothermale de Brawley/Salton Sea (cf. Tab. 16 et 17).

Si on additionne ces accroissements de capacité et démarrages, on arrive à une perspective de production de 103 kt de Li contenu (soit 550 kt LCE) en 2020 (cf. Tab.22 et Fig.34)

Une telle capacité de production dépasserait de très loin la demande envisagée, qui, même dans l'hypothèse haute d'un taux de croissance de cette demande de 9,5 % par an, ne serait que de 58,7 kt en 2020 (cf. Fig.15 et 34).

Modélisation de la production possible de lithium pour la période 2012-2020, dans l'hypothèse d'une production conforme aux accroissements de capacité ou nouvelles capacités annoncés
En violet : capacités de production anticipées hypothétiques (Sources : Sociétés, Roskill 2009, Ministère de l'Economie et des Finances argentin, 2011)

Pays	Société	Gisement	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Opex en US\$/kg Li2CO3	Produit
Salars																	
Argentine	FMC	Salas del Hombre Muerto / Fenix	3 115	2 220	2 900	3 240	3 990	3 990	4 000	4 000	4 500	5 000	5 000	6 000	6 500	2,4 - 2,9	Li2CO3, LiCl
Argentine	Lithium1 / Kores	Salas del Hombre Muerto / Sal de Vida														1,54	Li2CO3 (+KCl)
Argentine	Sentient	Salas de Rincon					280	280	280	280	280	280	280	280	280		
Argentine	Orocobre / Toyota Tsusho	Salas de Olaroz (+ Cauchari)					770	770	1 540	3 080	3 080	3 080	3 080	3 080	3 080	1,51	Li2CO3 (+KCl)
Argentine	Lithium Americas	Salas de Cauchari (+ Olaroz)							560	3 000	3 760	3 760	3 760	7 500	7 500	1,43	Li2CO3 (+KCl)
Argentine	Rodinia Lithium	Salas de Diablillos								1 400	2 800	2 800	2 800	2 800	2 800	1,52	Li2CO3 (+KCl)
Bolivie	Comibol	Salas de Uyuni					90	90	1 400	2 800	5 600	5 600	5 600	5 600	5 600	2,9 - 4,0	Li2CO3
Chili	SQM	Salas de Atacama-N	6 128	4 002	6 087	7 648	7 800	8 000	8 200	8 200	8 200	8 200	8 200	8 200	8 200	1,5 - 2,2	Li2CO3, LiCl, LiOH
Chili	SCL-Chemetal	Salas de Atacama-S	4 224	1 611	3 638	4 000	4 000	5 000	8 000	8 000	8 000	8 000	8 000	8 000	8 000	1,5 - 2,2	Li2CO3, LiCl
Chine	Lithium3 Energy	Salas de Marcunga	564	3 760*	4 500*	nc	3 000	4 000	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	2,4 - 2,9	Li2CO3
Chine	Qinghai Guoan / Qinghai Lithium	Qaidam basin	376			940	940	940	2 000	3 760	3 760	3 760	3 760	3 760	3 760	2,2 - 2,6	Li2CO3, LiCl
Chine	Tibet Minerals	Zhabuye	700	640	700**	700	700	900	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	2,4 - 2,9	Li2CO3, LiOH
USA	Chemetal	Silver Peak/Clayton Valley							300	500	1 000	1 500	2 000	2 500	3 000	1,5 ?	Li2CO3
USA	Simbol Mining / Itochu	Brawley/Salton Sea					94	200	300	500	1 000	1 500	2 000	2 500	3 000		
Total Salars			15 107	12 232	17 825	16 528	20 894	24 170	32 680	43 770	52 080	53 080	57 080	58 820	58 820		
Minéraux																	
Australie	Talison-Li	Greenbushes	5 290	6 280	8 390	9 245	14 000	20 500	20 500	20 500	20 500	20 500	20 500	20 500	20 500	200\$/t spodumène	Spodumène (Li2CO3 à terme)
Australie	Galaxy Minerals	Mt Cattlin			47	1 834	3 900	3 900	3 900	3 900	3 900	3 900	3 900	3 900	3 900		Spodumène
Zimbabwe	Bikita Minerals	Bikita	585	400	470	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	4,60	Pérolite, spodumène
Canada	Tanco	Bernic Lake	330	310												4,63	Spodumène
Canada	Canada Lithium	Lacorne / Quebec Lithium							940	1 880	3 760	3 760	3 760	3 760	3 760		Li2CO3
Canada	Nemaska Lithium / Tianqi	Whabouchi							700	1 400	2 800	5 600	5 600	5 600	5 600	138\$/t spodumène	Spodumène
Chine	Sichuan Mineral Industry	Jiajika				nc	670	1 340	1 340	1 340	1 340	1 340	1 340	1 340	1 340		Spodumène
Chine	Sichuan Sheng	Maerkang			*	nc	620	620	620	620	620	620	620	620	620		Spodumène, Li2CO3, LiOH
Chine	Sichuan Jinchuan Lithium Mine	Jinchuan	928	*		nc	620	620	620	620	620	620	620	620	620		Spodumène
Chine	Sichuan Dexin	Lijagou				nc	620	620	620	620	620	620	620	620	620		Spodumène, Li2CO3
Chine	Jiangxi Ningdu TLIC	Ningdu				nc	670	670	670	670	670	670	670	670	670		Spodumène
Finlande	Keilber oy	Läntä				nc											Li2CO3
Portugal	Soc. Mineira de Pegmatites	Guarda & Mesquitela	331	282	300**	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	5,11	Lépidolite
Espagne	Minuesa (SAMCA)	Mina Feli	14	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15		Lépidolite
Inde	AMD		5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5		Lépidolite
Brésil	CBL	Cachoeira (Araçuaí)	188	160	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	5,11	Spodumène, Li2CO3, LiOH
Brésil	Arqueana de Minerios	Araçuaí & Itinga	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30		Pérolite
USA	Westem Lithium	Kings Valley															
France	Imerys	Echassières	208	nc	nc	nc										3,47	"Feilthe"(sable à lépidolite)
Total Minéraux			7 909	7 482	9 437	12 058	21 460	28 630	30 270	33 130	37 630	40 430	40 430	41 650	43 620		
Total Salars + Minéraux			23 016	19 714	27 262	30 250	42 354	52 800	62 950	76 900	89 710	93 510	97 510	100 470	103 440		
Demande, dans l'hypothèse d'un taux de croissance annuel optimiste de 9,5%						25 930	28 390	31 090	34 040	37 280	40 820	44 700	48 940	53 590	58 680		

* Pour 2009 et 2010, la répartition de la production chinoise entre Salars et Minéraux n'a pas été communiquée. Les quantités reportées dans "salars" sont en réalité le cumul salars+minéraux

Tableau 22 - Perspectives de production de lithium d'ici 2020 dans l'hypothèse maximaliste d'une atteinte des capacités prévues par les producteurs.

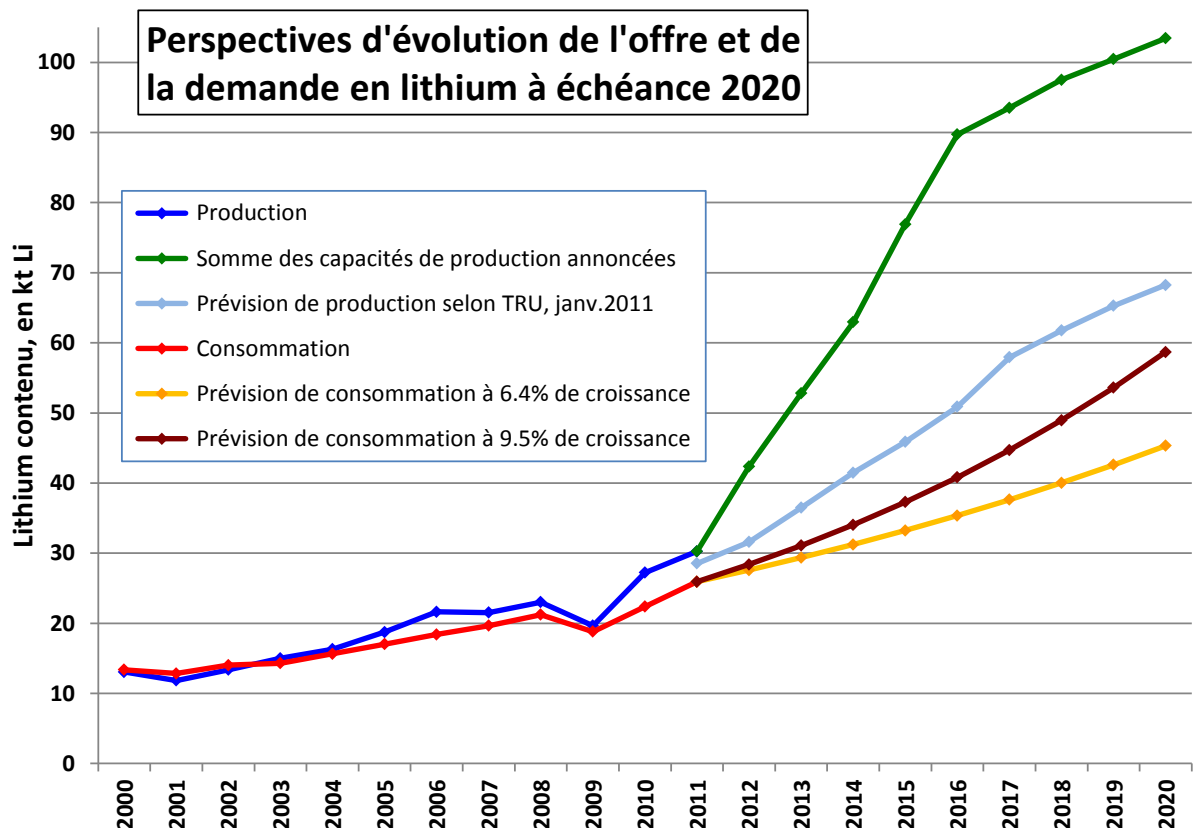


Figure 34 - Perspectives d'évolution de l'offre et de la demande en lithium d'ici 2020

Il est peu vraisemblable que tous les projets annoncés arriveront à leur capacité nominale annoncée dans les délais prévus : même en dehors des contraintes économiques (une surproduction ferait baisser les prix qui ruinerait les projets dont les coûts opératoires sont les plus élevés), il arrive souvent des aléas qui retardent les projets ou conduisent à une production inférieure à la capacité espérée.

À titre d'exemple, le gouvernement bolivien prévoit depuis longtemps une capacité de 30 kt de carbonate de lithium par an au Salar de Uyuni, en Bolivie, mais le projet prend chaque année du retard et ne produit qu'à l'échelle d'un petit pilote, peut-être faute d'ouverture à des investissements d'industriels majeurs du secteur.

Mais même en prenant en compte des incertitudes et aléas sur l'atteinte des capacités de production mentionnées dans le tableau 22, la tendance reste à une probable surproduction, annoncée d'ailleurs par divers analystes :

- D'après Keith Evans, cité par le Technology Review du MIT en novembre 2011, "si tous les projets prévus ou en cours dans le monde arrivaient en production, la production globale en 2020 pourrait excéder 426 kt LCE (80 kt Li contenu), dépassant de loin la demande" ;
- Andersen, de TRU, annonçait, dans sa présentation en 2011 et 2012 aux 3^{ème} et 4^{ème} Lithium Supply and Market Conferences (repris en Fig 32 ci-dessus), une sur-offre massive de lithium d'ici 2020. D'après son graphe, il évalue la perspective de

production de lithium de plus de 68 kt Li en 2020, vs une demande qu'il évalue à 45,2 kt Li (soit un taux de croissance de la demande de seulement 6.4 %) ;

- En janvier 2012, Roskill illustre déjà pour l'année écoulée de 2011 une surproduction : il évaluait la production 2011 à 161 kt LCE (soit 30,2 kt Li contenu), face à une demande de 138 kt LCE (25,9 kt Li), d'où un accroissement des stocks de 23 kt LCE (4,3 kt Li) ;
- Pour le plus long terme, la Société Chemetall calculait en 2009 que, pour une production annuelle de 6 millions de véhicules électriques (correspondant à un taux de pénétration de 10 %), il faudrait entre 116 et 146 kt de LCE (21,8 à 27,4 kt Li) par an selon les scénarios de répartition de type de véhicules retenus (moyenne de 3,54 à 4,57 kg Li par véhicule). Elle calculait donc :
 - que les seules ressources du Salar de Atacama, qu'elle évaluait à 31,5 Mt LCE (5,9 Mt Li), seraient suffisantes pour couvrir 216 à 271 années d'approvisionnement pour les batteries de ces 6 millions de véhicules par an, et
 - que les ressources mondiales, qu'elle évaluait à 150 Mt LCE (28,2 Mt Li), seraient suffisantes pour couvrir 1030 à 1293 années d'approvisionnement pour les batteries de ces 6 millions de véhicules par an.

Chemetall déclare ainsi sur son site Internet (www.chemetalllithium.com) que **"les ressources du seul Salar de Atacama sont suffisantes pour satisfaire la demande globale du marché pour au moins les cent prochaines années"**, et que **"il y a assez de lithium"**.

Il convient toutefois de souligner que les deux plus gros producteurs, SQM comme Chemetall, produisent et commercialisent aussi et surtout du chlorure de potassium à partir du Salar de Atacama, lequel représente un chiffre d'affaires supérieur à celui du lithium. Une augmentation de capacité de production de lithium induirait obligatoirement une augmentation de capacité de production de potassium et pourrait en faire chuter le prix, ce qui n'est pas forcément dans l'intérêt de ces sociétés.

On peut conclure de ces analyses et anticipations sur les ressources et capacités de production et sur les besoins (cf.3.5 et Fig.32) que, même avec une bonne croissance de la demande en lithium tirée par les batteries au lithium, elles-mêmes tirées par le développement attendu des véhicules électriques, il n'y aura pas à court ou moyen terme de pénurie en lithium. Les ressources sont suffisantes pour permettre un approvisionnement du marché pour plusieurs décennies, et les capacités de production en projet sont plus que suffisantes, et risquent même d'être excédentaires d'ici au-delà de 2020.

Les risques d'insuffisance de l'offre pourraient apparaître si, en raison précisément de leur excédent et d'une baisse conséquente des prix, un certain nombre de projets devaient être annulés ou fermés. Mais cette insuffisance ne serait que temporaire, puisqu'une remontée des prix conduirait à relancer des productions. Toutefois, compte tenu du délai de quelques années éventuellement nécessaire pour lancer ou relancer une production, il pourra y avoir des pénuries momentanées. Mais il semble illusoire d'en prévoir les dates, compte tenu des incertitudes et aléas sur les programmations de démarrages de nouvelles productions.

5. Prix du lithium

Il n'y a pas de marché international spot du lithium, ni de cotation publique. Par ailleurs, contrairement aux marchés des métaux de base et des métaux précieux dont la majeure partie passe par une étape "métal" bien spécifique, le lithium est commercialisé sous forme de divers composés selon les sources et les usages, et moins de 5 % du lithium contenu dans les produits commercialisés est passé par une phase métallique.

Les échanges et fixations de prix se font donc le plus souvent sur des composés chimiques de lithium (carbonate, hydroxyde, chlorure et autres) ou sur des minéraux ou concentrés de minéraux de lithium. Selon la compagnie américaine FMC Corp., plus de 90 variétés de composés de lithium sont ainsi commercialisées, avec des spécificités diverses demandées par les clients.

Le prix des minéraux et concentrés de minéraux dépend de la nature du minéral (spodumène d'Australie, pétalite du Zimbabwe, etc.) et de sa teneur en lithium.

Les prix s'établissent par négociations directes de contrats entre producteurs primaires et transformateurs ou utilisateurs.

5.1. HISTORIQUE RÉCENT DES PRIX

Divers prix se trouvent publiés dans des revues spécialisées et chez des analystes, mais ils ne sont pas toujours totalement cohérents entre eux, ce qui illustre bien la difficulté de bien visualiser et analyser les variations et l'évolution des prix.

- La revue **Industrial Minerals**, du groupe Metal Bulletin, publie, avec des spécifications variables selon les dates, des fourchettes de prix d'échange de quelques catégories de produits :
 - Les concentré de spodumène à >7,25 % Li_2O , délivré Europe, ou FOT (Free on Truck) Amsterdam ; à >7.5 % Li_2O , CIF Asie ; à >5 % Li_2O , CIF Europe ou CIF Asie ;
 - Le concentré de pétalite FOB Durban ;
 - Le carbonate de lithium délivré USA ;
 - L'hydroxyde de lithium monohydraté ($\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$) à 56,5 à 57,5 % LiOH , délivré USA ou Europe.

Les figures 35 et 36 illustrent quelques prix publiés par Industrial Minerals depuis 2003, convertis en US\$/kg²¹.

²¹ Les prix sont initialement publiés en US\$/lb pour le carbonate de lithium.

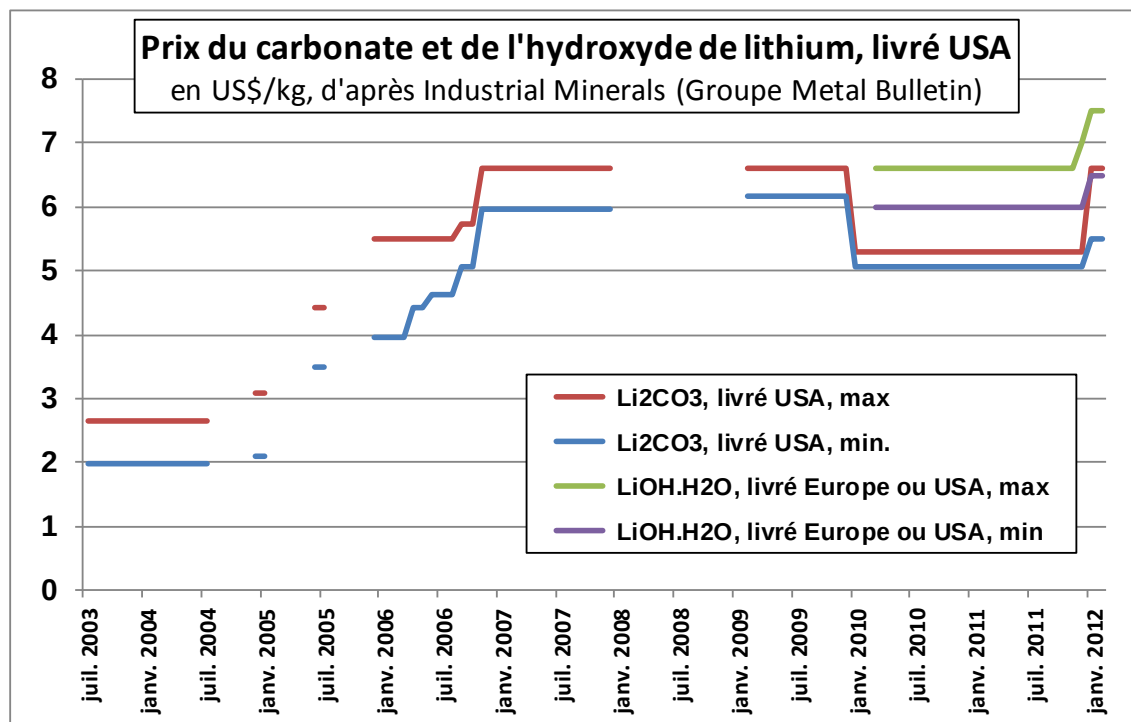


Figure 35 - Indications d'évolution du prix du carbonate de lithium depuis 2003 et de l'hydroxyde depuis 2010, selon Industrial Minerals (Groupe Metal Bulletin).

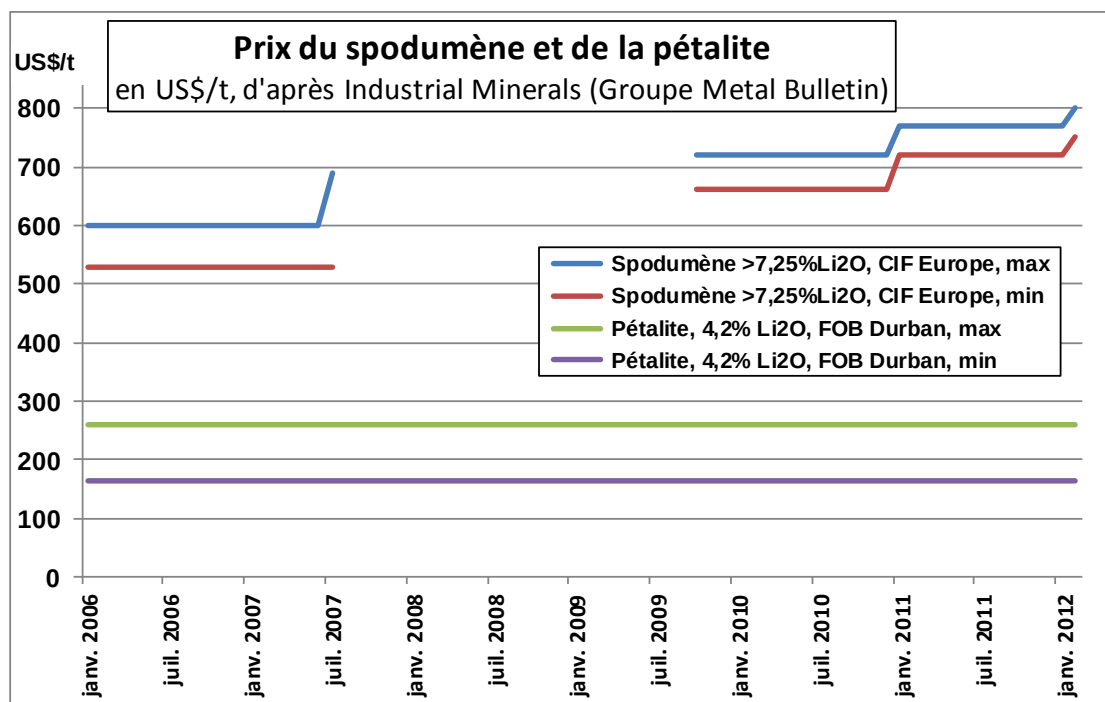


Figure 36 - Indications d'évolution du prix du spodumène et de la pétalite depuis 2006 selon Industrial Minerals (Groupe Metal Bulletin).

Le prix du carbonate de lithium est donné comme étant resté dans la fourchette 2,3 à 2,4 US\$/lb, soit 5,1 à 5,3 US\$/kg tout au long des années 2010 et 2011, pour augmenter à 5,5 à 5,6 US\$/kg début 2012. De même, le prix de l'hydroxyde était resté dans la fourchette 6,0 à 6,6 US\$/kg en 2010-2011 pour augmenter à 6,5 à 7,5 US\$/kg début 2012.

Le prix du spodumène aurait progressivement augmenté de 530-600 US\$/t en 2006 à 750-800 US\$/t début 2012. Le prix de la pétalite zimbabwéenne serait resté inchangé dans la fourchette 165 - 260 US\$/t depuis 2006.

- L'**USGS** publie un historique de prix annuels du lithium, en fait du carbonate de lithium (mais sans en qualifier les termes commerciaux), illustré en Fig.37.

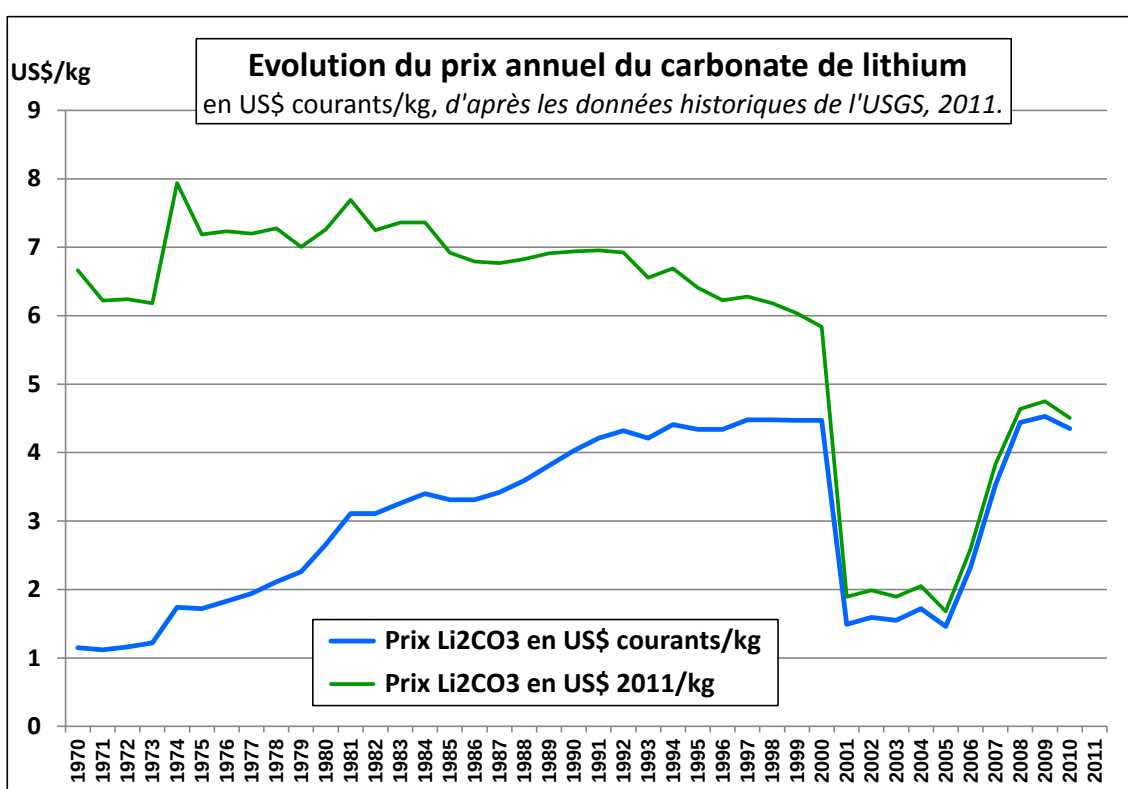


Figure 37 - Évolution historique des prix du lithium depuis 1970 selon l'USGS (2011)

On constate que les prix ont plutôt suivi l'inflation entre 1970 et 2000. Ils ont chuté en 2001 pour rester aux alentours de 1,5 US\$/kg (1 500 US\$/t) jusqu'en 2005. Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette faiblesse ;

- la montée en puissance des salars chiliens et argentins (SCL et FMC ont démarré leur production en 1997),
- la déprime générale de presque toutes les matières premières minérales dans les années 2000-2003,
- l'éclatement de la bulle Internet et technologique en mars 2000.

Les prix ont ensuite bien remonté entre 2006 et 2008, avec l'accroissement de la demande chinoise (comme pour de nombreuses autres matières premières minérales) et l'augmentation de la demande en batteries Li-ion en raison de la généralisation des appareils électroniques portables ("nomades") et le décollage progressif du véhicule électrique (voitures mais aussi vélos et scooters).

L'évolution des prix est plus incertaine à partir de 2009 avec les soubresauts successifs de la crise économie mondiale²².

- De son côté, **Roskill** a compilé et publié en 2009 les informations de **Global Trade Atlas**²³ de 2000 à 2008 sur les valeurs d'exportation du carbonate de lithium des 3 principaux exportateurs (Chili, Argentine, Chine) et de l'hydroxyde de lithium de l'Argentine, de Chine, des USA et de Russie, et du Chili depuis 2004. Les fig. 38 et 39 illustrent les variations de ces prix, complétées par les données d'exportation chiliennes pour 2009 et 2010. On constate que les fourchettes de prix sont bien plus larges que celles rapportées par Industrial Minerals.

²² La série de prix publiée par l'USGS s'arrête en 2010. Il n'est guère possible de la compléter pour 2011 avec la moyenne des prix publiés par Industrial Minerals, car ils ne correspondent pas aux prix USGS : Pour les années 2009 et 2010, l'USGS donne 4,53 et 4,35 US\$/kg respectivement, tandis que la moyenne des prix (livrés USA) publiés par Industrial Minerals pour ces mêmes années est de 6,39 et 5,18 US\$/kg respectivement. L'USGS ne précise cependant pas les termes commerciaux des prix qu'elle publie, et la différence pourrait en partie s'expliquer si le prix publié par l'USGS correspondait à un prix FOB alors que celui d'Industrial Minerals correspondrait à un CIF.

²³ www.gtis.com

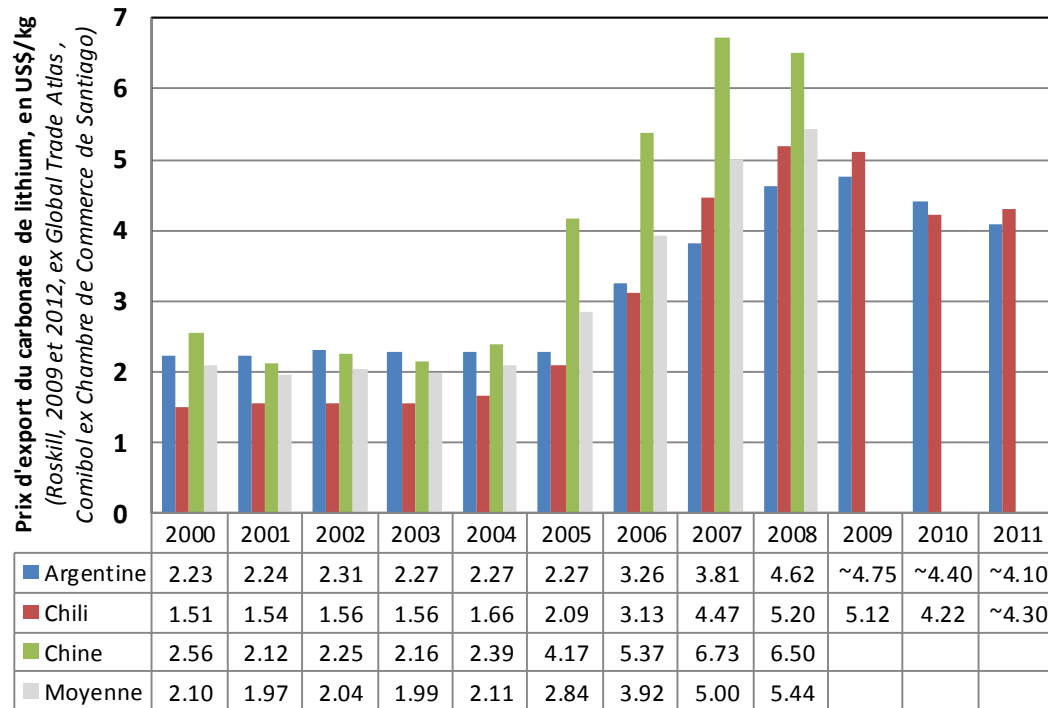


Figure 38 - Prix d'export du carbonate de lithium des trois principaux exportateurs en US\$/kg
(Adapté d'après Roskill, 2009 et 2012, ex Global Trade Atlas, et Comibol, ex Chambre de Commerce de Santiago)

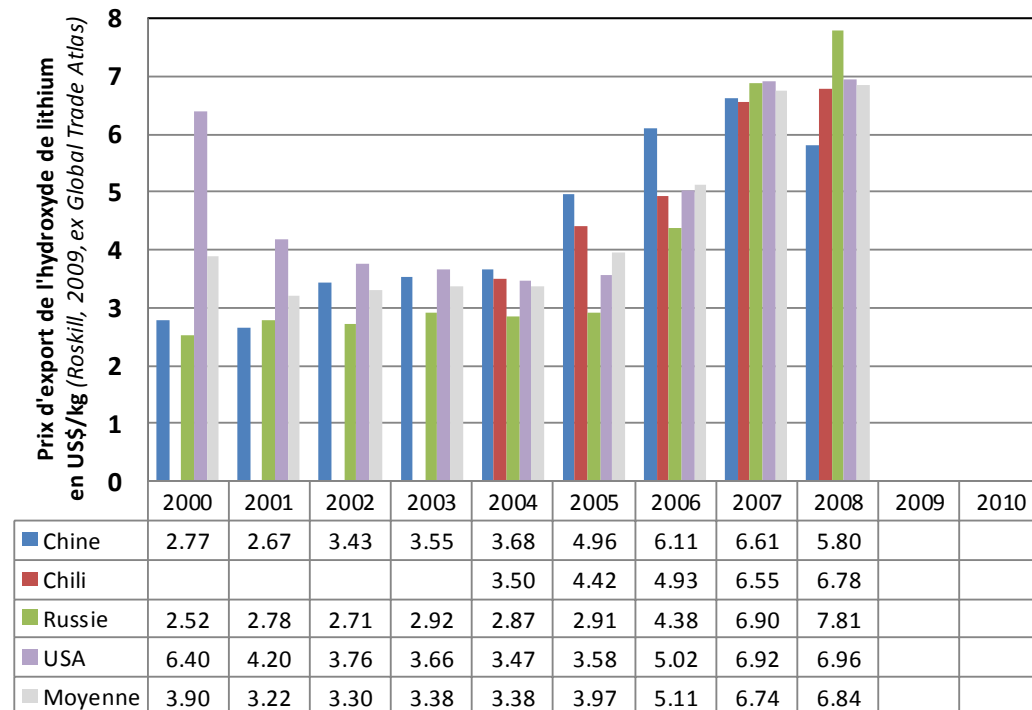


Figure 39 - Prix d'export de l'hydroxyde de lithium, en US\$/kg (Source : Roskill, 2009, ex Global Trade Atlas)

Même à partir d'un même pays, les prix de vente peuvent être bien différents : ainsi, par exemple, en 2008, la valeur d'export du carbonate de lithium par SQM (5,8 US\$/kg) était 32 % supérieure à celle de SCL (4,4 US\$/kg), alors que ces deux sociétés exploitent toutes deux le même Salar de Atacama au Chili.

	Quantité exportée (kt Li ₂ CO ₃)			Valeur d'exportation FOB Chili (M US\$)			Prix unitaire moyen FOB Chili (US\$/kg)		
	SQM	SCL	Total	SQM	SCL	Total	SQM	SCL	Moyenne
1998	13.01	11.68	24.69	20.39	18.91	39.30	1.57	1.62	1.59
1999	18.53	13.28	31.81	27.24	20.86	48.10	1.47	1.57	1.51
2000	20.66	14.25	34.91	30.21	22.66	52.87	1.46	1.59	1.51
2001	20.17	13.24	33.41	30.13	21.47	51.60	1.49	1.62	1.54
2002	20.30	15.27	35.57	30.51	24.73	55.24	1.50	1.62	1.55
2003	24.79	16.06	40.85	37.29	26.53	63.81	1.50	1.65	1.56
2004	28.12	12.03	40.15	46.56	20.18	66.74	1.66	1.68	1.66
2005	25.81	16.02	41.83	56.59	30.69	87.28	2.19	1.92	2.09
2006	23.77	14.92	38.68	79.10	41.88	120.98	3.33	2.81	3.13
2007	22.71	16.62	39.33	120.82	62.08	182.90	5.32	3.74	4.65
2008	24.51	18.07	42.59	142.20	79.28	221.48	5.80	4.39	5.20
2009	12.23	10.22	22.44	65.16	49.63	114.79	5.33	4.86	5.12
2010	22.91	13.41	36.32	98.67	54.50	153.16	4.31	4.06	4.22

Tableau 23 - Valeur d'export du carbonate de lithium par les sociétés SQM et SCL entre 1998 et 2010 (sources : Roskill 2009 d'après la Banque Centrale du Chili et Comibol 2011 d'après la Chambre de Commerce de Santiago).

Les prix réels de vente peuvent évidemment dépendre du volume des contrats, de la date précise à laquelle ils sont conclus²⁴, éventuellement de la qualité du carbonate de lithium (son degré de pureté), mais aussi des politiques commerciales de chaque société. De plus, les prix ne sont pas toujours des prix de marché ouvert : ainsi SCL vend une part importante de son carbonate de lithium à sa société-mère Chemetall GmbH en Allemagne (32 % en 2007, selon Roskill, 2009), mais aussi à Chemetall Foote aux États-Unis, avec des valorisations internes au groupe.

- Dans les statistiques du commerce extérieur français (cf. détail au chapitre 7), on constate de très gros écarts des prix unitaires à l'import, comme on peut le voir dans les valeurs d'importation du carbonate et de l'hydroxyde de lithium par la France en provenance de différents pays. Ainsi en 2011, le prix moyen d'importation (CAF²⁵) du carbonate de lithium du Chili a été de 2,12 €/kg, de Chine de 4,22 €/kg, d'Allemagne de 6,0 €/kg, et de Slovaquie de 15,75 €/kg.

Les prix forts concernent de petites quantités, alors que les importations du Chili ont concerné des quantités importantes (cf. chapitre 7). Il n'est pas précisé s'il y a des

²⁴ pour des métaux cotés quotidiennement, des variations supérieures à 30 % en cours d'année sont fréquentes. Ainsi par exemple en 2011, le cuivre a pu passer de 10 000 US\$/t en février à 6 785 en octobre pour remonter à 7 800 en décembre

²⁵ = CIF pour les anglo-saxons (Cost, Insurance, Freight)

différences de qualité du produit selon les sources, qui pourraient expliquer objectivement les écarts.

- Enfin un article publié par le bureau de Pékin de **Metal-Pages** le 20 février 2012 indique que "les exportations de lithium de Chine se sont accrues de 10,5 % à 1 812 t en 2011, à un prix moyen de 20,72 US\$/kg, avec le détail suivant pour les 5 principaux destinataires (Tab.24) :

Destination	Quantité	Valeur FOB	Prix unitaire
Pays-Bas	544 t	4.07 MUS\$	7.48 US\$/kg
USA	354 t	10.49 MUS\$	29.62 US\$/kg
Canada	151 t	1.24 MUS\$	8.24 US\$/kg
Taiwan	126 t	5.40 MUS\$	42.88 US\$/kg
Brésil	121 t	0.73 MUS\$	6.04 US\$/kg
Autres	516 t	15.61 MUS\$	30.25 US\$/kg
Total	1 812 t	37.54 MUS\$	20.72 US\$/kg

Tableau 24 - Tonnages et valeurs des principales exportations chinoises de lithium en 2011
(Source : www.metal-pages.com/news/story/60460/china-2011-lithium-exports-up-105/)

On y constate des écarts considérables, mais l'article ne précise pas sous quelle forme le lithium est vendu : s'agit-il de produits différents (par exemple, pour certains lots, de lithium-métal, pour d'autres, de carbonate compté en t de Li contenu, etc.) ?

5.2. COMMENTAIRES SUR LES PRIX ET PRÉVISIONS D'ÉVOLUTION

Il ressort des données citées en 5.1.1 que les fourchettes de prix des composés marchands de lithium (et en particulier du carbonate), peuvent être très larges, bien plus que ne le laissent entrevoir les fourchettes de prix publiées par Industrial Minerals.

On constate néanmoins que la tendance a été à une multiplication des prix par 2 à 3 entre la période 2002-2004 et 2008, suivi par un fléchissement relatif en 2009-2010, toutefois à un niveau bien supérieur au niveau de 2002-2004 puis d'une quasi-stagnation en 2011. Début 2012, on constate un amorçage de hausse sur les composés tels que le carbonate et l'hydroxyde (Industrial Minerals, Janv. et Fév. 2012).

On note cependant ponctuellement certaines baisses très significatives entre 2009 et 2011 : ainsi la valeur d'import en France du carbonate de lithium chilien est passée de 5,20 US\$/kg en 2009 à 2,12 US\$/kg en 2011, d'après les statistiques du commerce extérieur français.

Seule la péralite de Bikita (Zimbabwe) semblerait avoir un prix invariable depuis quelques années, d'après Industrial Minerals.

Compte tenu de ces nombreux et importants écarts et des incertitudes qui en découlent, il paraît peu aisé de prédire l'évolution des prix à court et moyen terme.

Lors de la 4^{ème} conférence sur les approvisionnements et marchés du lithium (*Lithium Supply and Market Conference*) qui s'est tenue à Buenos Aires fin janvier 2012, les consultants et les participants des sociétés exploitantes ou en développement ont exprimé des pronostics variables sur l'évolution prochaine des prix, mais la plupart s'accordent sur une relative stabilité des prix au niveau de ceux de 2011, de l'ordre de 4,3 US\$/kg de Li_2CO_3 .

Les accroissements de capacité des producteurs actuels et les nouveaux producteurs attendus devraient permettre de largement satisfaire à l'accroissement prévu de la demande (cf.4.6).

Ils considèrent aussi généralement qu'il existe désormais un niveau plancher et que les prix ne peuvent plus descendre de manière significative, en raison du coût de production du carbonate de lithium à partir des minéraux : en deçà d'un tel prix plancher, aux alentours de 3,8 à 4 US\$/kg de Li_2CO_3 (3 800 à 4 000 US\$/t), une partie de la production de carbonate à partir des minéraux ne serait plus rentable et cesserait, ce qui pourrait déséquilibrer le marché et faire remonter les prix.

D'après le graphe publié par Roskill à la conférence de janvier 2012 illustrant le niveau des coûts directs de production du carbonate de lithium en cumulé par opérations (www.roskill.com/reports/industrial-minerals/news/roskill-at-the-4th-lithium-supply-markets-conference/at_download/), reproduit et adapté ci-après (Fig.40), on peut estimer qu'un tel prix plancher se situerait vers 3,5 US\$/kg de carbonate de lithium.

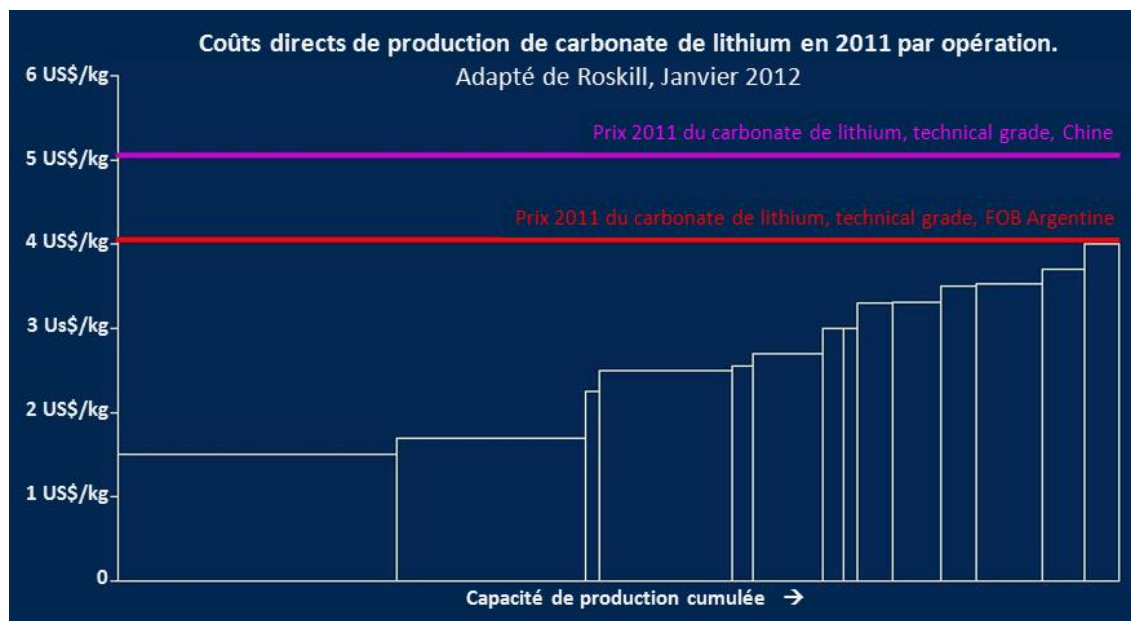


Figure 40 - Classement des coûts de production du carbonate de lithium par opération (adapté de Roskill, 2012).

D'un autre côté, le prix du carbonate de lithium ne représente qu'une faible fraction du prix d'une batterie au lithium en encore plus d'une voiture électrique : pour une voiture électrique nécessitant 30 kg de carbonate de lithium (5,6 kg de lithium contenu), le prix

de la matière première "carbonate de lithium" n'est que d'environ 150 US\$. Même si ce prix devait doubler, il n'affecterait que très marginalement le coût de production de la voiture. Même intégralement répercuté sur le prix de vente de la voiture, cela ne modifiera guère sa position de marché.

5.3. ETF SUR LE LITHIUM

Mi-2010, le gérant new-yorkais de fonds Global X Funds a lancé un ETF ("Exchange Traded Funds", fonds indiciel) basé sur l'indice Solactive Global Lithium, qui suit les performances de 22 sociétés cotées parmi les plus importantes actives dans l'exploration et/ou l'exploitation du lithium ou dans la production de batteries au lithium (www.globalxfunds.com).

Au 31 décembre 2011, il était composé de :

- SQM (Chili) : 19.94 %
- FMC Corporation (USA) : 18.23 %
- Rockwood Holdings, Inc. (USA) : 8.27 %
- Saft Groupe SA (France) : 4.99 %
- GS Yuasa Corporation (Japon) : 4.90 %
- Exide Technologies (USA) : 4.90 %
- A123 Systems, Inc. (USA) : 4.69 %
- Canada Lithium (Canada) : 4.55 %
- Galaxy Resources Ltd (Australie) : 3.71 %
- Orocobre Ltd (Australie) : 3.70 %
- Autres : 22.12 %

Bien que ne portant pas sur des échanges de lithium, l'indice est intéressant en tant que bon reflet des performances de l'industrie du lithium. Il a baissé de 24 % en 2011 mais est remonté de 19 % sur les deux premiers mois de 2012 (Fig.41).



Figure 41 - Fluctuations du cours de l'ETF Lithium de Global X Funds depuis sa création mi-2010 (source : Google Finance)

6. Les acteurs industriels

6.1. LES PRINCIPAUX PRODUCTEURS DE LITHIUM ET COMPOSÉS PRIMAIRES

Comme vu en 4.3, la production minière de lithium et ses composés est dominée à 75 % par un oligopole de 4 grands producteurs occidentaux (SQM, FMC et Chemetall pour les salars, et Talison pour les minéraux) et 16 % par les producteurs chinois (salars et minéraux). Les autres producteurs (Zimbabwe, Portugal, Brésil etc.) se partagent les 9 % restants.

6.1.1. Chemetall GmbH (Allemagne)

Chemetall GmbH (Allemagne) (www.chemetalllithium.com), dont le siège est à Frankfurt-am-Main, est depuis 2004 sous contrôle de la société Rockwood Specialties Group Inc. (USA) (www.rockwoodspecialties.com) (NYSE : ROC).

Chemetall est présente dans la production primaire de lithium à travers sa filiale américaine Chemetall Foote Corp., acquise en 1988 et dénommée, avant sa prise de contrôle, Cyprus Foote Mineral Company, et antérieurement Foote Mineral Company.

Foote Mineral Company a exploité le spodumène en Caroline du Nord depuis les années 1950, puis a démarré en 1966 l'exploitation de la saumure de Silver Peak, au Nevada. Elle a ensuite démarré l'exploitation des saumures du Salar de Atacama en 1984 via sa filiale Sociedad Chilena de Litio (SCL), puis a fermé ses exploitations de minéraux en Caroline du Nord en 1986.

Chemetall Foote produit à Silver Peak (Nevada) du carbonate et de l'hydroxyde de lithium (détail non publié, production totale de lithium contenu de 640 t en 2009), et sa filiale SCL produit à Salar de Atacama du carbonate, de l'hydroxyde et du chlorure de lithium, pour un total de 3 638 t de lithium contenu en 2010.

En 2010, SCL aurait exporté 13 409 t de carbonate de lithium (soit 2 519 t de lithium contenu) pour une valeur de 56,5 M US\$ (soit 4,21 US\$/kg de Li_2CO_3 en moyenne), en majorité vers l'Allemagne (32 %), le Japon (23 %), la Corée du Sud (20 %), la Chine (10,5 %) et les USA (9,5 %).

En 2010, SCL a aussi exporté 890 648 t de chlorure de potassium (KCl) pour une valeur de 255,7 M US\$ (soit 0,287 US\$/kg de KCl).

En février 2012, Chemetall a annoncé un investissement de 140 M US\$ pour doubler sa capacité de production au Chili, et un autre investissement en cours de 75 M US\$ pour accroître la production de Silver Peak, pour une capacité totale de 50 000 t/an LCE, soit 9 395 t de Li contenu, d'ici fin 2013.

Chemetall GmbH dispose de 40 filiales réparties sur tous les continents.

En Allemagne, Chemetall GmbH produit du chlorure, du bromure, de l'hydroxyde de lithium, du lithium métallique et du butyllithium à partir des importations issues de ses filiales chilienne (SCL) et américaine (Chemetall Foote).

En France, la filiale Chemetall SAS est présente en Région Parisienne et en Picardie avec Chemetall SAS dans les produits pour traitement de surface.

Parmi les nombreux exemples d'essaimage, on pourra citer la création en 1996 à Taiwan de Chemetall Taiwan avec une usine dédiée à la production du butyllithium.

Chemetall détient des licences sur certains composés à chimie fine. Sa liste de production couvre un éventail quasi exhaustif des composés de lithium.

6.1.2. SQM (Chili)

La Sociedad Química y Minera de Chile (SoQuiMich, ou SQM) (www.sqm.com) est le plus gros producteur mondial de carbonate de lithium. C'est une société chilienne cotée à New-York (NYSE: SQM). L'un de ses actionnaires importants est la société canadienne Potash Corporation of Saskatchewan ("Potash Corp") à 32 %.

SQM exploite le Salar de Atacama pour le lithium (production de chlorure, carbonate et hydroxyde de lithium), mais aussi et surtout pour le potassium (chlorure principalement, mais aussi sulfate).

En 2010, SQM a produit 32,4 kt de composés de lithium pour une valeur de 150,8 M US\$ (SQM, Rapport Annuel 2010)²⁶.

Cette même année, SQM a produit 1 273 kt de chlorure et sulfate de potassium, pour une valeur de 528 M US\$ (SQM, Rapport Annuel 2010).

SQM exploite aussi des caliches (encroûtements de sels secs, sans saumure) dans les parties plus basses du désert de l'Atacama pour des nitrates (de sodium et de potassium) et de l'iode.

Le chiffre d'affaires 2010 de SQM s'est monté à 1 823,8 M US\$, dont la part du lithium et de ses composés n'est que de 8,3 %.

SQM dispose de facilités de vente dans de nombreux pays. Son bureau qui couvre la France est situé à Anvers, en Belgique.

6.1.3. FMC Corporation (USA)

La société étatsunienne FMC Corporation (www.fmc.com) (NYSE : FMC) est la société mère de la société argentine Minera del Altiplano, qui exploite depuis 1997 les

²⁶ Dernière minute : SQM a publié le 6 mars 2012 sa production 2011, de 40,7 kt de composés de lithium (sans détailler la répartition carbonate / chlorure / hydroxyde), pour une valeur de 183,4 M US\$.

saumures du Salar del Hombre Muerto, dans la province de Catamarca, en Argentine. Elle y produit du carbonate et du chlorure de lithium.

Jusqu'en 1998, FMC exploitait la mine de spodumène de Cherryville en Caroline du Nord, à partir duquel elle produisait du carbonate de lithium dans son usine voisine de Bessemer City. Cette usine transforme désormais les produits importés de son exploitation argentine.

Le chlorure de lithium de Minera del Altiplano est pour une bonne part exporté en Chine, et le carbonate dans les usines de transformation de FMC à Bessemer City, mais aussi à Bromborough, en Grande-Bretagne. FMC a aussi des usines chimiques implantées en Inde (Hyderabad), en Chine (Zhangjiagang) et à travers une JV au Japon (Osaka).

Par rapport aux exploitations chiliennes du Salar de Atacama, le Salar argentin del Hombre Muerto est pénalisé par son enclavement et des coûts de transport plus élevés (4100 m d'altitude, à 1000 km du premier port, réseaux de transports rudimentaires). Et contrairement à SCL et SQM au Chili, FMC ne produisait pas de chlorure de potassium jusqu'en 2011.

FMC aurait investi 100 M US\$ en 2010-2011 pour augmenter sa capacité de production à 16 kt Li_2CO_3 et 6 kt LiCl à partir de 2012 (total de 3990 t Li contenu) puis 34 600 t LCE en 2020, et démarrer la production de chlorure de potassium avec une capacité d'environ 55 kt/an.

6.1.4. Talison Lithium (Australie)

Née en 2009 après la division de Talison Minerals (qui avait acquis en 2007 Sons of Gwalia's Advanced Minerals Division) en deux entités distinctes sur le tantale et le lithium, Talison Lithium Limited (www.talisonlithium.com) exploite depuis 1983 le gisement de spodumène de Greenbushes, en Australie Occidentale, à 250 km au SE de Perth et 90 km à l'Est du port de Bunbury. Greenbushes est l'un des plus grands gisements de spodumène actuellement connu au monde, et l'un des plus anciennement exploités (découvert en 1886, début opérations en 1888).

Talison Lithium a produit 333 356 t de concentré de spodumène en 2011, représentant 49 200 t LCE, soit 9 245 t de Li contenu, avec une teneur moyenne du concentré de 2,77 % Li.

Talison Lithium a annoncé en 2011 l'approbation d'un investissement de plus de 65 M\$ destiné à doubler sa capacité à 110 000 t LCE/an (soit environ 20,7 kt Li) à partir de fin 2012.

Talison Lithium étudie par ailleurs un projet d'implantation d'une usine de production de carbonate de lithium dans la zone industrielle de Kwinana, au sud de Perth, en Australie-Occidentale, d'une capacité de 20 kt/an de carbonate de lithium, avec une décision d'investissement prévue en 2012 et un démarrage de production prévu en 2015.

En septembre 2011, Talison Lithium a finalisé l'acquisition, pour 38,5 M US\$, de la société chilienne Salares Lithium Inc., qui détient des permis sur un groupe de 7 salars situés au sud du Salar de Atacama, dans la Région d'Atacama, au Chili, dont le Salar de la Isla.

6.1.5. Galaxy Resources (Australie)

Galaxy Resources (Perth, Australie Occidentale, www.galaxylithium.com), cotée en Australie (ASX: GXY) a démarré fin 2010 la production de spodumène à partir de sa mine de Mt Cattlin, en Australie-Occidentale. Galaxy expédie son concentré de spodumène à son usine qu'elle construit dans le Jiangsu, en Chine, prévu pour produire 17 kt/a de carbonate de lithium. Galaxy construit aussi en Chine une usine de batteries au lithium prévue produire 620 000 packs par an pour le marché du vélo électrique.

Galaxy a produit 63 863 t de concentré de spodumène en 2011, à environ 6,18 % Li_2O , soit 1 834 t de Li contenu. Elle prévoit passer rapidement à 137 kt de concentré de spodumène par an, soit environ 3,9 kt de Li contenu. Elle produira aussi 24 t de concentré de tantalite.

Galaxy acquiert aussi des participations dans le projet de pegmatite à spodumène de James Bay détenu par Lithium1 (cf.6.2.2) au Québec en en finançant une étude de faisabilité fin 2011.

6.1.6. Bikita Minerals (Zimbabwe)

La société zimbabwéenne Bikita Minerals exploite les deux mines adjacentes de Bikita et Al Hayat, dans le Sud-Est du Zimbabwe. Elle produit de la pétalite (95 % des ventes) et du spodumène (5 %), concentrés sur place. L'usine de traitement a une capacité de traiter 120 kt de minerai à 2,1 % Li_2O pour produire 50 kt/an de concentré à en moyenne 4,2 % Li_2O , soit près de 1000 t de Li contenu. En pratique, elle a produit entre 400 et 700 t de Li contenu par an au cours de la décennie passée. Les produits sont exportés via le port sud-africain de Durban.

6.1.7. Tanco (Canada)

Tanco, filiale du groupe privé étatsunien Cabot (www.cabot-corp.com), a produit du concentré de spodumène de sa mine de lithium (spodumène), tantale et césium de Bernic Lake, dans le Manitoba (Canada) jusqu'en 2009. Il produisait environ 22,5 kt/an de concentré de spodumène à 3,4 % Li.

6.1.8. Companhia Brasileira do Litio / CBL (Brésil)

CBL exploite la mine de spodumène de Cachoeira à Araçuaí (Minas Gerais). Le concentré est transformé en carbonate et hydroxyde de lithium à Aguas Vermelhas (Minas Gerais). En 2007, CBL aurait produit 508 t d'hydroxyde et 301 t de carbonate de lithium, soit 188 t de Li contenu, et un total de 180 t de Li contenu en 2010.

6.1.9. Arqueana de Minerios e Metais Ltda (Brésil)

Arqueana de Minerios e metais produit un peu de pétalite des pegmatites d'Araçuaí et Itinga (Minas Gerais) (environ 30 t/an de Li contenu).

6.1.10. Exploitants de saumures en Chine

Tibet Zabuye Lithium Industry produit du carbonate de lithium à partir des saumures du lac sale de Zabuye, au Tibet (capacité de 5 kt/an de Li_2CO_3 , devant passer à 20 kt/an).

Qinghai Citic Guoan, une filiale du Citic Group, produit du carbonate de lithium à partir des lacs salés de Dongtai (East Taijiaer) et Xitai (West Taijiaer), dans le Qinghai (capacité de 5 kt/an de Li_2CO_3 , devant passer à 30 kt/an).

Qinghai Salt Lake Industry Group produit du sel de table et du sel industriel, du chlorure de potassium et depuis 2007 du carbonate de lithium à partir du lac salé de Dongtai (capacité de 3 kt/an de Li_2CO_3 , devant passer à 20 kt/an).

Qinghai Salt Lake Lanke a lancé la production de carbonate de lithium à partir des saumures du lac salé de Qarhan (=Chaerhan), dans le Qinghai (capacité ciblée de 10 kt/an).

6.1.11. Exploitants de minéraux en Chine

Sichuan Guorun exploite la mine de spodumène de Maerkang, au Sichuan, et produit à Chengdu (Sichuan) du carbonate et de l'hydroxyde de lithium (capacité globale de 3 kt/an).

Sichuan Jinchuan Lithium exploite la mine de spodumène de Jinchuan, au Sichuan, et sa filiale China Lithium Products Technology Co. produit du carbonate et de l'hydroxyde de lithium (capacité de 1,9 kt/an de carbonate et 3,2 kt/an d'hydroxyde monohydraté).

Sichuan Province Mining / Sichuan Mineral Industry exploite la mine de spodumène de Jiajika, dans le Sichuan (capacité ciblée de 47 kt de concentré de spodumène à 6,09 % Li_2O).

Jiangxi Ningdu Taiyu Lithium Industry exploite depuis 2007 la mine de spodumène de Ningdu dans le Jiangxi, et produit du carbonate de lithium (capacité de 2,5 kt/an).

Dexin Mining Resources exploite la mine de spodumène de Lijiagou, dans le Sichuan.

Yichun Huili exploite la mine de lépidolite de Yichun (Jiangxi).

Pingjiang Nonmetals Group exploite la mine de lépidolite de Pingjiang (Hunan).

6.1.12. Sociedade Mineira de Pegmatites (Portugal)

La "Sociedad Mineira de Pegmatites" (Mesquitela, Portugal) exploite plusieurs pegmatites à lépidolite dans les environs de Guarda et Mesquitela, et produit un mixte de feldspath et lépidolite pour l'industrie locale du verre et de la céramique.

6.1.13. Minera del Duero (Espagne)

La société Mineral del Duero SA (Miduesa), filiale du groupe Samca (www.samca.com) exploite la mine de lépidolite de Mina Feli, dans la province de Salamanque en Espagne. Elle produirait environ 6 kt/an de concentré de lépidolite à 0,23 % Li, micronisé sur place et utilisé directement dans l'industrie locale de la céramique.

6.2. LES FUTURS PRODUCTEURS DE LITHIUM ET COMPOSÉS PRIMAIRES (PROJETS EN DÉVELOPPEMENT)

De nombreuses sociétés, dont beaucoup de juniors, ont exploré et évalué des gisements de lithium dans le monde ces dernières années. Une partie d'entre elles ont des projets déjà très avancés qui sont en train d'entrer en production ou pourraient le faire dans les 3 prochaines années (cf. Tab.16, 17 et 22).

6.2.1. Acteurs développant des projets de salars

Rincon Lithium Ltd (Argentine), filiale de **Sentient Group** (société privée d'investissement des Iles Cayman, www.thesentiengroup.com), a démarré à l'échelle pilote en 2011 la production de carbonate de lithium à partir du Salar del Rincon en Argentine et envisagerait une capacité de 1 500 t/an de carbonate, soit 280 t Li contenu (Industrial Minerals, Avril 2011).

Comibol (La Paz, Bolivie) est la société minière d'État bolivienne qui gère le Salar de Uyuni, en Bolivie, à travers sa branche **Gerencia Nacional de Recursos Evaporiticos** (www.evaporiticos.gob.bo). Elle a démarré en 2011 un petit pilote de production de carbonate de lithium (500 t/a, soit 94 t Li contenu). Elle viserait à terme 30 kt/an de carbonate, 5,6 kt Li contenu. SQM estime plus probable une capacité de 20 kt/an LCE (3,7 kt Li).

Orocobre Ltd (Brisbane, Queensland, Australie, www.orocobre.com.au), cotée en Australie (ASX: ORE) et à Toronto (TSX: ORL), détient des permis sur plusieurs salars en Argentine, dans la Province de Jujuy :

- sur une partie du Salar de Olaroz, où le projet est en phase de construction après une étude de faisabilité positive en 2011. Le japonais Toyota Tsusho, du groupe Toyota, a pris une participation de 25 %. Orocobre n'attend plus que l'approbation administrative de la Province de Jujuy et vise un démarrage en 2013 avec une capacité à terme de 16,4 kt/an LCE à un coût opératoire de 1,51 US\$/kg ;
- sur une petite partie du salar contigu de Cauchari, en phase de certification des ressources ;

- sur une partie du Salar de Salinas Grandes, en phase d'exploration.

Lithium Americas Corp (Toronto, Canada, www.lithiumamericas.com), cotée à Toronto (TSX: LAC), détient des permis voisins de ceux d'Orocobre sur une bonne partie du Salar de Cauchari et une petite partie du salar contigu de Olaroz (Argentine, Province de Jujuy). Elle prévoit la conclusion de son étude de faisabilité en 2012 et un démarrage progressif de la production en 2014 pour atteindre 20 kt/a LCE en 2016, suivi d'un doublement de capacité à partir de 2018-2019, à un coût opératoire de 1,43 US\$/kg. Lithium Americas a des participations du japonais Mitsubishi Corp. et du canadien Magna International à hauteur de 17 %, et des contrats d'off-take avec ces sociétés.

Lithium 1 Inc. (Toronto, Canada, www.lithium1.com), cotée à Toronto (TSX-V: LI), détient des permis sur la bordure Est du Salar del Hombre Muerto (Argentine, Province de Catamarca) pour un projet d'exploitation de chlorure de potassium et de carbonate de lithium appelé "Sal de Vida Project". Le projet est en phase d'étude de faisabilité. Les études préliminaires prévoient un démarrage en 2015 et une capacité annuelle de 25 kt/an de LCE et 107 kt/an de KCl, avec un coût opératoire de 1,54 US\$/kg LCE.

Lithium 1 a un accord d'off-take avec un consortium sud-coréen rassemblant KORES (la société minière d'état sud-coréenne), LG International et GS Caltex.

Lithium 1 détient aussi des permis sur le gisement de pegmatites à lithium du projet James Bay, au Québec, en cours de prise de contrôle par Galaxy Resources Ltd qui en finance l'étude de faisabilité en cours.

Rodinia Lithium (Toronto, Canada, www.rodinialithium.com), cotée à Toronto (TSX-V: RM), détient des permis sur plusieurs salars en Argentine, le Salar de Diablillos (tout proche du Salar del Hombre Muerto, Province de Catamarca), le Salar de Ratones et le Salar de Centenario (Province de Salta), et une partie du Salar de Salinas Grandes. Les trois derniers sont en phase d'exploration préliminaire, seul le Salar de Diablillos a fait l'objet d'une évaluation aux normes NI43-101. Son évaluation économique préliminaire (PEA) prévoit un démarrage de la production en 2015 et une capacité de 15 à 25 kt/an LCE selon les scénarios retenus, à un coût de 1,49 à 1,52 US\$/kg LCE.

6.2.2. Acteurs développant des projets de minéraux

Canada Lithium (Toronto, Canada, www.canadalithium.com), cotée à Toronto (TSX-V: CLQ), détient le projet Québec Lithium, à Lacorne, près de Val d'Or, au Québec. Il s'agit d'un gisement de pegmatite à spodumène qui avait déjà été exploité entre 1955 et 1965, dont les ressources restent conséquentes (cf.Tab.17). Le projet prévoit une réouverture de l'exploitation de spodumène et une usine de transformation en carbonate de lithium sur place. L'étude de faisabilité mise à jour en 2011 prévoit un démarrage de production en 2013 pour une capacité de 20 kt/an LCE à un coût de 3,16 US\$/kg LCE.

Nemaska Lithium Inc. (Québec, Canada, www.nemaskalithium.com), cotée à Toronto (TSX: NMX), détient le projet de Whabouchi, près de la Baie James. Il s'agit d'une

pegmatite à spodumène dominant, en cours d'étude de faisabilité. Nemaska envisage une production d'environ 200 kt/an de concentré de spodumène à partir de 2014.

Reed Resources Ltd (Perth, Australie, www.reedresources.com), cotée en Australie (ASX: RDR) détient 70 % du projet de pegmatite à spodumène de Mount Marion, en Australie-Occidentale, en JV avec Mineral Resources Ltd (30 %). Le projet prévoit produire 200 kt/an de spodumène à 6 % Li_2O et 30 t/an de concentré de tantalite, mais n'annonce pas encore de calendrier.

Keliber Oy (Finlande, www.keliber.no) a été fondée en 2001 et est devenue société minière en 2006. Elle est passée sous contrôle de la société norvégienne **Nordic Mining ASA** (Oslo, Norvège, www.nordicmining.com) qui en détient 68 %, les 32 % restants étant détenu par des privés. Elle détient les titres sur le gisement de spodumène de Länntä, en Finlande (Ostrobotnie Centrale). Le projet est en cours de certification de ressources. Il prévoit la construction d'une usine de production de carbonate de lithium, d'une capacité de 4 kt/an Li_2CO_3 , qui serait la seule en Europe. Le projet produirait un peu de tantalite en sous-produit. Il n'y a pas encore de calendrier annoncé.

6.2.3. Acteur développant un projet de jadarite

Rio Tinto (Royaume-Uni / Australie, www.riotinto.com) a découvert et étudie le gisement de jadarite de Jadar, en Serbie. Après évaluation des ressources en lithium et en bore et essais de traitement, Rio Tinto a lancé une étude de préfaisabilité en 2011 sur 2 ans, à travers sa filiale locale Rio Sava Exploration. Les études préliminaires faisaient envisager à Rio Tinto une exploitation souterraine à partir de 2014, avec une capacité de 60 kt/an de Li_2CO_3 (soit 5,6 kt Li) et 300 kt/an d'acide borique (H_3BO_3) pendant 20 ans.

6.2.4. Acteur développant un projet d'hectorite

Western Lithium Corp. (Vancouver, Canada, www.westernlithium.com), coté à Toronto (TSX: WLC) développe le projet d'exploitation du gisement d'hectorite de Kings Valley, au Nevada (États-Unis). Une étude de préfaisabilité a été publiée en décembre 2011. La société prévoit produire du carbonate de lithium, mais aussi du sulfate de potassium et du sulfate de sodium. Le projet prévoit un démarrage de la production en 2015, avec une capacité de départ de 13 kt/an de Li_2CO_3 , devant doubler après 4 ans, pour un coût opératoire de 3,47 US\$/kg. Le projet est en phase d'études environnementales et de demandes d'autorisations.

6.2.5. Acteur développant un projet de saumure géothermale

Simbol Materials (Pleasanton, Californie, USA, www.simbolmaterials.com), fondée en 2008, développe la récupération du lithium, mais aussi du manganèse et du zinc contenu dans les saumures géothermales qui alimentent déjà un groupe de centrales géothermiques de 288 MW sur la rive sud du lac Salton Sea (Salton Sea KGRA (Known Geothermal Resources Area)), près de la frontière mexicaine. Un pilote de

démonstration de récupération du lithium a été présenté en 2010. Simbol Materials a annoncé le début de la production commerciale de carbonate de lithium fin septembre 2011, avec une capacité annuelle de 500 t de Li_2CO_3 . La société cherche à tripler rapidement sa capacité et vise à terme (2020?) 16 000 t/an LCE. La société japonaise Itochu a pris une participation de 20 % dans le projet.

6.3. LES ACTEURS FRANÇAIS

Il n'existe en France qu'un producteur minier de substances lithinifères (Imerys), mais il alimente un marché restreint au domaine des verres et céramiques en usage direct. Une société, Récupyl, s'est lancée dans le recyclage du lithium des piles et accumulateurs. Deux sociétés fabriquent des accumulateurs au lithium (Saft et Bolloré) et une troisième (E4V) en assemble les cellules. Un métallurgiste est spécialisé dans les alliages Al-Li, Constellium.

Saft serait le principal utilisateur de carbonate de lithium, et Bolloré et Constellium les principaux utilisateurs de lithium métal.

Plus en aval, les constructeurs automobiles deviennent demandeurs de batteries au lithium, et les industries aérospatiales et de défense utilisent des alliages Al-Li.

6.3.1. Producteurs miniers

Imerys : Imerys Ceramics France, anciennement Société des Kaolins de Beauvoir (SKB), filiale du groupe Imerys (75007 Paris, www.imerys.com), exploite le gisement d'Échassières (03), principalement pour le kaolin (29 500 t en 2000) à destination de l'industrie des céramiques (carrelage, vaisselle, sanitaire, etc.). Elle produirait et commercialiserait aussi environ 15 kt/an de sables lithinifères ("félithe", à 1,8 % Li_2O) comme flux pour la verrerie, et 20 kt/an de roche broyée feldspathique à 0,9 % Li_2O comme flux pour l'industrie des tuiles (Roskill, 2009). Le groupe récupère aussi accessoirement de la cassitérite (60 t/an) et de la manganocolombite. Imerys publie cependant très peu d'information sur cette exploitation : dans son Document de Référence (Rapport Annuel) 2010, elle mentionne juste que le groupe produit du kaolin et des feldspaths (éventuellement lithinifères) dans l'Allier. Imerys exploite aussi ces substances à Kings Valley, en Caroline du Nord, dans le secteur des grands gisements historiques de spodumène, sans spécifier s'il en sort des produits lithinés.

Eramet : la société minière et métallurgique française Eramet (75015 Paris, www.eramet.fr) n'est pas présente actuellement dans le secteur de l'extraction et de la production de lithium, mais elle s'y intéresse, notamment en association avec le groupe **Bolloré** (92811 Puteaux, www.bollore.com) :

D'après un Communiqué de Presse du 16 février 2010, les groupes Bolloré et Eramet ont signé un contrat avec la société argentine Minera Santa Rita (www.santaritasrl.com). Cet accord donnait au groupement Bolloré-Eramet un accès à des concessions sur plusieurs salars lithinifères argentins, et lui permettait de les explorer, d'en estimer les ressources et d'étudier un projet d'unité de production de carbonate de lithium. Il donnait aussi au groupement une option d'achat des

concessions à l'issue des études au bout de 24 mois. Il n'y a pas eu de nouvelle communication publique d'information depuis lors.

La société Minera Santa Rita est un producteur de borates qu'elle exploite dans ses concessions situées sur des parties de plusieurs salars du Nord de l'Argentine, par ailleurs exploités par d'autres pour le lithium : Salar del Hombre Muerto, Salar de Cauchari, Salar Centenario (cf.Tab.16). Mais Minera Santa Rita n'en extrait pas le lithium.

Dans ce même communiqué de presse, il était déclaré que "les groupes Bolloré et Eramet ont uni leurs compétences depuis plus d'un an pour devenir un acteur significatif sur le marché mondial du lithium. [...] Le groupe Bolloré a développé une batterie particulièrement performante (Lithium-Métal-Polymère) utilisée pour alimenter sa voiture électrique, la Blue Car. Eramet apporte ses compétences minières et hydrométallurgiques [...]. Cet accord est une première étape dans la stratégie de développement dans le lithium du groupement, qui continue par ailleurs à étudier différents autres projets" (et notamment, en 2010, un projet de filière industrielle complète en Bolivie, mais qui ne serait plus d'actualité).

6.3.2. Recycleurs

Récupyl : la société Récupyl (38420 Domène, www.recupyl.fr) a été incubée et fondée au milieu des années 1990 à partir de projets de recherches du LEPMI (Laboratoire d'Électrochimie et de Physico-Chimie des Matériaux et des Interfaces) de l'Institut Polytechnique de Grenoble (INPG, www.grenoble-inp.fr).

Récupyl recycle les piles et accumulateurs et en valorise les métaux contenus, par des procédés hydrométallurgiques brevetés au niveau mondial. Elle a annoncé récupérer, dans son pilote de Domène, jusqu'à 98 % des métaux contenus dans les batteries lithium-ion, le tout à température ambiante et avec une dépense énergétique réduite. Pour 1 tonne de batteries, Récupyl obtient 130 kg de cobalt, 290 kg d'acier inox, 85 kg de lithium, 80 kg de cuivre et 240 kg de résidus (papier, plastiques) (Le Figaro, juillet 2008 ; www.decouplage.org, octobre 2008). Pour son procédé, Farouk Tedjar, fondateur et président de Récupyl, a été récompensé par le prix Pierre Potier 2008, remis par Luc Chatel, alors Secrétaire d'État chargé de l'Industrie et de la Consommation, le 1^{er} juillet 2008, sur la thématique de "l'innovation en chimie en faveur du développement durable".

Depuis lors, Récupyl a implanté des sites industriels de traitement de batteries Lithium-ion à Singapour en partenariat avec la société singapourienne TES-AMM Singapore Pte Ltd (2008, capacité de traitement de 320 tonnes de batteries Lithium-ion par an), et dans le Michigan (États-Unis) en partenariat avec la société étatsunienne Battery Solution Inc. (2009). Elle a aussi implanté des unités de tri en Pologne, en Espagne et en Italie.

Sa production globale de lithium recyclé (et autres métaux) n'est pas communiquée, ni ses coûts de production.

6.3.3. Fournisseurs

Alfa Aesar France (2, allée d'Oslo, 67300 Schiltigheim) est une filiale de la société allemande de produits chimiques Alfa Aesar GmbH, Karlsruhe, Allemagne (www.alfa.com), qui commercialise entre autres du lithium métal et de très nombreux composés chimiques du lithium. Alfa Aesar GmbH est elle-même filiale du groupe britannique Johnson Matthey (www.matthey.com).

Métaux spéciaux SA (MSSA) (Plombières Saint Marcel, 73600 Moûtiers, www.metauxspeciaux.com) fournit depuis plus d'un siècle des matières premières à l'industrie chimique. Dans les années 1990, elle produisait du lithium, mais n'en liste plus aujourd'hui parmi ses produits commercialisés, limités désormais aux composés de sodium, potassium, vanadium et organomagnésiens.

6.3.4. Verrerie

Saint-Gobain (92400 Courbevoie, www.saint-gobain.fr), est le n° 2 mondial du vitrage (n° 1 européen) et du verre de conditionnement, mais ne consommerait du lithium ou des minéraux au lithium que de manière anecdotique. .

6.3.5. Métallurgie

Constellium : la société Constellium (75008 Paris, www.constellium.com), a été créée en 2011 par la restructuration d'Alcan Engineered Products (anciennement filiale de Rio-Tinto-Alcan, auparavant Alcan, qui avait lui-même absorbé Péchiney en juillet 2003) et de la cession de la majorité au fonds d'investissements américain Apollo Management. Elle développe et produit, entre autres, des alliages d'aluminium-lithium (Al-Li) dans son centre de R&D de Voreppe (38) et ses usines d'Issoire (63) (Fig.42) et Montreuil-Juigné (49).

Ces alliages Al-Li sont développés sous la marque Airware®. Ils sont destinés aux secteurs aéronautique et spatial, en particulier dans les pièces de structures telles que les ailes et le fuselage des avions. Ils présentent des propriétés mécaniques égales, voire supérieures, à celles des alliages traditionnels utilisés en aéronautique, pour une densité inférieure de 20 à 25 %. Selon les applications, la teneur en lithium est comprise entre 1,5 et 2 %. Le lithium métal utilisé doit être le plus pur possible (teneurs en Ca et Na < 40-50 ppm).

Ses clients incluent EADS, Airbus (alliage Airware pour l'A350-XWB), Dassault, mais aussi les britanniques BAE Systems et GKN, les américains Lockheed-Martin (alliages Airware 2297 et 2098 pour le F-16 amélioré depuis 2004), Boeing, General Dynamic, Northrop Grumman, le canadien Bombardier (Alliage Airware pour le Bombardier C-Series) (source : www.constellium.fr).



Figure 42 - Usine de Constellium d'Issoire (© www.constellium.fr)

6.3.6. Fabricants de batteries d'accumulateurs et de piles au lithium

Le "cycle de vie" des batteries électrochimiques au lithium comprend les étapes suivantes (CEIS, 2011) :

- 1- extraction et raffinage des matériaux : Extraction et de traitement chimique des différents matériaux (lithium, cobalt, manganèse, etc.) ;
- 2- fabrication des composants (électrodes positive et négative, électrolyte, etc.) ;
- 3- fabrication des cellules électrochimiques : La cellule est le cœur de la batterie, le composant où a lieu la réaction d'oxydoréduction, c'est-à-dire le transfert de charges entre l'anode et la cathode qui permet de stocker ou de produire de l'énergie ;
- 4- assemblage des cellules en module : Les cellules unitaires sont ensuite assemblées entre elles pour former un module. Des dispositifs de contrôle du voltage et de la température sont reliés à chaque module afin d'éviter les surtensions et les emballements thermiques (un module peut rassembler par exemple cellules) ;
- 5- assemblage des modules en pack (cf. Fig.7 en 3.2.2): jusqu'à une vingtaine de cellule sont ensuite reliées entre elles pour former un pack de batteries. Un dispositif supplémentaire de sécurité, nommé Battery Management Systems (BMS), est également ajouté. Outre la fonction de système redondant de sécurité, le BMS permet, entre autres, d'optimiser la charge et la décharge et donc la performance des batteries ;
- 6- intégration de la batterie au dispositif utilisateur (voiture électrique ou autres) ;

7- utilisation de la batterie ;

8- recyclage et valorisation de la batterie en "fin de vie". Les batteries fabriquées pour l'automobile arriveront en fin de vie lorsqu'elles auront atteint 80 % de leur capacité de stockage initiale.

Trois sociétés françaises sont présentes dans la production de batteries au lithium, mais seulement dans les étapes 3 à 5 et doivent donc se procurer les composants auprès de fournisseurs extérieurs.

Saft : la société Saft²⁷ (93170 Bagnolet, www.saftbatteries.com) a été créée en 1918. Elle avait été rachetée intégralement par Alcatel en 1995 et sortie de bourse, et y a été réintroduite en juin 2005 (au Compartiment B de l'Euronext) après sa revente en 2004. Saft se présente comme le leader mondial de la conception, du développement et de la production de batteries de haute technologie pour l'industrie.

Saft produit en particulier des batteries Li-ion pour applications industrielles et militaires, pour les marchés du stockage d'énergie renouvelable, du transport et des réseaux de télécommunications. La société est implantée dans 19 pays.



Figure 43 - Différents types de batteries Li-ion Saft (cylindriques et prismatiques pour applications mobiles, pack de 48 V pour systèmes de secours fixes (© www.saftbatteries.com)).

Batscap : la société Batscap (29556 Quimper, www.batscap.com), filiale à 80 % du groupe **Bolloré** (www.bolloré.com) et à 20 % d'EDF, implantée à Quimper et à Montréal (Canada), développe et fabrique les batteries Lithium-Métal-Polymère (LMP), ainsi que des "supercapacités", qui équipent entre autres les "Bluecar" de Bolloré, construite par l'italien Pininfarina.

²⁷ Société des Accumulateurs Fixes et de Traction



Figure 44 - Batterie Lithium-Métal-Polymère de Batscap (© www.bluecar.fr)

E4V : la société E4V (92200 Neuilly-sur-Seine, www.e4v.eu), fondée en 2008, achète les cellules électrochimiques déjà élaborées et les assemble dans son usine au Mans pour en faire des batteries. Celle-ci, inaugurée en avril 2011, a commencé sa production en août 2011. Elle prévoit atteindre progressivement en 2012 une capacité de 10 000 packs de batteries par an. Ses clients sont les constructeurs automobiles français Aixam Mega, Éco & Mobilité et Mia Electric (ex-Heuliez).



Figure 45 - Batterie Lithium-ion de E4V (© www.e4v.eu)

ASB Group : la société ASB ("AéroSpatial Batteries") (18021 Bourges, www.asb-group.com), créée en 1994 par la fusion et filialisation des activités Piles Thermiques d'Aérospatiale (désormais EADS) et de Saft, fabrique sur mesure des piles thermiques au lithium.

Implanté à Bourges (ASB), au Royaume-Uni (MSB à Glasgow, intégrée en 1996) et aux États-Unis (ATB Inc., dans le Maryland, créé en 2006), ASB-Group est le leader européen et numéro 2 mondial sur le secteur industriel à très haute valeur ajoutée technique des piles thermiques (étude, conception, production et commercialisation).

ASB a produit plus de 2 millions de piles de près de 200 définitions différentes, par 160 salariés. Ses clients sont les secteurs aéronautique, spatial, défense et armement (missilier MBDA), énergie.

6.3.7. Constructeurs de véhicules électriques (voitures et cycles)

Après plusieurs années de développement, plusieurs voitures entièrement électriques et avec batteries au lithium sont arrivées sur le marché français en 2011, avec un démarrage d'une production à l'échelle industrielle.

La Banque Européenne d'Investissement (BEI), l'institution de financement à long terme de l'Union européenne, a accompagné en partie des efforts des constructeurs industriels français et européens. Ainsi le journal Les Échos publiait, le 13/01/2012 : "La BEI a annoncé avoir accordé un prêt de 180 millions d'euros à **Renault** pour un projet de recherche et de développement en matière de véhicules électriques. Renault a déjà bénéficié en 2009 d'un prêt de 400 millions d'euros de la BEI pour mettre au point des véhicules 100 % électriques. La BEI a par ailleurs déjà accordé plusieurs prêts, dont 220 millions d'euros à Nissan au Royaume-Uni, 780 millions en faveur de BMW et 130 millions au français **Bolloré** pour l'aider à mettre au point une nouvelle génération de batteries Lithium-Métal-Polymères."

Bolloré : le Groupe français Bolloré (92811 Puteaux, www.bollore.com), créé en 1822 d'abord dans la papèterie, s'est largement diversifié depuis un quart de siècle : transport, logistique, distribution d'énergie, films plastiques, communication, médias, participations financières dans d'autres activités, batteries pour véhicules électriques et désormais véhicules électriques. Le groupe est coté en bourse et détenu majoritairement par la famille Bolloré.

Bolloré a initié en 2009 sa voiture électrique Bluecar™, une voiture citadine électrique d'une autonomie de 250 km et qui peut atteindre 130 km/h. Sa batterie au lithium-métal-polymère (LMP) a été conçue par sa filiale à 80 % Batscap (cf. 6.2.6). La Bluecar est construite en partenariat 50-50 avec le constructeur automobile italien Pininfarina, dans le site de ce dernier à Turin.

La Bluecar a été choisie par la ville de Paris et 45 communes d'Ile-de-France pour le système de voitures propres en auto-partage de l'agglomération parisienne baptisé "Autolib" et lancé le 5 décembre 2011 avec 250 Bluecar™ réparties sur une cinquantaine de stations. Le nombre de véhicules doit être progressivement augmenté à 2000 en 2012.



Figure 46 - La Bluecar™ de Bolloré-Pininfarina (© www.bluecar.fr)

Mia Electric : la société Mia Electric (79140 Cerizay, www.mia-voiture-electrique.com), créée en 2009 (ex-Heuliez), a lancé en septembre 2011 sa petite citadine électrique "mia" avec batterie au lithium (cathode LiFePO_4). Elle aurait atteint les 1000 exemplaires vendus fin février 2012.



Figure 47 - La voiture électrique avec batterie au lithium de Mia Electric (© www.mia-voiture-electrique.com)

PSA Peugeot Citroën : le constructeur automobile PSA Peugeot Citroën (www.psa-peugeot-citroen.com) commercialise depuis fin 2010 sous la marque Peugeot la compacte citadine électrique Peugeot-iOn et sous la marque Citroën la C-Zéro, qui sont des déclinaisons de la Mitsubishi i-MiEV, lancée au Japon en 2006. Ces véhicules sont assemblés à Mizushima au Japon.



Figure 48 – de gauche à droite, la Mitsubishi i-MiEV (© www.mitsubishi-motors.com), la Peugeot iOn (© www.peugeot.fr) et la Citroën C-Zero (© www.citroën.fr)

Les batteries Li-ion sont fabriquées par Lithium Energy Japan, une joint-venture dédiée entre Mitsubishi Motors Corp., Mitsubishi Corp. et GS Yuasa Corp, l'un des principaux fabricants japonais de batteries au lithium.

Peugeot commercialise aussi depuis l'automne 2011 le "crossover" 3008 en version hybride, mais avec des batteries Ni-MH.

Par ailleurs, **Peugeot-Cycles** (www.cycles.peugeot.fr) fabrique et commercialise une gamme de vélos électriques à batteries au lithium, et **Peugeot Scooters** (www.peugeot-scooters.com), du groupe PSA, prévoit lancer en mars 2012 son scooter électrique e-vivacity™.

Renault : le constructeur automobile Renault (92100 Boulogne-Billancourt, www.renault.fr) travaillait depuis des années au développement du véhicule électrique. Il a lancé depuis peu la commercialisation de 3 modèles de véhicules entièrement électriques (EV) à batterie Li-ion, l'utilitaire Kangoo ZE, assemblée à Maubeuge, et la berline Fluence ZE depuis fin octobre 2011 et le petit quadricycle Twizy ZE depuis début 2012. La berline compacte électrique Zoe, construite à Flins, officiellement présentée au Salon de Genève en mars 2012, devrait être disponible à la vente à l'automne 2012.

Renault prévoit atteindre 200 000 véhicules électriques en 2015-2016.

Renault prévoit aussi ouvrir un centre de production de batteries sur le site de Flins d'ici 2014, avec une capacité de production de l'ordre de 250 000 accumulateurs Li-ion par an.



Figure 49 - Les véhicules électriques Renault avec batteries Li-ion au catalogue en 2012 (Kangoo ZE, Fluence ZE et Twizy, © www.renault.fr)

Matra Manufacturing and Services (75016 Paris et 41200 Romorantin-Lanthenay, <http://matra.com>, ex Matra) fabrique et commercialise des vélos et scooters électriques à batteries au lithium. Elle fabrique aussi des quadricycles électriques Gem-E2 et E4 mais avec des batteries au plomb.

Aixam-Méga (73101 Aix-les-Bains, www.mega-vehicules.com) construit et commercialise de petits véhicules utilitaires et commerciaux électriques à batteries Lithium-Fer-Phosphate (E4V), adaptés pour les collectivités, les espaces verts et les espaces fermés (modèles Mega-City, E-Worker et Multitruck-Electrique).

Cycleurop Industries SAS ("Gitane") (10104 Romilly-sur-Seine, www.gitane.com) fabrique et commercialise des vélos à assistance électrique avec des moteurs Panasonic et des batteries Li-ion.

D'autres entreprises françaises lancent divers véhicules électriques avec batteries au lithium :

- **Lumeneo** (75016 Paris, www.lumeneo.fr), fondée en 2003, prévoit produire un millier de quadricycles électriques Smera™ en 2012 ;

- **Induct** (78390 Croissy-sur-Seine, www.induct-technology.com), fondée en 2004, lance en 2012 la petite citadine électrique Modulgo™ à batteries Li-Fe-Phosphate et un véhicule de 8 places robotisé Cybergo™ à batteries Li-Polymère.
- **Éco & Mobilité** (86320 Mazerolles, www.eco-mobilite.com), fondée en 2007, produit et commercialise de petits utilitaires électriques sous la marque Simplicity (www.simplicity.fr), ainsi qu'un triporteur et un vélo pliant électriques.
- **Exagon Motors** (58470 Magny-Cours, www.exagon-motors.com) espère produire en 2012 une dizaine d'exemplaires de sa "Furtive E-GT" équipée de batteries Li-ion de Saft.



Figure 50 - La Furtive E-GT d'Exagon Motors (© J. Detour, source www.exagon-motors.fr)

- **Venturi Automobiles** (Monaco, www.venturi.fr) prévoit construire en 2012 une dizaine de cabriolets sportifs de luxe électriques Fetish™ à batteries Li-ion-Polymère de 54 kWh ;

6.3.8. Défense et aérospatiale

MBDA : le missilier MBDA (92350 Le Plessis-Robinson, www.mbda-systems.com) utilise des alliages Al-Li de Constellium et des piles thermiques au lithium de ASB-Group pour ses missiles.

Airbus / EADS : le constructeur européen Airbus (31700 Blagnac, www.airbus.com), filiale d'EADS, utilise des alliages Al-Li de Constellium pour ses nouveaux appareils A380, A350 etc.).

6.3.9. Pharmacie

Quelques laboratoires pharmaceutiques fabriquent et commercialisent en France des médicaments au lithium. Quelques-uns sont cités pour mémoire (liste non exhaustive), sachant que les quantités de lithium consommées par ce secteur sont très marginales.

Sanofi : le groupe pharmaceutique Sanofi (75008 Paris, www.sanofi.com) produit et commercialise entre autres le médicament Téralithe™ à base de carbonate de lithium comme régulateur de l'humeur et le traitement des troubles bipolaires.

Boiron (69110 Sainte-Foy-lès-Lyon, www.boiron.fr) produit l'"Oligostim Lithium" à base de gluconate de lithium, pour des troubles psychiques et psychosomatiques mineurs.

Labcatal (92541 Montrouge, www.labcatal.com) produit à Annemasse (74) le "Lithium Oligosol" à base de gluconate de lithium, pour des troubles psychiques et psychosomatiques mineurs.

6.3.10. Nucléaire

Areva : le groupe Areva (75009 Paris, 92400 Courbevoie, www.areva.com) est un groupe industriel français spécialisé dans les métiers des combustibles et de l'énergie nucléaires et développant des activités dans les énergies renouvelables. Areva a été créé en 2001 à partir de l'ancienne Cogema créée elle-même en 1976 comme filiale du CEA (Commissariat à l'Énergie Atomique).

Le CEA, puis Cogéma, puis Areva, ont assuré sur le site de Miramas (13), entre 1961 et 2000, des activités de transformation, de conversion et de recyclage d'isotopes légers lithium et bore. On enrichissait le lithium en ^6Li utilisé pour les bombes à fusion thermonucléaire (bombes à hydrogène). La production d'isotopes a cessé en 2000 et l'installation a été démantelée à partir de 2003.

6.4. DES COMPOSÉS DE BASE AUX PRODUITS FINIS : QUELQUES AUTRES ACTEURS DE L'UNION EUROPÉENNE

6.4.1. Allemagne

La société allemande **Chemetall GmbH** (www.chemetalllithium.com), filiale depuis 2004 de l'américain Rockwood Specialties, et maison-mère de l'exploitant de salar chilien SCL (Salar de Atacama) et américain Chemetall Foote (Silver Peak, Nevada), produit du lithium-métal et une vaste gamme de composés de lithium, dans ses usines de Langelshelm en Basse-Saxe en Allemagne (lithium métal et composés), de Cheng Hua à Taiwan (butyllithium), de New Johnsonville dans le Tennessee aux États-Unis (butyllithium et autres) et de Kings Mountain en Caroline du Nord aux États-Unis (bromure de lithium etc.) (cf.6.1.1.)

Varta Microbatteries GmbH (www.varta-microbattery.com) produit des piles et batteries rechargeables au lithium de petite dimension (bouton, cylindres).

NB: L'ancienne société Varta a été éclatée en plusieurs sociétés, dont Varta Microbatteries GmbH, basée en Allemagne, Varta Consumer Batteries, désormais filiale de l'américain Spectrum Brands, qui fabrique des piles et batteries au lithium de grande consommation (appareils portables), Varta automotive, désormais filiale de l'américain Johnson Controls, qui fabrique des batteries classiques au plomb-acide pour automobiles etc.

6.4.2. Belgique

La société belge **Umicore** (www.umicore.com) est l'un des leaders mondiaux de la production de cobaltate de lithium pour les cathodes de batteries au lithium, dans ses

usines de Cheonan en Corée du Sud et de Jiangmen en Chine (Business Group "Energy Materials", Business Unit "Cobalt & Specialty Materials").

Umicore recycle aussi les batteries au lithium pour en récupérer le cobalt, mais n'en récupère pas le lithium (usine de Hoboken, en Belgique).

6.4.3. Royaume-Uni

FMC-Lithium (www.fmclithium.com), la branche lithium de la société étatsunienne **FMC Corp.** (qui exploite entre autres le Salar del Hombre Muerto en Argentine) produit du lithium métal et des composés de lithium (plus de 130 composés et spécifications au catalogue, et en particulier les composés pour anodes, cathodes et électrolytes de batteries au lithium) dans son usine de Bromborough, dans le Merseyside en Angleterre.

MSB, filiale du français ASB-Group (www.asb-group.com), fabrique des piles thermiques au lithium à Coatbridge, près de Glasgow, en Ecosse.

AGM Batteries (www.agmbatteries.com) produit des batteries Li-ion à Thurso, en Ecosse (capacité de 1 million de cellules par an).

Leverton-Clarke (www.levertonclarke.com), basé à Basingstoke dans le Hampshire en Angleterre, produit et commercialise du lithium métal et une cinquantaine de composés inorganiques de lithium.

6.5. TRANSFORMATEURS DE COMPOSÉS DE LITHIUM DANS LE RESTE DU MONDE

6.5.1. Japon

Honjo Chemical Corp. est le premier producteur de composés de lithium au Japon, avec 2 usines à Naoshima (bromure, hydroxyde, chlorure et carbonate de lithium de haute pureté) et Neyagawa (oxydes mixtes de lithium et cobalt, nickel, manganèse, et feuilles et alliages de lithium).

Nippon Chemical Industrial produit des composés de lithium pour l'électronique à Furukawa.

AGC Seimi Chemicals, une filiale d'Asahi Glass, produit du cobaltate de lithium et d'autres oxydes mixtes de lithium pour les batteries Li-ion et- Li-Polymère à Chigasaki et Kanagawa.

Nippon Denko produit des oxydes mixtes de lithium-manganèse.

Plusieurs autres sociétés fabriquent des composants pour cathodes ou électrolytes au lithium pour batteries : **Toda Kogyo**, **Mitsubishi Chemicals**, **Mitsui Kinzoku**, **JFE Minerals**, **Kanto Denka**, **Morita Chemicals**.

6.5.2. Chine

(source : Roskill, 2009)

Sichuan Shehong Lithium Industry Co.Ltd / Sichuan Tianqi Industry Group, basé à Shehong (Sichuan) produit du carbonate de lithium de diverses qualités (y compris pharmaceutique), de l'orthophosphate, du sulfate et d'autres composés du lithium, en particulier à partir du spodumène de Greenbushes (Talison Lithium) importé d'Australie.

Pan-Asia (Nantong) Lithium Co., Ltd, basé à Nantong (Jiangsu) détient plusieurs filiales dont Ya'an Xinyatong Lithium Ltd, basé à Ya'an dans le Sichuan qui traite du spodumène de Talison Lithium pour produire de l'hydroxyde de lithium, et Nantong Pan-Asia lithium and Cobalt Material Co Ltd qui produit du carbonate de lithium et du cobaltate de lithium pour batteries.

Xinjiang Lithium Salt Plant, basé aux environs d'Urumqi (Xinjiang) produit du carbonate et de l'hydroxyde de lithium, initialement à partir de la mine de spodumène de Kokotay, puis de spodumène importé de Talison Lithium, complété depuis 2008 par des tailings venant de Kokotay.

Aba Guangsheng Lithium Co Ltd, basé à Wenchuan (Sichuan) produit du carbonate et de l'hydroxyde de lithium à partir du spodumène de la mine voisine de Jinchuan.

Jixian Lithium Salt Plant, filiale de Sichuan Province Mining, basé à Dujiangyan (Sichuan) produit de l'hydroxyde et du carbonate de lithium à partir du spodumène de la mine de Jiajika.

Xinyu Ganfeng Lithium Co Ltd, avec 3 implantations dans le Jiangxi, produit des composés de lithium, de rubidium et de césium. Elle aurait transformé dans le passé la lépidolite de Yichun Huili mais fonctionnerait désormais surtout à partir de chlorure de lithium importé.

Jiangzhong Chemicals Corp., basé à Yibin (Sichuan), filiale de China Nuclear energy Industrial Corp., produit 150 à 300 t de lithium métal par an, ainsi que des alliages lithium-calcium et divers autres composés de lithium de haute pureté.

Plus de 25 autres sociétés chinoises transforment ensuite les composés de base en une gamme complète de composés de lithium, en particulier des composés pour batteries (cobaltate de lithium, etc.), du bromure de lithium, etc.

6.5.3. Corée du Sud

Daejung Chemicals and Metals (www.daejunhchem.co.kr) produit de nombreux composés chimiques dont des oxydes mixtes de lithium (cobaltate etc.) pour l'industrie coréenne des batteries au lithium.

Umicore (Belgique) produit du cobaltate de lithium dans son usine sud-coréenne de Cheonan (cf. 6.3.2)

6.5.4. États-Unis

En plus de FMC Corp. et Chemetall Foote déjà cités (cf.6.1.1 et 6.1.3), il convient de mentionner :

Toxco Inc. (Anaheim, Californie, www.toxco.com), qui recycle tous types de batteries dans ses usines de Baltimore et Lancaster dans l'Ohio, de Oak Ridge dans le Tennessee, et de Trail en Colombie Britannique au Canada. L'usine de Trail est spécialisée dans le recyclage des batteries au lithium et la récupération du carbonate de lithium. Sa filiale LitChem traite le lithium recyclé.

Tronox Inc. (Oklahoma city, Oklahoma, www.tronox.com), qui est surtout un producteur de dioxyde de titane, et qui produit aussi de l'oxyde mixte de lithium et manganèse pour batteries au lithium à Soda Springs (Idaho).

6.5.5. Russie

JSC TVEL (www.tvel.ru), une société métallurgique et chimique diversifiée, a deux unités de production de composés de lithium :

- la **JSC Krasnoyarsk Chemical Metallurgical Plant**, à Krasnoyarsk, qui produit du lithium métal et de l'hydroxyde de lithium, précédemment à partir de la mine de spodumène de Zavitsinskoye dans le Chita, fermée en 1997,et désormais à partir de carbonate importé de SQM (Chili) ;
- la **JSC Novosibirsk Chemical Concentration Plant**, à Novosibirsk, qui produit du lithium-métal et divers composés de lithium en particulier pour batteries à partir d'hydroxyde provenant de la JSC Krasnoyarsk CMP.

6.5.6. Ukraine

Perekop Bromine produit du bromure de lithium dihydraté à partir d'hydroxyde de lithium importé de Belgique.

6.6. PRODUCTEURS DE PILES ET BATTERIES AU LITHIUM DANS LE MONDE

Les fabricants de piles et batteries de grande consommation (appareils portables) au lithium sont nombreux.

Parmi les fabricants de piles au lithium, on pourra citer :

- Au Japon : Panasonic (/Sanyo²⁸) (www.panasonic.net), Hitachi maxell, Toshiba Battery, Seiko, Sony ;

²⁸ Sanyo est passé sous contrôle de Matsushita Electric en 2008, laquelle a ensuite pris le nom de son ancienne filiale Panasonic Corporation.

- En Chine : China BAK battery, Guangzhou Markyn Batteries, Wuhan Li Xing, GP Batteries (Hong Kong), New Leader battery (Hong Kong)
- A Taïwan : Kunshan Energy Battery ;
- Aux États-Unis : Duracell, Energizer, Greatbatch, Spectrum Brands, Ultralife batteries ;
- En Allemagne : Varta Microbatteries (cf. 6.3.1) ;
- En France : Saft ;
- En Suisse : Renata ;
- En Israël : Tadiran Batteries ;

Parmi les fabricants de batteries rechargeables de grande consommation au lithium, on pourra citer :

- Au Japon : Panasonic (/Sanyo) (www.panasonic.net), Hitachi Maxell, Sony ;
- En Chine : BYD, Tianjin Lishen ;
- À Taïwan : E-one Moli Energy (www.molicel.com) ;
- En Corée du Sud : Samsung SDI, LG Chem ;

Parmi les fabricants de batteries au lithium pour des applications plus spécialisées (applications aérospatiales, militaires, véhicules électriques, stations fixes), on pourra ajouter :

- Au Japon : GS Yuasa (www.gs-yuasa.com), Furukawa Battery (www.furukawadenchi.co.jp), ENAX, NEC ;
- En Chine : ABAT, Danionics, Ieehoo, Minamoto (Hong-Kong, www.minamoto.com)
- En Malaisie : APL Battery ;
- Aux États-Unis : A123 Systems, Altair nanotechnologies, Ultralife, Lithium Technology Corp. (www.lithiumtech.com), Ener1, Valence Technology (www.valence.com), EaglePicher (USA, www.eaglepicher.com) ;
- Au Canada : ModEnergy, Magna International (www.magna.com, assembleur de modules et packs de batteries) ;
- En Russie : Liotech (www.liotech.ru, usine de fabrication de batteries lithium-ion inaugurée en décembre 2011 à Novosibirsk) ;
- En Allemagne : Gaia (www.gaia-akku.com), filiale de l'américain Lithium Technology Corp. ;
- En France : Saft, Batscap, E4V (cf.6.2.6)

Les pays indiqués dans les listes ci-dessus indiquent les nationalités des sociétés, mais beaucoup ont des unités de productions dans plusieurs pays.

6.7. CONSTRUCTEURS DE VOITURES ÉLECTRIQUES

Après les premiers modèles de véhicules électriques à batteries Li-ion apparus en 2008 (Tesla, Th!nk City), il y a eu depuis 2010 un foisonnement progressif de lancement de véhicules électriques (EV, PHEV et HEV) par de nombreux constructeurs, une grande part avec des batteries Li-ion. Ce foisonnement continue en

2012. En plus des constructeurs français mentionnés en 6.2.7, on pourra citer à titre d'exemples (non exhaustifs) :

- Toyota (Japon) prévoit de basculer ses HEV Prius de batteries Ni-Cd à des batteries au lithium, et lance une version PHEV avec batterie Li-ion (60 000 ex. prévus en 2012) ;
- Mitsubishi Motors (Japon) avait lancé dès 2009 l'EV MiEV (25 000 ex. en 2011, 40 000 en 2012), équipée de batteries Li-ion de GS-Yuasa. Ce modèle a été décliné en France par PSA sous les marques Peugeot (iOn) et Citroën (C-Zéro) ;
- Honda (Japon) lance l'EV Honda Fit ;
- Nissan (Japon) a lancé l'EV Leaf fin 2010 avec batteries Li-ion (>21 000 ex. vendus en 2011, dont >9 000 aux États-Unis) ;
- Kia (Corée du Sud) avait lancé en 2011 l'HEV Optima ;
- Hyundai (Corée du Sud) avait lancé en 2011 l'HEV Sonata ;
- GM-Chevrolet (USA) a lancé en 2011 sa PHEV Volt avec batteries Li-ion (véhicule électrique avec moteur thermique pour recharger les batteries en dépannage en cas de dépassement d'autonomie) (7 600 ex. vendus en 2011, prévision de 60 000 en 2012), et devrait lancer prochainement son HEV Malibu ;
- Ford (USA) lance son EV Focus Electric, son PHEV CMax-Energi et ses HEV Fusion et CMax ;
- Tesla Motors (USA) commercialise depuis 2009 son roadster EV à batterie Li-ion et devrait lancer son PHEV modèle S ;
- Coda (USA) lance l'EV Coda Sedan (assemblée à partir de carrosseries Hafei et de batteries Lishen chinoises Li-Fer-Phosphate) ;
- Mercedes-Benz (Allemagne) lance son EV Class A E-cell à batterie Li-ion ;
- BMW (Allemagne) lance son HEV BMW Active Hybrid ;
- Volkswagen (Allemagne) lance son HEV Jetta ;
- Th!nk (Norvège), après son rachat en 2011, devrait relancer la fabrication et la commercialisation de la petite citadine EV Th!nk City avec 2 versions de batteries (Li-ion et sodium) ;
- BYD (Chine) a sorti son EV BYD e6 (batteries Li-Fer-Phosphate) en 2010 en Chine et prévoit le lancer aux États-Unis en 2012 ;
- Tata Motors (Inde) lance les EV Indica Vista EV et la Nano EV.

7. Commerce extérieur de la France

Concernant le lithium, les douanes françaises publient sur le kiosque du Ministère des Finances, <http://lekiosque.finances.gouv.fr/> les quantités et valeurs du carbonate, de l'hydroxyde et du niobate²⁹ de lithium importés et exportés par la France, en données FAB (exportation) / CAF (importations).

Elles publient aussi les quantités et valeurs des batteries (accumulateurs) et piles au lithium importées et exportées par la France, en distinguant, pour ces dernières, les piles-bouton, les piles cylindriques et les autres.

Ces chiffres publiés par « le kiosque » n'incluent pas les matériels militaires. Il n'est pas précisé s'ils incluent, pour les batteries par exemple, les batteries déjà incluses dans les biens d'équipement électriques ou électroniques importés (ordinateurs, téléphones et tablettes portables, outillage sans fil etc.).

Les tableaux 25 à 29 ci-après récapitulent ces données pour les années 2009, 2010 et 2011.

On constate que le poste "composés de lithium" est un poste déficitaire du commerce extérieur français, d'une amplitude croissante, de 7,4 M€ de déficit en 2009 7,9 M€ en 2010 et 12,1 M€ en 2011.

Cette augmentation du déficit est surtout liée à un plus-que-doublement des volumes importés (passé de 1 173 t de carbonate de lithium en 2009 à 2 790 t en 2011, par exemple), atténuée cependant par une baisse du prix unitaire (5,07 €/kg en moyenne en 2009 pour le carbonate de lithium en 2009 vs 2,93 en 2011), obtenue en particulier par un basculement très important des importations du Chili. Ainsi en 2009 la France a importé 85 t de carbonate de lithium du Chili sur un total de 1 173 t, soit 7,2 % de ses importations, alors qu'en 2011 elle en a importé 1 855 t sur un total de 2 792 t, soit 66,4 % de ses importations.

On constate que le poste "accumulateurs au lithium" (= batteries rechargeables au lithium) est très déficitaire, avec un déficit se creusant d'année en année, passant de 12,8 M€ en 2009 à 104,3 M€ en 2011.

Le poste "piles au lithium" reste excédentaire de 23 à 26 M€. Mais le cumul batteries rechargeables + piles au lithium est passé d'un excédent de 10,5 M€ en 2009 à un déficit de 78,2 M€ en 2011.

²⁹ Utilisé en électro-optique et filtrage acoustique, cf. 3.2.10.

	2009			2010			2011		
	Valeur	Masse	val.unit.	Valeur	Masse	val.unit.	Valeur	Masse	val.unit.
28369100 - Carbonate de lithium									
Exportations									
Hongrie	3 k€	0 t		3 k€	0 t		6 k€	1 t	
Allemagne	0 k€	0 t		8 k€	1 t		5 k€	1 t	
Espagne	1 k€	0 t		4 k€	0 t		1 k€	0 t	
Algérie	0 k€	0 t		8 k€	0 t		0 k€	0 t	
Cameroun	0 k€	0 t		12 k€	0 t		0 k€	0 t	
USA	12 k€	0 t		1 k€	0 t		0 k€	0 t	
Iran	110 k€	0 t		0 k€	0 t		0 k€	0 t	
Italie	0 k€	0 t		6 k€	1 t		0 k€	0 t	
Madagascar	0 k€	0 t		14 k€	15 t		0 k€	0 t	
Total	126 k€	0 t		56 k€	17 t		12 k€	2 t	
Importations									
Chili	442 k€	85 t	5.20 €/kg	1 429 k€	298 t	4.80 €/kg	3 931 k€	1 855 t	2.12 €/kg
Belgique	3 089 k€	670 t	4.61 €/kg	1 336 k€	381 t	3.51 €/kg	1 637 k€	476 t	3.44 €/kg
Allemagne	1 727 k€	315 t	5.48 €/kg	1 667 k€	315 t	5.29 €/kg	1 451 k€	242 t	6.00 €/kg
Pays-Bas	244 k€	46 t	5.30 €/kg	278 k€	60 t	4.63 €/kg	368 k€	77 t	4.78 €/kg
Turquie	0 k€	0 t		0 k€	0 t		175 k€	49 t	3.57 €/kg
Autriche	0 k€	0 t		0 k€	0 t		154 k€	14 t	11.00 €/kg
Chine	46 k€	10 t	4.60 €/kg	150 k€	35 t	4.29 €/kg	135 k€	32 t	4.22 €/kg
Slovénie	238 k€	18 t	13.22 €/kg	326 k€	19 t	17.16 €/kg	126 k€	8 t	15.75 €/kg
Autres pays	161 k€	29 t	5.55 €/kg	153 k€	28 t	5.46 €/kg	196 k€	39 t	5.03 €/kg
Total	5 947 k€	1 173 t	5.07 €/kg	5 339 k€	1 136 t	4.70 €/kg	8 173 k€	2 792 t	2.93 €/kg
Déficit	-5 821 k€	-1 173 t		-5 283 k€	-1 119 t		-8 161 k€	-2 790 t	
28252000 - Oxyde et hydroxyde de lithium									
Exportations									
Allemagne	106 k€	40 t		25 k€	4 t		281 k€	55 t	
Italie	69 k€	14 t		72 k€	15 t		145 k€	29 t	
Belgique	25 k€	5 t		83 k€	16 t		77 k€	15 t	
Espagne	0 k€	0 t		2 k€	0 t		22 k€	4 t	
Suisse	0 k€	12 t		16 k€	3 t		19 k€	4 t	
Algérie	0 k€	0 t		16 k€	3 t		17 k€	0 t	
Maroc	0 k€	0 t		15 k€	3 t		5 k€	0 t	
Australie	0 k€	0 t		8 k€	0 t		0 k€	0 t	
Inde	25 k€	17 t		0 k€	0 t		0 k€	0 t	
Tunisie	11 k€	1 t		1 k€	0 t		0 k€	0 t	
Autres pays	5 k€	1 t		9 k€	0 t		2 k€	0 t	
Total	241 k€	90 t		247 k€	44 t		568 k€	107 t	
Importations									
USA	392 k€	46 t	8.52 €/kg	548 k€	51 t	10.75 €/kg	1 568 k€	34 t	46.12 €/kg
Chine	572 k€	122 t	4.69 €/kg	1 432 k€	315 t	4.55 €/kg	961 k€	235 t	4.09 €/kg
Allemagne	609 k€	75 t	8.12 €/kg	423 k€	75 t	5.64 €/kg	708 k€	105 t	6.74 €/kg
Canada	32 k€	0 t		122 k€	27 t	4.52 €/kg	637 k€	22 t	28.95 €/kg
Chili	0 k€	0 t		97 k€	21 t	4.62 €/kg	164 k€	38 t	4.32 €/kg
Pays-Bas	32 k€	6 t	5.33 €/kg	44 k€	8 t	5.50 €/kg	92 k€	17 t	5.41 €/kg
Royaume-Uni	122 k€	40 t	3.05 €/kg	86 k€	31 t	2.77 €/kg	78 k€	15 t	5.20 €/kg
Belgique	237 k€	46 t	5.15 €/kg	124 k€	20 t	6.20 €/kg	72 k€	14 t	5.14 €/kg
Russie	117 k€	23 t	5.09 €/kg	101 k€	22 t	4.59 €/kg	0 k€	0 t	
Autres pays	49 k€	2 t	24.50 €/kg	1 k€	0 t		15 k€	0 t	
Total	2 162 k€	360 t	6.01 €/kg	2 978 k€	570 t	5.22 €/kg	4 295 k€	480 t	8.95 €/kg
Déficit	-1 921 k€	-270 t		-2 731 k€	-526 t		-3 727 k€	-373 t	

Tableau 25 - Statistiques françaises d'import-export de carbonate, oxyde/hydroxyde et niobate de lithium. Données CAF-FAB hors matériel militaire. Source : Douanes françaises

	2009			2010			2011		
	Valeur	Masse	val.unit.	Valeur	Masse	val.unit.	Valeur	Masse	val.unit.
38249075 - Tranches de niobate de lithium, non-dopées									
Exportations									
Espagne	13 k€	4 t	3.25 €/kg	41 k€	7 t	5.86 €/kg	118 k€	9 t	13.11 €/kg
Pays-Bas	607 k€	135 t	4.50 €/kg	384 k€	68 t	5.65 €/kg	44 k€	8 t	5.50 €/kg
Allemagne	19 k€	11 t	1.73 €/kg	1 k€	0 t		0 k€	0 t	
Royaume-Uni	3 k€	1 t	3.00 €/kg	52 k€	3 t	17.33 €/kg	0 k€	0 t	
Autres pays	16 k€	5 t	3.20 €/kg	17 k€	6 t	2.83 €/kg	2 k€	0 t	
Total	658 k€	156 t	4.22 €/kg	495 k€	84 t	5.89 €/kg	164 k€	17 t	9.65 €/kg
Importations									
Irlande	254 k€	177 t	1.44 €/kg	335 k€	211 t	1.59 €/kg	254 k€	191 t	1.33 €/kg
Allemagne	34 k€	9 t	3.78 €/kg	23 k€	6 t	3.83 €/kg	77 k€	14 t	5.50 €/kg
USA	0 k€	0 t		16 k€	0 t		0 k€	0 t	
Autres pays	15 k€	5 t	3.00 €/kg	17 k€	5 t	3.40 €/kg	14 k€	2 t	7.00 €/kg
Total	303 k€	191 t	1.59 €/kg	391 k€	222 t	1.76 €/kg	345 k€	207 t	1.67 €/kg
Excédent/Déficit	355 k€	-35 t		104 k€	-138 t		-181 k€	-190 t	
Cumul des composés identifiés du lithium (carbonate, oxyde / hydroxyde et niobate)									
Déficit	-7 387 k€	-1 478 t		-7 910 k€	-1 783 t		-12 069 k€	-3 353 t	

Tableau 25 (suite) - Statistiques françaises d'import-export de carbonate, oxyde/hydroxyde et niobate de lithium. Données CAF-FAB hors matériel militaire. Source : Douanes françaises.

	2009		2010		2011	
	Valeur	Quantité	Valeur	Quantité	Valeur	Quantité
85078030 - Accumulateurs au lithium-ion (sauf hors d'usage)						
Exportations						
Allemagne	16 583 k€	83 647	23 134 k€	93 554	20 439 k€	138 352
USA	2 091 k€	66 649	5 460 k€	135 318	10 071 k€	174 159
Italie	1 716 k€	27 839	1 701 k€	27 943	2 830 k€	46 602
Suisse	1 579 k€	8 649	1 471 k€	11 848	2 779 k€	13 515
Royaume-Uni	785 k€	33 604	973 k€	47 652	2 197 k€	74 670
Espagne	391 k€	13 034	927 k€	26 150	2 022 k€	54 025
Inde	3 860 k€	177 760	221 k€	9 729	1 624 k€	35 901
Irlande	193 k€	1 422	1 610 k€	10 304	1 442 k€	9 281
Norvège	1 721 k€	5 865	3 983 k€	23 399	1 325 k€	9 347
Pays-Bas	699 k€	14 627	1 787 k€	23 678	1 137 k€	11 461
Autriche	164 k€	2 823	420 k€	4 716	876 k€	6 486
Suède	622 k€	22 697	544 k€	14 819	844 k€	14 811
Chine	103 k€	9 685	101 k€	4 666	786 k€	1 301
Corée du Sud	34 k€	147	10 k€	196	739 k€	9 134
Belgique	1 024 k€	9 106	702 k€	6 271	622 k€	5 823
Pologne	125 k€	2 317	263 k€	3 300	539 k€	12 734
Tchéquie	333 k€	18 438	200 k€	11 503	455 k€	10 651
Qatar	48 k€	2	3 k€	1	451 k€	107
Russie	369 k€	32 294	344 k€	34 035	414 k€	14 758
Japon	21 k€	105	283 k€	581	380 k€	3 549
Australie	75 k€	3 677	242 k€	36 009	310 k€	2 411
Chypre	43 k€	113	1 k€	42	307 k€	587
Argentine	27 k€	15	8 k€	14	297 k€	432
Finlande	128 k€	1 875	103 k€	1 730	281 k€	4 255
EAU	93 k€	5 114	351 k€	8 061	268 k€	758
Singapour	125 k€	28 049	305 k€	1 088	228 k€	16 097
Hong-Kong	127 k€	121 134	194 k€	2 667	219 k€	1 233
Nouvelle-Zélande	314 k€	12 040	167 k€	4 636	196 k€	1 450
Turquie	130 k€	6 448	360 k€	2 187	149 k€	1 786
Kazakhstan	131 k€	6	15 k€	100	95 k€	320
Angola	387 k€	2 240	1 138 k€	15 455	32 k€	81
Israël	55 k€	3	571 k€	25	5 k€	96
Mali	0 k€	0	411 k€	95	5 k€	8
Yémen	115 k€	3	11 k€	161	3 k€	24
Autres pays	1 334 k€	67 890	1 043 k€	56 460	2 364 k€	95 485
Total	35 545 k€	779 317	49 057 k€	618 393	56 731 k€	771 690
Importations						
Japon	5 843 k€	261 690	25 811 k€	378 133	62 764 k€	328 588
Chine	21 401 k€	2 777 559	20 174 k€	2 093 209	27 186 k€	1 701 947
USA	2 175 k€	20 056	15 947 k€	25 913	23 143 k€	31 319
Corée du Sud	3 908 k€	443 943	4 551 k€	390 789	14 260 k€	2 205 384
Canada	68 k€	3 200	138 k€	8 785	12 212 k€	24 887
Suisse	292 k€	17 641	680 k€	15 223	4 728 k€	35 241
Pays-Bas	2 511 k€	50 149	5 838 k€	86 457	4 209 k€	92 815
Allemagne	1 959 k€	137 572	1 922 k€	108 094	2 448 k€	203 960
Royaume-Uni	670 k€	13 039	845 k€	54 171	1 609 k€	94 619
Taiwan	1 637 k€	133 133	1 967 k€	103 981	1 390 k€	79 409
Irlande	3 246 k€	43 520	846 k€	10 711	1 015 k€	10 437
Malaysia	895 k€	20 690	1 082 k€	34 948	1 002 k€	27 047
Pologne	368 k€	7 049	430 k€	7 888	450 k€	10 550
Pays NDA* tiers	224 k€	7 294	1 146 k€	42 595	437 k€	11 883
Indonésie	1 458 k€	104 109	75 k€	11 715	119 k€	23 087
Autres pays	1 746 k€	156 606	2 519 k€	297 347	4 056 k€	139 215
Total	48 401 k€	4 197 250	83 971 k€	3 669 959	161 028 k€	5 020 388
Déficit	-12 856 k€	-3 417 933	-34 914 k€	-3 051 566	-104 297 k€	-4 248 698

Tableau 26 - Statistiques françaises d'import-export d'accumulateurs au lithium. Données CAF-FAB hors matériel militaire. Quantités en nombre de pièces. Source: Douanes françaises.

	2009		2010		2011	
	Valeur	Quantité	Valeur	Quantité	Valeur	Quantité
85065010 - Piles et batteries de piles cylindriques au lithium (sauf hors d'usage)						
Exportations						
USA	9 603 k€	4 077 616	11 119 k€	3 982 572	10 994 k€	3 040 402
Allemagne	8 444 k€	3 621 271	11 525 k€	4 943 667	10 354 k€	3 661 067
Norvège	700 k€	152 969	1 566 k€	218 173	3 045 k€	205 860
Pologne	2 037 k€	611 493	2 643 k€	928 718	2 683 k€	854 604
Italie	2 135 k€	601 596	2 259 k€	742 128	2 544 k€	805 371
Royaume-Uni	3 225 k€	1 996 992	1 914 k€	591 710	2 282 k€	625 101
Hong-Kong	1 262 k€	696 924	2 112 k€	869 039	2 057 k€	2 052 060
Espagne	1 410 k€	411 732	1 538 k€	492 263	1 772 k€	718 975
Singapour	191 k€	59 926	481 k€	155 925	1 247 k€	267 558
Canada	304 k€	576	860 k€	2 339	1 144 k€	6 726
Suède	619 k€	253 842	894 k€	319 156	1 013 k€	215 688
Danemark	129 k€	37 631	103 k€	28 553	645 k€	124 935
Pays-Bas	510 k€	187 553	769 k€	295 282	634 k€	219 439
Finlande	366 k€	69 845	420 k€	102 436	574 k€	116 419
Belgique	575 k€	355 808	716 k€	627 846	566 k€	396 943
Japon	315 k€	80 511	615 k€	128 086	517 k€	139 830
Lituanie	292 k€	62 299	280 k€	44 866	471 k€	79 295
Russie	149 k€	11 461	575 k€	97 365	461 k€	121 681
Inde	4 k€	1 205	39 k€	4 835	421 k€	31 995
Australie	162 k€	109 267	149 k€	44 960	372 k€	44 529
Afrique du Sud	72 k€	25 700	85 k€	16 203	272 k€	106 769
Autriche	241 k€	54 287	236 k€	59 441	253 k€	93 670
Chine	280 k€	419 974	248 k€	79 885	230 k€	24 882
Brésil	534 k€	44 785	97 k€	10 452	168 k€	48 881
Turquie	481 k€	16 633	34 k€	3 930	150 k€	19 304
Tchéquie	191 k€	175 035	202 k€	188 184	137 k€	125 864
Philippines	442 k€	342 750	850 k€	533 875	85 k€	64 931
Roumanie	104 k€	29 097	300 k€	123 068	53 k€	19 118
Autres pays	1 098 k€	365 294	1 316 k€	337 124	1 250 k€	440 901
Total	35 875 k€	14 874 072	43 945 k€	15 972 081	46 394 k€	14 672 798
Importations						
Allemagne	2 981 k€	2 556 384	3 855 k€	4 244 644	3 578 k€	3 502 806
Etats-Unis	2 421 k€	1 940 533	3 278 k€	2 657 117	2 467 k€	1 900 634
Japon	1 262 k€	883 038	1 128 k€	874 461	1 476 k€	1 170 072
Chine	531 k€	794 893	1 393 k€	2 893 683	1 373 k€	1 902 934
Royaume-Uni	752 k€	278 986	858 k€	303 704	1 226 k€	276 611
Israël	173 k€	29 294	298 k€	38 634	525 k€	68 305
Singapour	41 k€	73 560	405 k€	675 236	459 k€	649 783
Belgique	705 k€	612 783	477 k€	602 661	266 k€	235 927
Pologne	38 k€	10 779	204 k€	71 445	180 k€	19 475
Corée du Sud	432 k€	272 135	250 k€	130 133	146 k€	53 245
Tunisie	43 k€	8 899	31 k€	6 465	137 k€	36 382
Pays NDA tiers	182 k€	24 454	73 k€	29 624	129 k€	53 586
Retour France	386 k€	460 310	197 k€	105 841	124 k€	62 021
Pays-Bas	3 352 k€	29 803	585 k€	48 170	96 k€	21 726
Autres pays	510 k€	477 066	307 k€	188 948	370 k€	294 934
Total	13 809 k€	8 452 917	13 339 k€	12 870 766	12 552 k€	10 248 441
Excédent	22 066 k€	6 421 155	30 606 k€	3 101 315	33 842 k€	4 424 357

Tableau 27 - Statistiques françaises d'import-export de piles cylindriques au lithium. Données CAF-FAB hors matériel militaire. Quantités en nombre de pièces. Source : Douanes françaises.

	2009		2010		2011	
	Valeur	Quantité	Valeur	Quantité	Valeur	Quantité
85065090 - Piles et batteries de piles au lithium, autres que cylindriques et bouton (sauf hors d'usage)						
Exportations						
Etats-Unis	3 555 k€	50 741	5 126 k€	26 018	3 828 k€	221 897
Italie	1 904 k€	248 667	2 060 k€	241 526	2 625 k€	694 002
Corée du Sud	1 156 k€	2 156	915 k€	14 643	2 118 k€	72 911
Allemagne	1 314 k€	205 082	1 582 k€	375 921	1 372 k€	459 331
Royaume-Uni	634 k€	46 197	1 123 k€	53 662	1 017 k€	153 878
Espagne	1 089 k€	28 824	505 k€	19 498	715 k€	27 208
Mexique	828 k€	426	1 043 k€	6 954	703 k€	9 569
Pays-Bas	199 k€	14 511	629 k€	72 855	666 k€	67 968
Algérie	74 k€	69	67 k€	2 065	535 k€	359
Singapour	398 k€	976	54 k€	798	417 k€	1 017
Chine	50 k€	1 100	37 k€	7 730	328 k€	71 298
Suède	443 k€	105 348	498 k€	141 119	311 k€	85 973
Suisse	156 k€	7 999	227 k€	33 740	309 k€	67 881
Turquie	106 k€	3 305	240 k€	11 091	226 k€	753
Belgique	101 k€	29 015	113 k€	26 947	142 k€	3 500
Canada	86 k€	188	334 k€	46 744	101 k€	1 517
Arabie Saoudite	108 k€	436	462 k€	1 010	95 k€	763
Pologne	14 k€	2 184	23 k€	13 248	94 k€	17 462
Japon	107 k€	1 576	131 k€	1 313	73 k€	380
Brésil	51 k€	103	72 k€	200	47 k€	204
Malaysie	66 k€	126	2 k€	18	34 k€	17
Tchèque	65 k€	1 455	30 k€	956	15 k€	128
Nigéria	3 242 k€	1 124	5 k€	30	5 k€	66
Qatar	409 k€	1 700	0 k€	0	2 k€	1
Argentine	15 k€	24	69 k€	36	1 k€	1
Togo	181 k€	45	7 k€	14	1 k€	1
Ouganda	128 k€	330	4 k€	3	0 k€	0
Autres pays	702 k€	39 170	590 k€	48 530	656 k€	166 081
Total	17 181 k€	792 877	15 948 k€	1 146 669	16 436 k€	2 124 166
Importations						
Total	12 306 k€	6 275 930	13 086 k€	2 135 037	20 715 k€	2 378 383
Corée du Sud	191 k€	233 421	3 088 k€	160 214	4 791 k€	231 426
Italie	107 k€	7 173	2 k€	49	3 671 k€	445
Etats-Unis d'Amérique	3 814 k€	253 647	2 685 k€	133 830	2 960 k€	131 924
Chine	2 181 k€	504 225	2 126 k€	817 171	2 447 k€	783 707
Canada	54 k€	223	98 k€	1 149	1 063 k€	2 130
Hong-Kong	72 k€	23 366	42 k€	11 571	994 k€	74 816
Royaume-Uni	1 131 k€	4 357 586	208 k€	6 731	990 k€	84 465
Allemagne	503 k€	90 075	867 k€	79 845	929 k€	68 765
Malaysie	179 k€	165 021	680 k€	562 789	619 k€	478 474
Japon	1 337 k€	15 146	1 250 k€	107 909	578 k€	64 061
Pays-Bas	18 k€	1 073	304 k€	13 527	502 k€	19 563
Espagne	14 k€	8 937	4 k€	227	301 k€	45 648
Suisse	205 k€	220 755	248 k€	29 576	244 k€	121 468
Taiwan	216 k€	46 082	646 k€	85 398	79 k€	21 003
Belgique	160 k€	65 340	86 k€	59 416	62 k€	12 281
Israël	543 k€	1 890	385 k€	1 504	32 k€	1 307
Norvège	109 k€	685	8 k€	353	24 k€	544
Irlande	1 021 k€	12 263	24 k€	1 234	15 k€	876
Hongrie	142 k€	6 000	2 k€	61	1 k€	33
Autres pays	309 k€	263 022	333 k€	62 483	413 k€	235 447
Total	12 306 k€	6 275 930	13 086 k€	2 135 037	20 715 k€	2 378 383
Excédent/Déficit	4 875 k€	-5 483 053	2 862 k€	-988 368	-4 279 k€	-254 217

Tableau 28 - Statistiques françaises d'import-export de piles au lithium, autres que cylindriques et bouton. Données CAF-FAB hors matériel militaire. Quantités en nombre de pièces. Source : Douanes françaises.

	2009		2010		2011	
	Valeur	Quantité	Valeur	Quantité	Valeur	Quantité
85065030 - Piles et batteries de piles bouton au lithium (sauf hors d'usage)						
Exportations						
Belgique	2 577 k€	12 924 414	2 570 k€	14 941 946	2 720 k€	16 882 616
Espagne	108 k€	236 737	153 k€	339 143	177 k€	405 040
Italie	133 k€	540 801	168 k€	842 063	177 k€	720 557
Allemagne	116 k€	230 407	188 k€	281 833	165 k€	245 253
Royaume-Uni	80 k€	159 542	114 k€	199 784	154 k€	221 744
Etats-Unis	16 k€	21 017	35 k€	4 485	64 k€	9 927
Singapour	48 k€	409	45 k€	1 262	42 k€	5 789
Tchéquie	0 k€	253	23 k€	42 491	41 k€	80 657
Pays-Bas	25 k€	45 850	22 k€	47 346	34 k€	54 854
Suisse	36 k€	133 417	20 k€	8 560	30 k€	12 132
Venezuela	0 k€	0	4 k€	3 000	23 k€	25 850
Finlande	1 k€	2 552	1 k€	2 653	20 k€	37 736
Suède	10 k€	16 893	10 k€	24 745	18 k€	82 946
Autres pays	69 k€	86 980	126 k€	180 661	185 k€	251 967
Total	3 219 k€	14 399 272	3 479 k€	16 919 972	3 850 k€	19 037 068
Importations						
Japon	1 617 k€	4 119 152	5 645 k€	13 479 500	2 850 k€	7 315 052
Indonésie	1 805 k€	8 038 892	1 822 k€	9 118 385	1 810 k€	9 011 033
Chine	708 k€	3 487 782	617 k€	3 946 271	715 k€	3 856 099
Corée du Sud	403 k€	1 036 637	727 k€	1 013 026	567 k€	604 849
Allemagne	387 k€	1 032 767	604 k€	1 880 560	511 k€	1 362 346
Suisse	305 k€	790 034	131 k€	364 692	204 k€	547 707
Pays-Bas	350 k€	765 576	139 k€	584 591	184 k€	937 458
Etats-Unis	162 k€	431 806	154 k€	283 675	173 k€	355 740
Belgique	956 k€	1 762 931	369 k€	652 645	119 k€	331 638
Autres pays	135 k€	307 097	237 k€	791 457	222 k€	712 465
Total	6 828 k€	21 772 674	10 445 k€	32 114 802	7 355 k€	25 034 387
Déficit	-3 609 k€	-7 373 402	-6 966 k€	-15 194 830	-3 505 k€	-5 997 319
Cumul des piles au lithium (cylindriques, bouton et autres, sauf hors d'usage)						
Excédent/Déficit	23 332 k€	-6 435 300	26 502 k€	-13 081 883	26 058 k€	-1 827 179
Cumul des accumulateurs et piles au lithium (sauf hors d'usage)						
Excédent/Déficit	10 476 k€	-9 853 233	-8 412 k€	-16 133 449	-78 239 k€	-6 075 877

Tableau 29 - Statistiques françaises d'import-export de piles bouton au lithium, et résultats cumulés toutes piles lithium et piles + batteries rechargeables. Données CAF-FAB hors matériel militaire. Quantités en nombre de pièces. Source : Douanes françaises.

8. Criticité

La criticité du lithium est résumée comme suit (fig. 51)

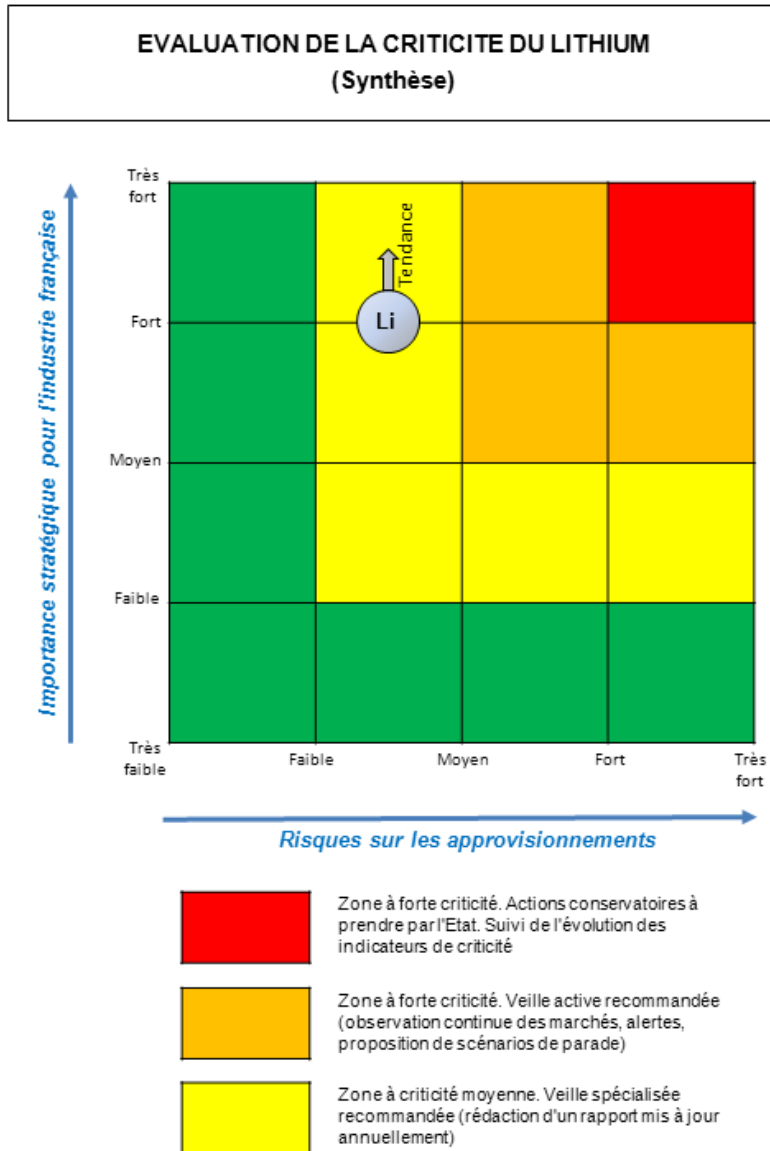


Figure 51 - Synthèse de la criticité du lithium

9. Bibliographie

Ad-Hoc Working Group of the European Commission (2010) - Critical raw materials for the E. Commission Européenne, DG Entreprises (Bruxelles, Belgique). <http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/>

Anderson E.R. (2011) - Long Range Supply-Demand Forecast for Global Lithium 2020, TRU Group Inc, 3rd Lithium Supply & Market Conference, Toronto, 2011 and Buenos Aires, 2012.

Anderson E.R. (2011) - Shocking future battering the lithium industry through 2020. www.trugroup.com

Aubert G. (1963) - Le Lithium. Bulletin BRGM n°2.

Avril S. (2010) - Le triangle du lithium : Vers un nouvel Eldorado, <http://energie.lexpansion.com/prospective>.

Azaroual M. & Lassin A. (2001) – Étude du traçage chimique dans le réservoir géothermique Roches Chaudes Sèches de Soultz-Sous-Forêts (Alsace, France). Rapport BRGM BRGM/RP-50883-FR.

Baylis R. (2012) - Vehicle electrification and other lithium end-uses: How big and how quickly? .Roskill presentation to the 4th Lithium Supply & Markets Conference, Buenos Aires, Argentina, 23-25th January 2012.

Berthaud S. et al. (2000) - Lithium Carbonate, International Program on Chemical Safety Poisons Information, Monograph 309 Pharmaceutical, www.inchem.org/documents/pim/pharm/pim309f.htm.

Blanchard P., Da Silva F., Dupont J., Fautrat G., Halopeau B., Lesieur S., Lkhaoua P. et Pesesse E. (2010) - "analyse stratégique de gestion des matières premières critiques pour la France : État des lieux et analyse" Le réseau d'experts en intelligence économique, AEGE.

Broustet B. (2011) - SAFT : Des soucis pour Nersac, <http://www.sudouest.fr/2011/09/08/saft-des-soucis-pour-nersac-493007-1021.php>

Buchmann I. (2001) - Est-ce que les batteries au Lithium-Ion alimenteront le nouveau millénaire ?, Batteries in a Portable World, www.buchmann.ca/article5-page1-french.asp.

Carlton D.E. et Perlof J.M. (2000) - Modern Industrial Organization, Addison Wesley, Reading, Mass, 3rd ed.

Chatenet F.X. (2008) – Historique de l'exploitation des pegmatites des Monts d'Ambazac, *in* Les minéraux des pegmatites des Monts d'Ambazac (Haute-Vienne). Le Règne Minéral, Hors-Série XIV, Éditions du Piat, Saint-Julien-du-Pinet.

Commission Européenne (2008) - Initiative Matières Premières - Répondre à nos besoins fondamentaux pour assurer la croissance et créer des emplois en Europe.

Commission Géologique des USA (2011) - Résumé par produit minéral.

Cyclope (2011) - Les marchés mondiaux Le printemps des peuples et la malédiction des matières premières, *Economica*.

Davis A. (2011) - Office of Intelligence and Counterintelligence, DOE, USA.

Ebensperger A., Maxwell P. et Moscoso C. (2005) - The Lithium Industry: Its Recent Evolution and Future Prospects, *Resources Policy*, Vol. 30, Issue 3, p. 218-231.

Erdman L. et Graedl T.E. (2011) - Criticality of Non-Fuel Minerals: A Review of Major Approaches and Analyses, *Environmental Science & Technology*.

Evans K.R. (2009) - Lithium Resources: Are they Adequate? Symposium Speech Final, Lithium Mining.

Evans K.R. (2008) - An Abundance of Lithium, Open Access Article, World Lithium Reserve, San Diego, CA Blogger, www.lithiumabundance.blogspot.com.

Evans K.R. (2008) - An Abundance of Lithium – Part Two, Open Access Article, World Lithium Reserve, San Diego, CA Blogger, www.lithiumabundance.blogspot.com.

Gains L. et Nelson P. (2010) - Lithium-Ion Battery: Possible Materials Issues, Argonne National Laboratory, Argonne IL.

Garret D.E. (2004) - Handbook of Lithium and Natural Calcium Chloride, *Elsevier Academic Press*.

Grosjean C., Herrera Miranda P., Perrin M. et Poggi P. (2011) - Assessment of world lithium resources and consequences of their geographic distribution on the expected development of the electric vehicle industry. Elsevier. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 106 (2012), p.1735-1744.

Gruber P.W., Medina P.A. (2010) - Global lithium availability, a constraint for electric vehicles? (2011). A practicum submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (Natural Resources and Environment) at the University of Michigan.

Gruber P.W., Medina P.A., Keoleian G.A., Kesler S.E., Everson M.P. et Wallington T.J. (2011) - Global lithium availability, a constraint for electric vehicles? *Journal of Industrial Ecology*, Yale University.

De Guibert A. (2010) - Les matériaux dans les batteries aujourd'hui et demain. Présentation de Saft au Panorama IFP 2010 du 28 janvier 2010.

www.ifpenergiesnouvelles.fr/actualites/evenements/nous-organisons/panorama-2010

Grès M. (1979) - Mémento Substances Utiles (matériaux de carrières). Le Lithium. Rapport BRGM 79-SGN-164-MTX..

Guyau L. (2008) - Les marchés de matières premières : Évolution récente des prix et conséquences sur la conjoncture économique et sociale", Avis et rapport du Conseil Économique et Social, République Française.

Haber S. (2008) - Chemetall The Lithium Company, www.chemetalllithium.com.

Hewett D.F. (1929) - Cycles in Metal Production, in Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, Yearbook, p. 65-98.

Hocquard C. (2009) - Économie du Lithium, Quels enjeux ? Rapport BRGM/RP-57536-FR.

Industrial Minerals (2011) - Lithium reality Check. www.indmin.com.

Jaskula B.W. (2010) - Mineral Commodity Summary, Lithium. USGS.

Jaskula B.W. (2011) - Mineral Commodity Summary, Lithium. USGS.

Jaskula B.W. (2011) - Lithium. USGS Mineral Yearbook 2010.

Jébrak M. et Marcoux E. (2008) - Géologie des ressources minérales. *Société de l'Industrie Minérale*. 667 p.

Kaneko S. et Takahashi W. (1989) - Adsorption of lithium in sea water on alumina magnesia mixed-oxide gels. Elsevier. *Colloids and Surfaces*, 47 (1990) pp.69-79

Kaufmann D., Kraay A. et Mastruzzi M. (2011) - "Worldwide Governance Indicators", <http://info.worldbank.org/governance/wgi>.

Kezao C. et Bowler J.M. (1985) - Late Pleistocene evolution of salt lakes in the Qaidam Basin, Qinghai Province, China. Elsevier. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 54 (1986), pp. 97-104.

Kremer M. (1958) – Le lithium. Commissariat à l'Énergie Atomique, Département de Chimie, Rapport n°139.

Kushnir D., Sandén B.A. (2011) - The time dimension and lithium resources constraints for electric vehicles. *Resources Policy*, in press.

Lebocey J., Chatenet F.X., Patureau J., Boisson J.M., Husson F., Meissier N., Couturie J.P., Bayle L.D. (2008) – Les minéraux des pegmatites des Monts

d'Ambazac (Haute-Vienne). Le Règne Minéral, Hors-Série XIV, Éditions du Piat, Saint-Julien-du-Pinet, 96 p, 236 phot., 28 ill., 1 tab.

Lemarchand C., Riera F. et al. (1960) – Compte-rendu technique d'activité du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (Direction de la Guyane) pour la période du 12er juillet 1959 au 31 décembre 1960.

Maire H. (2010) - Assessment of lithium resources in Latin America. Opportunities and issues for sustainable development. Background information paper. United Nations Department of Economic and Social Affairs, Meeting of Senior Expert Group (Santiago, Chili), 10-11 nov.2010.

MECON - Republica Argentina (2011) - Complejo Minero: Litio, Informe Especial. Ministerio de Economía y Finanzas Publicas, Secretaria de Política Económica y Planificación del Desarrollo, Subsecretaria de Planificación Económica. www.mecon.gov.ar/peconomica/docs/ficha_litio_dic_2011.pdf

Pauwels H., Brach M. et Fouillac C. (1995) - Study of Li⁺ adsorption onto polymeric aluminium (III) hydroxide for application in the treatment of geothermal waters. Colloids and Surfaces. A: Physicochemical and Engineering Aspects 100 (1995), pp.73-82.

Pauwels H., Fouillac C. et Fouillac A.M. (1993) - Chemistry and isotopes of deep geothermal saline fluids in the Upper Rhine Graben. Origin of compounds and water-rock interactions. Geochimica and Cosmochimica Acta, Vol.57, pp.2737-2749.

Pauwels H., Lambert M. et Genter A. (1991) - Valorisation des fluides géothermaux contenant du lithium en vue d'une production industrielle. Institut Mixte de Recherches Géothermiques / BRGM / ADEME. Rapport BRGM-IMRG n°R33547.

Renondeau H. (2004) - Évolution des propriétés tribologiques et physico-chimiques d'une graisse polyurée dans un roulement à bille de roues, Thèse École Centrale de Lyon.

Risacher F. (1984) - Origine des concentrations extrêmes en Bore et Lithium dans les saumures de l'altiplano bolivien, C.R. Ac. Sc. Paris, t. 299, Série II, n° 11 (présenté par Millot G.).

Roskill (2009) - The Economics of Lithium, 11th edition.

Schreck A.E. (1961) – Lithium, a material survey. US Bureau of Mines.

Schwartz V., Gindroz B. (2005) - Le stockage électrochimique. Ademe, Dossier Stockage de l'Énergie.

Tahil W. (2007) - The trouble with lithium. Implications of future PHEV production for lithium demand. Meridian International Research. www.meridian-int-res.com.

Tahil W. (2008) – The trouble with lithium 2. Under the microscope. Meridian International Research. www.meridian-int-res.com.

Tornow D.R., Bucholz P., Riemann A. et Wagner M. (2009) - Assessing the Long-Term Supply Risks for Mineral Raw Materials-A Combined Evaluation of Past and Future Trends, *Resources Policy*, vol. 34, p. 161-175;

UNEP (2011) - Recycling Rates of Metal: A Status Report, 2nd Report of the Global Metal Flows Working Group of UNEP.

Vine J.D. (1976) - (Collective work). Lithium Resources and Requirements by the year 2000. US Department of the interior, Geological Survey Professional Paper 1005. A collection of papers presented at a symposium held in Golden, Colorado, January 22-24, 1976.

Yaksic A.B. et Tilton J.E. (2009) - Using the Cumulative Availability Curve to Assess the Threat of Mineral Depletion: The Case of Lithium. Elsevier. *Resources Policy*, Vol. 34, p. 185-194.

Zajec O., Anquez M., Hocq J. et de Gliniasty M. (2011) – Stratégie de sécurisation des approvisionnements en matériaux critiques. Audit de perception industrielle. Graphite, lithium, tantale, tungstène, antimoine. Rapport de la CEIS, 79 p.

Sites Internet

Sites généraux sur le lithium et certains usages

- The lithium site : www.lithiumsite.com
- Le blog de la voiture électrique : www.voitureelectrique.net

Sites des sociétés minières et industriels concernés

(cités le long du texte)



**Centre scientifique et technique
Service ressources minérales**

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34