



Octobre  
2018

---

# ELECTRIFICATION DU PARC AUTOMOBILE MONDIAL ET CRITICITE DU LITHIUM A L'HORIZON 2050

---

Projet E<sup>4</sup>T

---

RAPPORT

ADEME



Agence de l'Environnement  
et de la Maîtrise de l'Energie

En partenariat avec :



## REMERCIEMENTS

*Nous tenons à remercier l'ensemble des personnes ayant participé à cette étude pour leur disponibilité et la richesse de leurs contributions.*

## CITATION DE CE RAPPORT

Hache Emmanuel, Simoën Marine, Seck Gondia Sokhna, **(2018)**. Electrification du parc automobile mondial et criticité du lithium à l'horizon 2050, 71p.

Cet ouvrage est disponible en ligne [www.ademe.fr/mediatheque](http://www.ademe.fr/mediatheque)

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME  
20, avenue du Grésillé  
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

**Numéro de contrat : 1566C0051**

**Étude réalisée par Hache Emmanuel (IFP Energies nouvelles),  
Simoën Marine (IFP Energies nouvelles), Seck Gondia Sokhna  
(IFP Energies nouvelles) pour ce projet cofinancé par l'ADEME**

**Projet de recherche coordonné par : Fabrice Le Berr (IFP  
Energies nouvelles) et Maxime Pasquier (ADEME)**

**Coordination technique - ADEME : Pasquier, Maxime**  
Direction/Service : DVT/STM



# SOMMAIRE

<b>RÉSUMÉ</b> .....	<b>5</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>6</b>
<b>1. Objectifs et méthodologie de travail</b> .....	<b>7</b>
<b>2. Introduction à la notion de criticité et au marché du lithium</b> .....	<b>7</b>
<b>2.1. La notion de matériaux stratégiques et de matériaux critiques</b> .....	<b>7</b>
<b>2.2. Le lithium, ses propriétés et ses formes</b> .....	<b>8</b>
<b>3. Organisation historique du marché du lithium</b> .....	<b>11</b>
<b>3.1. Détail des usages par secteur</b> .....	<b>11</b>
<b>3.2. Types de gisement et caractéristiques : ressources, réserves, technologies et coûts associés</b> .....	<b>14</b>
3.2.1. Les gisements et procédés d'extraction conventionnels .....	16
3.2.1.1. Les salars : réserves, ressources, technologies et coût .....	16
3.2.1.1.1. Ressources et réserves .....	16
3.2.1.1.2. Techniques de production .....	17
3.2.1.1.3. Coproduits .....	18
3.2.1.2. Les roches lithinifères .....	18
3.2.1.2.1. Ressources et réserves .....	18
3.2.1.2.2. Technique de production .....	19
3.2.1.2.3. Coproduits .....	19
3.2.2. Etude conjointe des coûts .....	19
<b>3.3. Les zones de production du lithium</b> .....	<b>21</b>
<b>3.4. Les acteurs historiques de la production de lithium</b> .....	<b>24</b>
3.4.1. Albemarle .....	25
3.4.2. SQM .....	26
3.4.3. FMC .....	26
<b>3.5. La formation des prix du lithium sur le marché</b> .....	<b>26</b>
3.5.1. La structure de prix sur le marché du lithium .....	26
3.5.2. Historique des prix .....	27
<b>4. Restructuration du marché face à la nouvelle demande de lithium dans le secteur de la mobilité</b> .....	<b>29</b>
<b>4.1. Le marché des batteries Li-ion</b> .....	<b>29</b>
<b>4.2. De la cellule à la roue</b> .....	<b>33</b>
4.2.1. Le marché de la voiture électrique .....	33
4.2.2. Producteurs de batteries et de VE .....	34
4.2.3. Facteurs majeurs influençant le déploiement du VE .....	37
4.2.4. Demande de lithium associée aux scénarios 2017 de déploiement du VE de l'AIE .....	37
<b>4.3. Les nouveaux gisements et procédés d'extraction</b> .....	<b>40</b>
4.3.1. Gisements conventionnels : nouveaux procédés de production .....	40
4.3.1.1. Salars .....	40



4.3.1.2.	Roches lithinifères .....	41
4.3.2.	Gisements non conventionnels.....	41
4.3.3.	Le recyclage des déchets : un gisement de lithium peu exploité .....	42
<b>4.4.</b>	<b>L'évolution de la structuration du marché.....</b>	<b>44</b>
4.4.1.	La montée en puissance des acteurs chinois.....	44
4.4.1.1.	Tianqi Lithium .....	45
4.4.1.2.	Jiangxi Ganfeng Lithium .....	45
4.4.2.	Les nouveaux acteurs.....	45
4.4.3.	Consolidation et partenariat.....	45
4.4.4.	L'offre future de lithium .....	46
<b>5.</b>	<b>Modélisation prospective du marché du lithium.....</b>	<b>49</b>
5.1.	<i>Modèle mondial TIAM-Transport.....</i>	<i>50</i>
5.2.	<i>Scénarios et hypothèses .....</i>	<i>52</i>
5.3.	<i>Principaux résultats issus de la modélisation du lithium au niveau mondial .....</i>	<i>54</i>
5.3.1.	Evolution du parc mondial de véhicules .....	54
5.3.2.	...Quel impact sur le marché du lithium ?.....	56
5.3.3.	...et la dimension géopolitique ?.....	57
<b>6.</b>	<b>Conclusion : quelle criticité du lithium à l'horizon 2050 ?.....</b>	<b>60</b>
6.1.	<i>Les principaux risques pouvant affecter l'offre de lithium à l'horizon 2050 .....</i>	<i>60</i>
6.1.1.	L'évolution de la structure du marché du lithium .....	60
6.1.2.	Les stratégies nationales dans le triangle du lithium .....	61
6.1.3.	Les délais de mise en production et la surestimation des capacités de production.....	63
6.1.4.	Le risque Chine.....	63
6.2.	<i>Quelle volatilité des prix du lithium à l'horizon 2050 ?.....</i>	<i>63</i>
6.3.	<i>Quelle criticité sur les autres éléments composant les batteries ?.....</i>	<i>65</i>
	<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>66</b>
	<b>Index des tableaux et figures .....</b>	<b>70</b>
	<b>Sigles et acronymes.....</b>	<b>71</b>

## RÉSUMÉ

*Dans de nombreuses régions du monde, l'électrification du secteur des transports est devenue une priorité pour répondre aux objectifs climatiques nationaux et aux problématiques locales de pollution. Avec plus de 3 millions de véhicules électrifiés particuliers en circulation, dont près de 40 % en Chine (AIE, 2018) l'électrification du parc automobile se précise fortement ces dernières années. Cette électrification pourrait toutefois avoir des conséquences importantes, notamment sur les marchés de matières premières tels que le celui du lithium, utilisé dans les batteries Li-ion.*

*Afin de mieux comprendre et appréhender les futurs risques sur ce marché, cette étude propose d'étudier les dynamiques de l'offre et la demande en lithium dans différents scénarios d'électrification mondiaux à l'horizon 2050. Les scénarios développés reposent sur des objectifs de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> liées au transport (division par 2 et par 4 par rapport au niveau de 2005) ou sur des politiques publiques liées aux véhicules électriques (interdiction des véhicules diesel et essence à partir de 2040, mise en place d'une subvention à l'achat d'un véhicule électrique). Une désagrégation détaillée de tous les différents types de motorisation existants et futurs a été considérée dans une modélisation « bottom-up » du parc automobile mondial pour une meilleure analyse de son évolution en fonction de ces scénarios contrastés.*

*Les scénarios développés dans le cadre de cette étude tendent ainsi à montrer qu'une forte pénétration du véhicule électrique au niveau mondial (jusqu'à 75% en 2050, tous véhicules confondus) pourrait engendrer une diminution marquée de la marge de sécurité d'approvisionnement en lithium (rapport entre la consommation et les réserves), pour les scénarios les plus contraignants. Néanmoins les réserves de lithium mondiales ont été multipliées par 4 entre 2005 et 2017 en réponse au déploiement massif de la technologie des batteries Li-ion (petit électronique avec batterie portable et première phase de pénétration du véhicule électrique depuis 2010). A long terme, le risque d'approvisionnement d'un point de vue géologique paraît donc limité. Toutefois, les dynamiques d'équilibre à long terme sur les marchés de matières premières nous apprennent que l'absence de criticité géologique des ressources ne permet pas d'occulter différentes formes de vulnérabilités, qu'elles soient économiques, industrielles, géopolitiques ou environnementales. Parmi elles, la compétition entre les acteurs apparaît toute relative, malgré l'entrée de nouvelles entreprises sur le marché. Dès lors, la structure industrielle de la filière tend à montrer une criticité économique possible, en raison du faible nombre d'acteurs et de leurs positionnements oligopolistiques. Les stratégies nationales, dans le triangle du lithium, restent également soumises à de fortes incertitudes entre ouverture économique et mise en place de politiques commerciales agressives. Dans les années à venir, il sera nécessaire d'observer les évolutions stratégiques de chacun de ces pays, étant donné leur part dans les réserves mondiales de lithium et leur capacité à jouer sur l'offre de production. Enfin, la politique de la Chine et de ses entreprises, sur la filière lithium, mais également sur le marché des batteries, reste un élément clé de compréhension du marché du lithium dans le futur.*



## ABSTRACT

*In many parts of the world, electrification of the transport sector has become a priority to meet national climate objectives and local pollution issues. With more than three million passenger light-duty electric vehicles in circulation, of which nearly 40% are in China (IEA, 2018), the electrification of the car fleet has progressed significantly in recent years. However, transport electrification could have significant consequences, particularly in raw material markets such as lithium, used in Li-ion batteries.*

*In order to better understand the future risks in this market, this study proposes to analyze the dynamics of lithium supply and demand under different global electrification scenarios by 2050. The scenarios developed are based on reduction targets for transport-related CO<sub>2</sub> emissions (halved and divided by 4 compared to 2005 levels) or on public policies related to electric vehicles (ban on diesel and gasoline vehicles from 2040, introduction of a subsidy for the purchase of an electric vehicle). A detailed disaggregation of all the different existing and future types of engines has been considered in the “bottom-up” model of the world vehicle fleet for a better analysis of its evolution according to these contrasting scenarios.*

*The scenarios developed in this study tend to show significant penetration of electric vehicles worldwide (up to 75% in 2050, all vehicles included) which could trigger a significant decline in the margin of lithium supply security (ratio between consumption and reserves), for the most stringent scenarios. Nevertheless, global lithium reserves increased fourfold between 2005 and 2017 in response to the massive deployment of Li-ion battery technology (small electronics with portable batteries and the first phase of electric vehicle penetration since 2010). In the long term, the risk of supply from a geological point of view therefore seems limited. However, shifts in the long-term equilibrium of the commodities markets shows that a lack of geological criticality of resources does not conceal the various types of vulnerability, whether economic, industrial, geopolitical or environmental. Among them, competition among the players seems completely relative, despite the arrival of new companies to the market. The industry’s structure tends to reveal the possibility of economic criticality, due to the low number of players and their oligopolistic positions. National strategies within the lithium triangle also remain subject to substantial uncertainty, between economic openness and implementation of aggressive trade policies. In the coming years, it will be important to observe the strategic changes in each of these countries, given their share in global lithium reserves and their capacity to affect production supply. Finally, the policy of China and its companies, in the lithium industry as well as the battery market, remains a key factor in understanding the future of the lithium market.*

# 1. Objectifs et méthodologie de travail

Cette étude a été réalisée entre janvier et décembre 2017 et vise à :

- Etablir un diagnostic sur le marché du lithium concernant les grands agrégats de consommation et de production au niveau mondial ;
- Analyser la structuration et le positionnement des acteurs sur le marché du lithium ;
- Identifier les facteurs économiques, technologiques et géopolitiques permettant de comprendre les grandes évolutions à venir sur le marché ;
- Donner une vision prospective du secteur à l'horizon 2050 et identifier la criticité possible du lithium dans un environnement marqué par une très forte progression de la pénétration du véhicule électrique (VE) au niveau mondial.

Ce rapport présente les résultats de ce travail répondant à ces quatre objectifs

## 2. Introduction à la notion de criticité et au marché du lithium

### 2.1. La notion de matériaux stratégiques et de matériaux critiques

La technologie est souvent mise en avant dans les dynamiques de transition énergétique au niveau international, mais de nombreuses incertitudes subsistent quant à la diffusion massive des innovations de décarbonation. Le coût, la vitesse d'adoption et l'acceptation des technologies par les différentes parties prenantes sont des paramètres fondamentaux pour les trajectoires de décarbonation, tout comme le sont leurs impacts sur les ressources et la volatilité des prix dans les différents scénarios de transition énergétique. Présents dans de nombreuses technologies de décarbonation, les métaux (métaux non-ferreux, terres rares et métaux critiques) sont essentiels à la transition énergétique de manière directe –comme matière première nécessaire à la technologie – ou indirecte – comme composant lié mais indépendant de la technologie tel que les batteries pour les VE. Ainsi, que ce soit pour le secteur des véhicules électriques (cobalt, lanthane, lithium, etc.), des catalyseurs ou des piles à combustible (platine, palladium, rhodium, etc.), pour le secteur éolien (néodyme, dysprosium, terbium, etc.), l'aéronautique civil (titane) ou encore le solaire photovoltaïque (cadmium, indium, gallium, etc.), l'ensemble des innovations de décarbonation est dépendant *in fine* de la disponibilité de minerais et de métaux raffinés. Or, la diffusion à grande échelle des technologies pourrait créer voire exacerber des tensions sur les marchés de ces métaux.

En effet, la plupart de ces marchés sont de petite taille par rapport aux marchés de métaux non ferreux<sup>1</sup> ; ils ne sont pas organisés, faiblement transparents et l'essentiel des transactions est réalisé de gré à gré. En outre, les métaux utilisés dans les innovations de transition énergétique sont pour nombre d'entre eux des coproduits d'activités minières. Leur extraction et leur production sont, dès lors, géologiquement et économiquement dépendants de la production des autres métaux<sup>2</sup>. Enfin, la localisation des ressources et les stratégies d'acteurs (structure industrielle, politique commerciale et d'investissement, etc.) peuvent rendre critique l'utilisation d'une matière première.

Tableau 1 : Ratio de réserves / production pour une sélection de matières premières

	1978	1995	2009	2014	2016
Cuivre	65	32	40	39	37
Pétrole	29	41	42	52,5	50,6
Minerai de fer	183	150	71	56	60
Lithium	ND	350	550	426	400
Terres rares	221	1390	744	1057	1048
Nickel	ND	45	51	33	34
Cobalt	ND	181	91	59	56

<sup>1</sup> Les marchés des métaux non ferreux (cuivre, aluminium, nickel, etc.) ont des productions de plusieurs millions de tonnes alors que les petits métaux ont des productions en tonnes, en centaines de tonnes et plus rarement en milliers de tonnes.

<sup>2</sup> Étant présents en faible teneur et en petite quantité dans les gisements, il n'est pas économiquement viable de les extraire en tant que produits principaux, mais en tant que coproduits ou sous-produits d'un métal majeur, et parfois même en tant que sous-produits d'un sous-produit. Par exemple, le gallium et le vanadium sont des sous-produits de l'aluminium. Le rhénium est un sous-produit du molybdène, lui-même coproduit du cuivre.

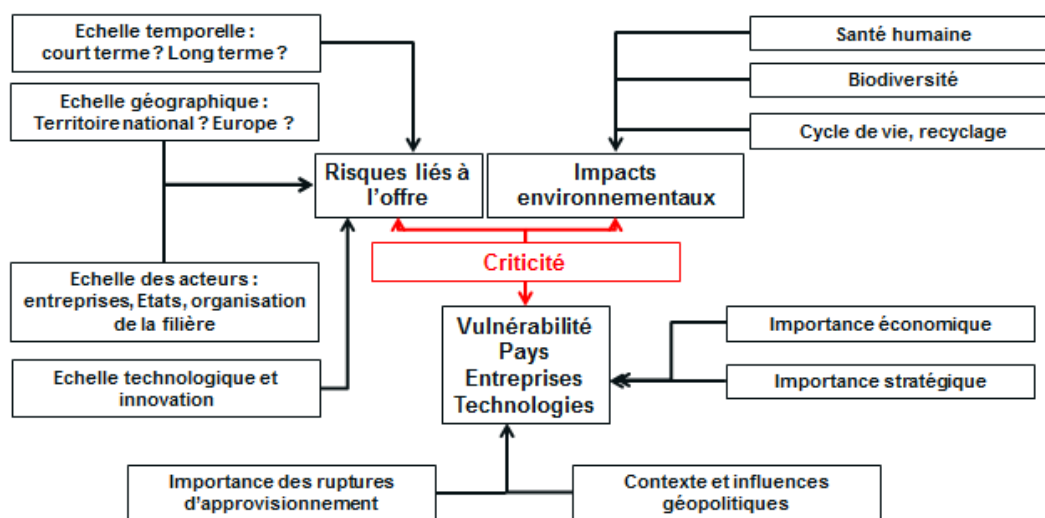


Sources : BP Statistical Review, USGS (2017)

Dans la littérature, la notion de matériaux critiques a été définie par Graedel et al. (2012) et complétée par Helbig et al. (2016) (Figure 1) :

- Le métal est utilisé dans de nombreux secteurs de l'industrie ;
- Il est difficile de trouver à court terme un substitut adéquat pour ce métal pour une ou plusieurs applications industrielles ;
- Le nombre d'applications industrielles utilisant ce métal est large et augmente au fil du temps ;
- Le métal est utilisé dans des usages dispersifs induisant un potentiel de recyclage limité ;
- Le métal a une grande valeur économique ;
- La production et les réserves de métal sont concentrées géographiquement.

Figure 1 : Les différents niveaux d'évaluation de la criticité



Source : auteurs, tiré de Helbig et al. (2016).

Le lithium, métal stratégique pour la production de batteries, est assez représentatif des nouveaux enjeux liés à la transition énergétique du fait du potentiel d'électrification des véhicules au niveau mondial, la concentration des réserves sur un nombre restreint de pays<sup>3</sup> et la structure industrielle oligopolistique de son marché. Le lithium constitue ainsi un terrain d'étude de choix pour analyser la dépendance aux matériaux dans les scénarios de transition énergétique mondiaux.

## 2.2. Le lithium, ses propriétés et ses formes

Avec une concentration moyenne de 20 ppm (ou 20 g/tonne de croûte terrestre), le lithium est le 33<sup>e</sup> élément le plus abondant sur Terre, trois fois moins présent que le cuivre et mille fois moins que le sodium ou le fer. Il est présent dans certaines argiles et dans des roches lithinifères contenant des minéraux de spodumène, de lépidolite ou de pétalite. On le trouve aussi en grande concentration dans les saumures de lacs salés fermés (salars). Dans les océans sa concentration est de 0,18 mg/L (soit 100 fois moins concentré que dans la lithosphère).

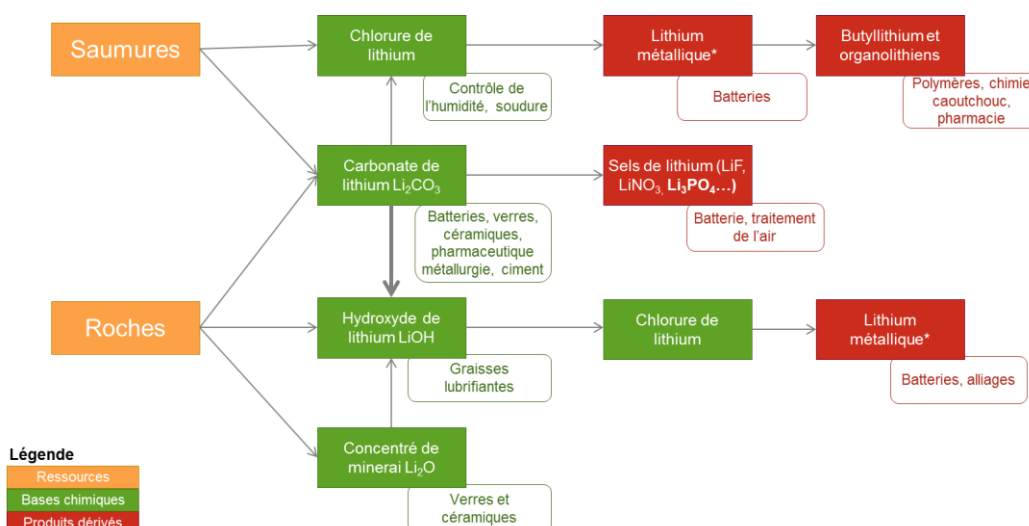
<sup>3</sup> L'Argentine, la Bolivie et le Chili forment ce que l'on appelle le triangle du lithium.



Figure 2 : Le lithium dans le tableau périodique des éléments

Le lithium est le 3<sup>e</sup> élément du tableau périodique de Mendeleïev (**Figure 2**). Il appartient à la famille des métaux alcalins, comme le sodium et le potassium. Il a le plus haut potentiel d'oxydoréduction ( $E^0(\text{Li}^+/\text{Li}) = -3,04\text{V}$ ), ce qui en fait un composant de choix pour les électrodes de batteries. Pour cette raison le lithium pur s'oxyde très rapidement à l'air humide et n'existe pas à l'état naturel. Dans l'industrie, le lithium se produit, s'échange et s'emploie sous différentes formes. Les deux composés principaux sont le carbonate de lithium ( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ) et l'hydroxyde de lithium ( $\text{LiOH}$ ) produits à partir des saumures de sels ou des roches lithinifères. Le produit le plus utilisé reste aujourd'hui le carbonate de lithium (environ 40 % de la consommation de lithium). La **Figure 3** résume les principaux composés de lithium à partir des deux principaux gisements – saumures de sel et roches lithinifères - ainsi que leurs usages finaux. Plus d'un quart du lithium extrait est directement utilisé sous sa forme minérale dans l'industrie des céramiques et du verre. L'oxyde de lithium ( $\text{Li}_2\text{O}$ ) contenu dans les minéraux est notamment utilisé dans les porcelaines et les plaques vitrocéramiques. L'hydroxyde de lithium ( $\text{LiOH}$ ), est produit à partir de saumures ou de minéraux et est utilisé dans les batteries et graisses lubrifiantes. Il représente actuellement entre 13 % et 20 % des consommations de lithium mais est en forte hausse du fait de l'essor des batteries à usage automobile<sup>4</sup>. Les volumes d'hydroxyde de lithium produits devraient dépasser ceux du carbonate de lithium dans les prochaines années (en équivalent lithium). Les autres formes de lithium, telles que le bromure de lithium, le chlorure de lithium, le butyllithium et le lithium métallique sont moins courantes (usages < 5 %) et réservées à l'industrie chimique et pharmaceutique.

Figure 3 : Organigramme des composés de lithium et leurs utilisations finales<sup>5</sup>



Source : auteurs

<sup>4</sup> L'hydroxyde de lithium pour la production du matériel cathodique est préféré car il permet de travailler à des températures plus faibles qu'avec le carbonate de lithium et donc engendre des économies d'énergie.

<sup>5</sup> Les flèches entre les produits indiquent le sens des réactions. Par exemple on peut produire de l'hydroxyde de lithium à partir de carbonate de lithium. Aujourd'hui lorsqu'on exploite un salar on passe par l'intermédiaire du carbonate de lithium pour obtenir de l'hydroxyde de lithium.

Pour faciliter les comparaisons, les études convertissent les productions des composés de lithium en tonnes de « carbonate de lithium » (t LCE) ou en tonnes de « lithium pur contenu ». Voici quelques équivalences :

- 5,3 tonnes de carbonate de lithium correspondent à 1 tonne de lithium contenu
- 2,1 tonnes d'oxyde de lithium correspondent à 1 tonne de lithium contenu

Les différentes équivalences sont répertoriées dans le tableau suivant :

**Tableau 2 - Facteurs de conversion LCE des principales molécules contenant du lithium dans l'industrie (NB : LCO, LMO, LFP, NCM, LiPF sont des matériaux de batteries)**

	Forme Moléculaire	Masse Moléculaire (g/mol)	Facteur de conversion LCE (t LCE/t)
Salar			0,6
Minerai			0,16
Carbonate de lithium (LCE)	Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	73,89	1,0000
Oxyde de lithium	Li <sub>2</sub> O	29,88	2.5
Hydroxyde de lithium	LiOH H <sub>2</sub> O	41,96	0,8805
Chlorure de lithium	LiCl	42,39	0,8715
Lithium metal	Li	6,94	5,3235
LCO	LiCoO <sub>2</sub>	97,87	0,3775
LMO	LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	180,81	0,2043
LFP	LiFePO <sub>4</sub>	157,76	0,2342
NCM	LiNi <sub>1/3</sub> Mn <sub>1/3</sub> Co <sub>1/3</sub> O <sub>2</sub>	96,46	0,3830
LiPF	LiPF <sub>6</sub>	151,91	0,2432

Source : Hao et al. (2017)

Il existe plusieurs degrés de pureté du carbonate et de l'hydroxyde de lithium. Le grade conditionne les usages et les prix, au même titre que le type d'impuretés restant dans le produit. En 2012, le carbonate de lithium de très haute pureté (99,99 %) se vendait deux fois plus cher que le grade industriel, soit 15 500 \$/t<sup>6</sup>. Le **Tableau 3** recense les grades et usages des deux principaux composés de lithium vendus.

**Tableau 3 - Grades et usages du carbonate et de l'hydroxyde de lithium**

Composé	Grade	Pureté (varient selon les producteurs)	Utilisation
<b>Carbonate de lithium</b>	Grade batterie VE	99,9 % à 99,999 %	Cathodes des batteries au lithium (poudre agglomérée) Electronique.
	Grade batterie	99,5 à 99,9 %	
	Grade technique	99,0 à 99,5 %	
	Grade industriel	<99,0 %	Verres et céramiques, métallurgie et construction, production de composés de lithium (chlorure, bromure, fluorure).
<b>Hydroxyde de lithium</b>	Grade batterie	99,0 %	Electrolytes – matériel d'électrode.
	Grade industriel	56,5 %	Graisses, piles alcalines, absorption du dioxyde de carbone, pigmentation.

Source : sites des producteurs de lithium (2016)

<sup>6</sup> Seymour Pierce research et Galaxy Resources, 2012, repris dans *The Lithium Market*, Fox Davies, 2013.

### 3. Organisation historique du marché du lithium

Historiquement, le lithium est utilisé dans les industries du verre et de la céramique, les graisses lubrifiantes ou encore pour la production d'aluminium. Avec le développement des technologies Li-ion, il a également trouvé un fort débouché dans le secteur des batteries pour le petit électronique (téléphone ou ordinateur portable notamment). Les principales réserves sont contenues dans les saumures des salars situés en Amérique du Sud (Argentine, Bolivie, Chili), tandis que les principaux utilisateurs de produits dérivés du lithium sont les Etats-Unis et les pays asiatiques (Chine, Corée du Sud et Japon).

#### 3.1. Détail des usages par secteur

La production de lithium en 2016 est estimée à 37 kt<sup>7</sup>. Le lithium est employé dans une dizaine de secteurs de l'industrie dans des proportions très variées (**Figure 4**). L'utilisation du lithium dans de nombreux secteurs industriels s'explique par ses propriétés. En effet, il a une très grande tenue à la température et il présente l'avantage d'être très léger.

Tableau 4 : Récapitulatif des différents usages du lithium et des potentiels substituts

Applications	Propriétés dues au lithium	Substitut	Performance du substitut
Piles et accumulateur (batteries primaires et secondaires)	Le lithium est utilisé comme matériel d'électrode et/ou électrolyte (Li-ion, Li-polymère, etc.)	Accumulateurs au nickel / pile plomb-acide ou au zinc	Dépend de l'application, mauvais substitut pour les applications automobiles
Verres et céramiques	Diminuer les températures de fusion, mieux contrôler les rejets de contaminants, améliorer la résistance thermique et mécanique des matériaux	Chlorure de sodium pour les verres/céramiques ; Baryum, Magnésium pour les vitrocéramiques	Très bonne pour les verres/céramiques, perte de résistance pour les vitrocéramiques
Graisses lubrifiantes	Meilleure tenue en température des graisses	Calcium, sodium	Bonne
Polymères, caoutchouc, thermoplastiques	Catalyseur de réaction	ND	ND
Traitement de l'air	Refroidissement de l'air par absorption (climatisation) et déshumidificateur	Ammoniaque	Faible et plus cher
Production de l'aluminium	Abaisser le point de fusion	Chlorure de sodium	Bonne
Coulée de l'acier	Améliorer la fluidité et la coulée de l'acier	Chlorure de sodium	Bonne
Autres (dont chimie et pharmacie)	Pharmacie : traitement des troubles bipolaires ; chimie : teintures, photographie argentique, etc.	ND	ND

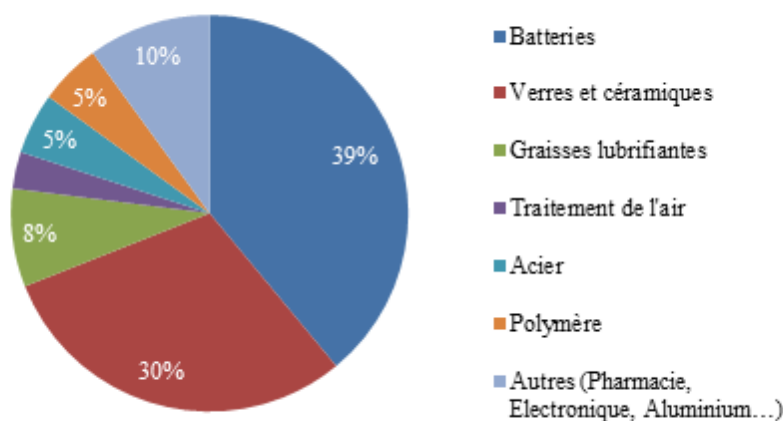
<sup>7</sup> 35kt de production selon USGS 2017 + hypothèse de 2kt pour les Etats-Unis.



Sources : auteurs, tiré de Graedel et al. (2015)

Outre le secteur des verres et céramiques (30 % de la consommation en 2016) et des graisses lubrifiantes (8 %), il est également utilisé dans les secteurs de la métallurgie (coulée de l'acier, production aluminium) ou encore comme catalyseur pour la production de polymères et de médicaments (**Tableau 4**). L'industrie du verre et de la céramique a longtemps été la plus importante consommatrice de lithium, mais la demande en petit électronique mobile (téléphone, ordinateur...) a propulsé l'industrie des batteries à la première place dès l'année 2015. Ces deux secteurs ont enregistré une hausse soutenue de leur consommation de lithium entre 2006 et 2015. Dans le même temps, la part de la consommation des graisses lubrifiantes a diminué de près de 50 %, alors que paradoxalement le lithium est difficilement substituable dans cette industrie.

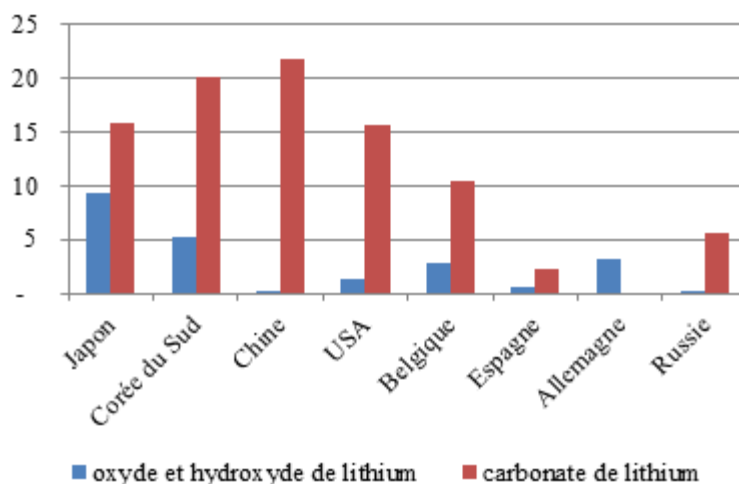
Figure 4 : Part des différents secteurs dans la consommation du lithium en 2016



Source : USGS (2017)

Les plus grands importateurs et, *in fine*, consommateurs, sont les pays les plus actifs dans le secteur de l'électronique (Chine, Corée du Sud, Etats-Unis, etc.) (**Figure 5**), ce qui tend à corroborer la hausse d'environ 20 % par an de la consommation du lithium dans le secteur des batteries ces dernières années selon l'USGS.

Figure 5 - Pays majoritairement importateurs de carbonate et d'oxyde/hydroxyde de lithium (en kt, 2016)



Source : UN Comtrade (2016)

Excepté durant la crise économique mondiale de 2007-2008, les volumes de production et de consommation de lithium ont augmenté depuis 2005, avec une intensification des flux commerciaux de carbonate et d'hydroxyde de lithium (**Figure 6** et **Figure 7**). On observe un taux de croissance positif ces dernières années pour tous les

secteurs, excepté pour celui des graisses lubrifiantes. Ces chiffres, croisés avec une étude prévisionnelle à l'horizon 2020 de Martin et al. (2017) avec les données de Dakota Minerals ou encore les travaux de Tilton (2009) nous ont permis de projeter la croissance des différents secteurs en 2030 et 2050 (**Tableau 5**).

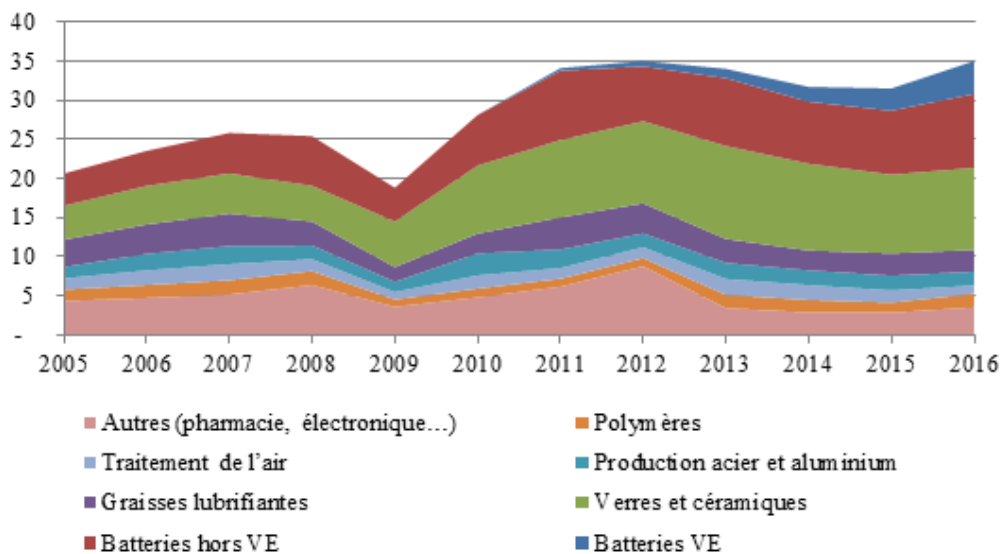
**Tableau 5 – Prévisions annuelles de croissance sectorielle à l'horizon 2050\***

Marché final	Taux de croissance annuel estimés	
	2030	2050
Batteries hors mobilité	8 %	2,5 %
Verres et céramiques	5 %	2 %
Graisses lubrifiantes	3 %	2 %
Production acier et aluminium	5 %	1 %
Polymères	3 %	0 %
Traitement de l'air	2 %	2 %
Autres (pharmacie, électronique...)	5 %	4 %

Sources : Dakota Minerals, Martin et al. (2017), USGS, auteurs (2017)

\*Les taux de croissance donnés dans ce tableau sont repris dans notre modèle prospectif (Voir Partie V).

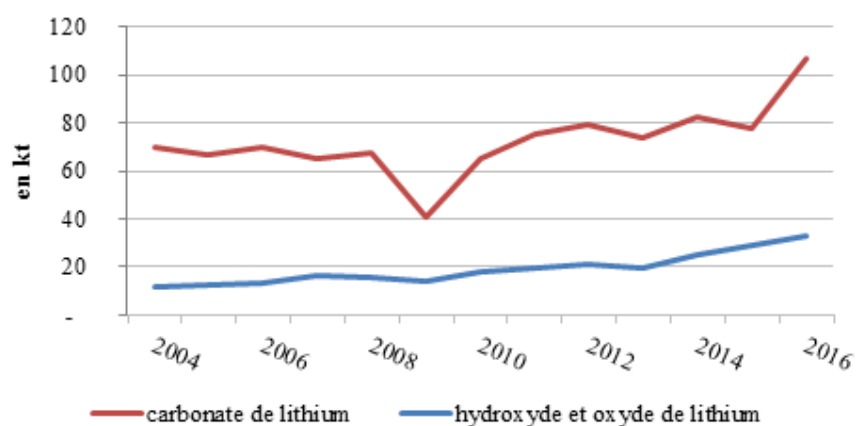
**Figure 6 : Consommation sectorielle de lithium entre 2005 et 2016, en kt Li**



Sources : USGS, AIE (2017)



Figure 7 : Evolution des exportations de composés lithium dans le monde



Source : UN Comtrade, (2016)

Dans le secteur des batteries il est pertinent de distinguer les usages traditionnels (téléphones, ordinateurs...) des nouveaux usages, dont le VE ou le stockage secondaire. Si aujourd’hui les batteries des VE représentent un tiers des usages du secteur, cette part augmenterait considérablement avec un déploiement du VE au niveau mondial. Cette nouvelle dynamique de la demande sera analysée par la suite. Pour les usages de batteries traditionnelles, on considère un taux de croissance de 8 % par an jusqu’en 2030 et de 2,5 % d’ici 2050, en se fondant sur la progression du PIB par tête à l’horizon de la prévision.

### 3.2. Types de gisement et caractéristiques : ressources, réserves, technologies et coûts associés

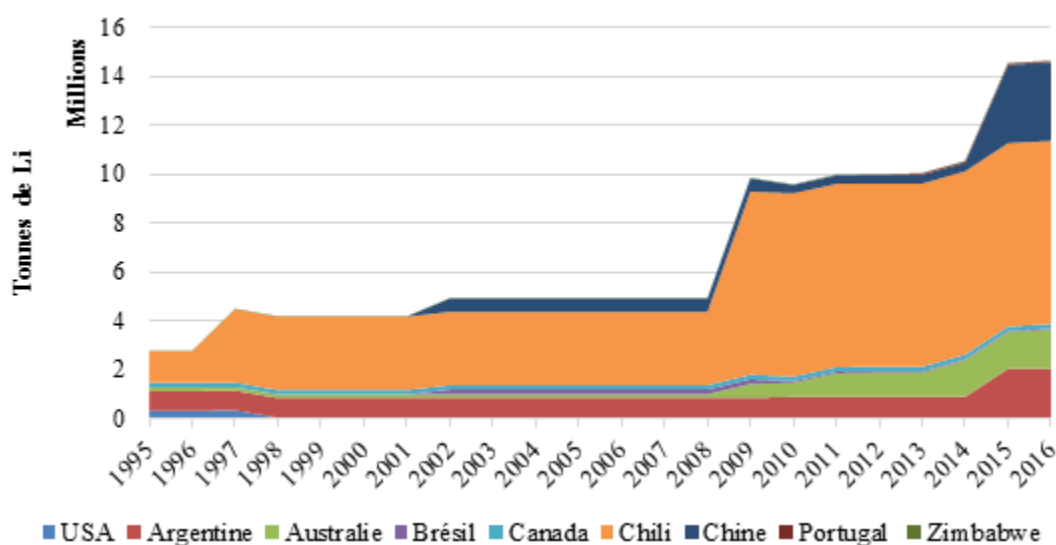
Selon l’USGS, les réserves et les ressources mondiales sont estimées respectivement à environ 14 millions de tonnes et 47 millions de tonnes. L’essentiel des ressources connues de lithium est contenu dans deux types de gisements dits « conventionnels » : les roches lithinifères (dont particulièrement le spodumène) et les saumures de salars. Historiquement, les premières productions industrielles remontent à 1923 par la firme allemande *Metallgesellschaft* qui exploitait uniquement des ressources minérales. Ce n’est que dans les années 1990, avec le début de l’exploitation des salars d’Amérique du Sud, que les saumures sont devenues une ressource conventionnelle. Plusieurs autres gisements non conventionnels de lithium ont été recensés dont l’hectorite (argile), la jadarite, les saumures géothermales et les saumures des champs pétrolifères ou encore les océans.

La forte remontée des prix du lithium depuis 2005, dans le contexte dynamique de production de batteries, a attiré de nombreuses entreprises d’exploration sur le marché. Depuis lors, le volume de ressources connues est en augmentation, comme par exemple aux Etats-Unis (de 760 kt Li en 2009 à 6,9 Mt en 2017<sup>8</sup>). En 2015 et en 2016, de nombreux nouveaux gisements ont été annoncés. Au Mexique, par exemple, un gisement d’Hectorite de 1,2 million de tonnes de lithium contenu a ainsi été découvert par la société *Bacanora Minerals*. Les réserves évoluent également, en fonction de l’évolution du coût du lithium<sup>9</sup> (Figure 8). Le Tableau 6 reprend les estimations sur les ressources nationales fournies par l’USGS en 2016. Ces estimations sont présentées par type de gisement à partir des données du BRGM ou des sites de producteurs. Certains gisements importants (découvertes de plus d’1 Mt Li annoncées par les producteurs) ont également été ajoutés.

<sup>8</sup> En 2009, l’USGS fournissait une estimation pessimiste des ressources mondiales, presque 100 fois inférieure à celle de Yaksic et Tilton (64 Mt Li). Yaksic, A. and J. Tilton. 2009. Using the cumulative availability curve to assess the threat of mineral depletion: The case of lithium. *Resources Policy* 34(4) : 185-194.

<sup>9</sup> Passage de réserves 2P (Prouvées et Probables) en 1P (Prouvées).

Figure 8 : Evolution des réserves de lithium dans le monde



Source : USGS (2017)

Tableau 6 : Répartition des ressources mondiales principales de lithium par type de gisement

Gisement		Ressources mondiales (Millions de tonnes)	Répartition par pays (USGS 2016, BRGM 2012 et annonces des producteurs)	
<b>Salars conventionnels</b>	90 % des ressources mondiales	32,7 Mt 63 %	Argentine Bolivie Chili Chine Etats-Unis	9 Mt (USGS) 9 Mt (USGS) 7,5 Mt (USGS) 5,2 Mt (auteur*) 2 Mt (auteur*)
<b>Minéraux conventionnels</b>		13,8 Mt 27 %	Etats-Unis Australie Canada Chine Afghanistan Congo Russie Brésil	4,1 Mt (auteur*) 2 Mt (USGS) 2 Mt (USGS) 1,8 Mt (auteur*) 1,5 Mt (BRGM) 1,1 Mt (USGS) 1 Mt (USGS) 0,2 Mt (USGS)
<b>Saumures géothermales</b>	10 % des ressources mondiales	0,6 Mt 1 %	Etats-Unis France	0,3 Mt Li (BRGM) 0,3 Mt Li (BRGM)
<b>Saumures des champs pétrolifères</b>		1,2 Mt 2 %	Etats-Unis Canada Russie	0,7 Mt (BRGM) 0,5 Mt (BRGM) 0,03 Mt (BRGM)
<b>Hectorite (Argile)</b>		1,9 Mt 3 %	Mexique Etats-Unis	1,2 Mt (Producteur) 0,7 Mt (producteur)
<b>Jadarite</b>		1 Mt 2 %	Serbie	1 Mt (BRGM)





<b>Autres Minéraux (Micas)</b>		1 Mt 2 %	République Tchèque	1 Mt (Producteur)
<b>Monde</b>		52,3 Mt**		
<b>Océans</b>	-	230 Mt Li (Non pris en compte)	-	

\*En considérant les ressources fournies par l'USGS, le BRGM et les sites de producteurs pour la répartition salar/mine/non conventionnel. Les données salar/mines du tableau sont les données reprises dans le modèle.

\*\*Ce qui représente un peu plus que les 47 millions considérées par l'USGS, qui ne prend notamment pas en compte l'Afghanistan ou la République Tchèque.

Sources : BRGM (2012), USGS (2017)

### 3.2.1. Les gisements et procédés d'extraction conventionnels

Au niveau de la production, l'exploitation des gisements de saumures est la source prédominante de lithium et représente environ 60 % de l'approvisionnement. Les mines d'où sont extraites les roches lithinifères représentent, pour leur part, 40 % de la production, dont une grande partie provient de la mine de Greenbushes en Australie. Le **Tableau 7** résume les principales caractéristiques et différences entre l'exploitation des saumures et des roches lithinifères.

#### 3.2.1.1. Les salars : réserves, ressources, technologies et coût

##### 3.2.1.1.1. Ressources et réserves

Les salars, ou déserts de sel, sont des lacs fermés en climat aride. Ils ont accumulé des sels généralement issus d'une activité volcanique (cendres) ou de l'érosion des reliefs environnants. Cette configuration a conduit à des concentrations élevées en minéraux (Sodium, Iode, Chlore, Lithium, Nitrate, Potassium) dans les saumures du lac. Plus de 60 % des ressources mondiales en lithium (hors océans) seraient ainsi contenues dans des salars. Le panorama 2011 du BRGM sur le lithium recense moins d'une trentaine de salars contribuant significativement aux ressources en lithium. Ils sont contrôlés par 5 pays, mais l'essentiel des ressources se situe dans le Triangle du lithium, entre l'Argentine, la Bolivie et le Chili (**Tableau 6**). Cette région concentre 25 millions de tonnes de ressources lithium dans des salars aux caractéristiques naturelles supérieures à ceux des autres régions (haute concentration en Li, fort taux d'évaporation, etc.). Si la répartition de la ressource est équilibrée entre les trois pays, la disparité des volumes de production dénote des stratégies et des conditions de production différentes.



**Tableau 7 : Principales comparaisons entre les gisements rocheux et de saumures conventionnels**

	Salars	Roches
Exploration	Simple et peu onéreux	Plus difficile et plus coûteux
Développement	Mise en production plus rapide (selon le permis)	Mise en production plus longue (selon le permis)
Production	Temps long d'évaporation (~18 mois), faible taux de récupération (< 50 %) Généralement purifié sur le site (> 99 % Li)	Vente du minerai enrichi à environ 6 % en lithium
Impact environnemental	Importante consommation d'eau Les saumures usées peuvent être réinjectées dans des formations	Perturbation du sol importante Procédé énergivore
Industrie des batteries	Préférence (pureté)	Avantage de la production directe de LiOH
CAPEX	US\$ 150-300 millions ~50/50 bassins d'évaporation/usine de carbonate de lithium Estimation* : capital de 12 000 US\$ par tonne de capacité de conversion requise	US\$ 250 millions– 2 milliards (incluant l'étape de conversion) Estimation* : capital de 16 500 US\$ par tonne de capacité de conversion requise
OPEX	US\$ 1500-2500 par tonne de LCE	US\$ 200-250 par tonne de concentré (~6 %) US\$ 3000-4500 par tonne de LCE (extraction et raffinage inclus)
Coproduits	Chlorure de potassium, bore Généré lors du processus de récupération du lithium (carbonate, hydroxyde et chlorure de lithium)	Tantale, gypse, Béryllium, Césium, Etain... (Peu rentable de manière générale) Présence de sulfate de potassium ou sodium (détergents)

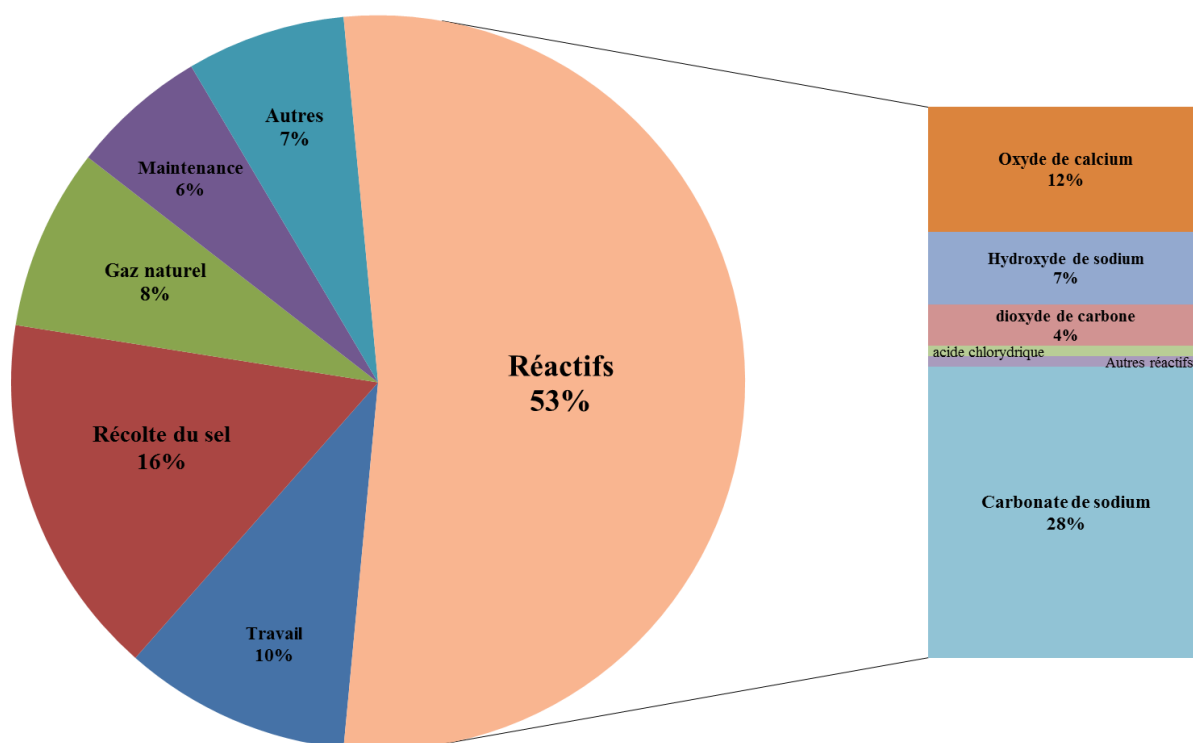
Sources : Anson Resources ltd, \*Orocobre, auteurs

### 3.2.1.1.2. Techniques de production

Le procédé de production du carbonate de lithium à partir des salars est quasiment identique dans toutes les régions. Les saumures peu profondes sont pompées dans le salar, puis elles traversent des bassins d'évaporation pendant quelques mois afin de les concentrer. Au cours de cette étape, on extrait certains coproduits comme les chlorures de sodium et de potassium pour la production d'engrais. En sortie, la saumure chargée de 4 à 6 % de lithium peut être mélangée à de la chaux ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) et/ou de la soude ( $\text{Na}_2\text{CO}_4$ ), afin de la faire précipiter en carbonate de lithium. Ce dernier peut être exporté tel quel (grade technique) ou purifié en répétant le processus (grades supérieurs). Il est ensuite possible de transformer le carbonate en hydroxyde de lithium LiOH par cristallisation. Les coûts de production, et *in fine* la rentabilité du gisement, sont très liés au grade du lithium. Plus le bassin sera riche en lithium et faible en impuretés (magnésium, calcium, etc.) et plus l'exploitation sera rentable. Les facteurs météorologiques sont essentiels (l'étape d'évaporation est très sensible à l'ensoleillement).



Figure 9 : Décomposition du coût de production du carbonate de lithium à partir de saumures



Sources : Tim Johnston, Hatch (2014)

### 3.2.1.1.3. Coproduits

Une partie des réserves de salars n'est pas exploitée. En effet, compte tenu de sa faible concentration, la production de lithium seule ne justifierait pas l'exploitation des salars. La rentabilité de leur exploitation n'est assurée que si elle conduit à la production de coproduits additionnels au lithium, qui permettent une diminution des coûts. Les coproduits du lithium, communs à la plupart des salars, sont les sels de potassium, ou potasse (sulfate de potassium, chlorure de potassium, etc.). Ils sont très largement utilisés en agriculture en tant qu'engrais universels, au même titre que l'azote et le phosphore.

### 3.2.1.2. Les roches lithinifères

#### 3.2.1.2.1. Ressources et réserves

Le second type de gisement conventionnel est constitué par les mines. On y extrait des minéraux lithinifères tels que le spodumène, la pétalite, l'amblygonite et le lépidolite. Le spodumène représente de loin la principale source de minéraux à lithium exploité. Les producteurs en extraient de l'oxyde de lithium ( $\text{Li}_2\text{O}$ ) et le vendent sous forme de concentré ou le transforment eux-mêmes en carbonate de lithium.

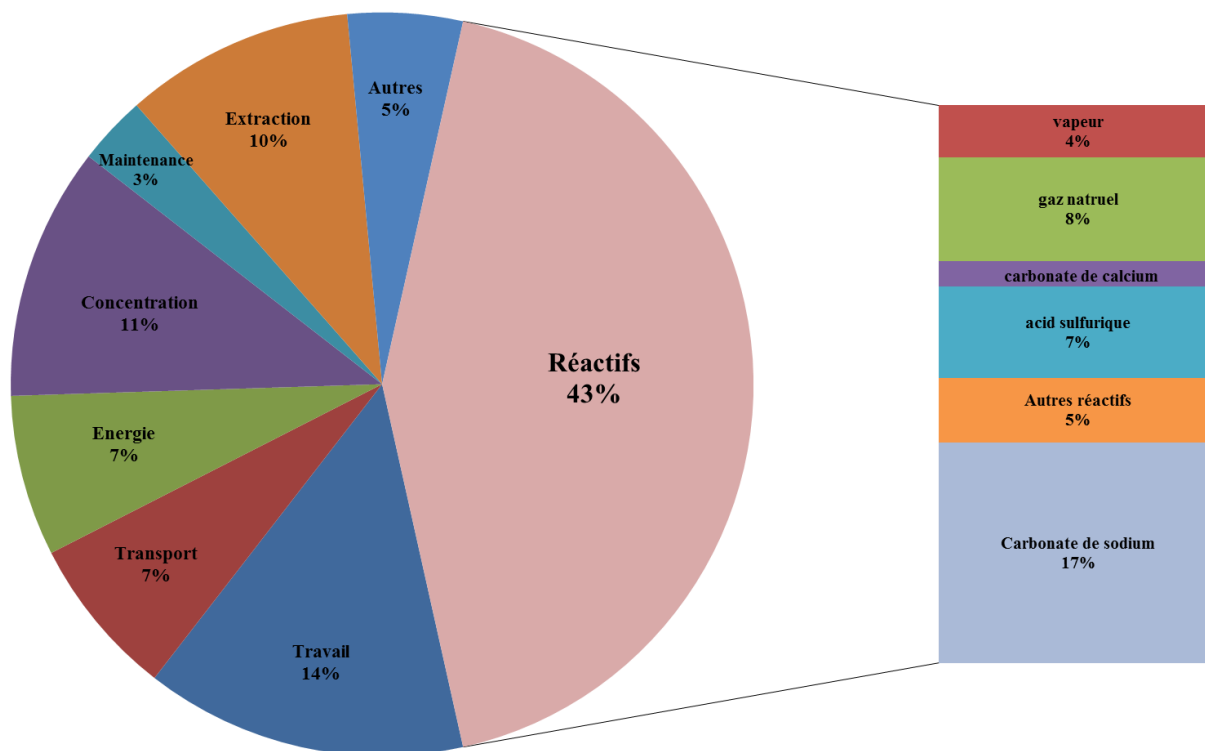
Les mines de lithium sont plus nombreuses que les salars, mais elles contiennent un volume total de ressources exploitables plus faible. L'Australie et la Chine sont dotées de ressources qui leur permettent d'assurer une production de grande ampleur. La seule mine de Greenbushes, opérée par l'australien *Talison*, lui a permis d'assurer un tiers de la production mondiale de lithium en 2014, soit 13,3 kt Li/an. Des mines sont également exploitées aux Etats-Unis mais les volumes de production ne sont pas publiés. Le Congo, l'Afghanistan et le Brésil disposent de ressources, mais ne les exploitent pas pour diverses raisons (coûts d'exploitation trop élevés, stabilité politique, etc.). La Russie et le Canada ont respectivement arrêté leur production de lithium en 1997 et 2009, toutefois plusieurs projets d'extraction sont en phase d'étude de faisabilité au Canada et la Russie a annoncé l'ouverture d'une usine de production financée par le gouvernement en 2018<sup>10</sup>.

<sup>10</sup> <http://investorintel.com/technology-metals-intel/russia-plans-to-increase-lithium-production-and-products-based-on-it-during-next-several-years/>

### 3.2.1.2.2. *Technique de production*

Une fois extraites de la mine, les roches de spodumène sont broyées, puis séparées par flottation. Après filtration, le concentré de minerai obtenu contient entre 4,3 % et 7 % d'oxyde de lithium en fonction des gisements et des techniques de production. Selon les cas le concentré de spodumène peut être raffiné sur place ou exporté tel quel. La méthode la plus répandue est le grillage<sup>11</sup> du spodumène par voie acide<sup>12</sup>. De manière générale, ce procédé d'extraction permet d'extraire entre 90 % et 92 % du lithium contenu dans les roches, mais il produit un carbonate de lithium moins pur que celui des salars (99 %). Le coût de production d'une tonne de carbonate de lithium obtenue à partir de spodumène varie de 3 à 5 k\$ par tonne, soit au moins 1 k\$ plus cher que le coût observé à partir des meilleurs salars. Le gisement rocheux de lithium est intéressant pour la production directe d'hydroxyde de lithium qui connaît une consommation croissante ces dernières années par les batteries automobiles.

**Figure 10 : Décomposition du coût de production du carbonate de lithium à partir de spodumène**



Source : Tim Johnston, Hatch (2014)

### 3.2.1.2.3. *Coproduits*

A la différence des saumures de salars, l'exploitation des roches lithinifères ne permet pas d'exploiter des coproduits aussi rentables. On retrouve du tantale et de l'étain en coproduction sur certains gisements, notamment sur la mine de Greenbushes en Australie mais dont le raffinage est opéré par d'autres compagnies que *Talison Lithium* qui exploite le gisement.

## 3.2.2. *Etude conjointe des coûts*

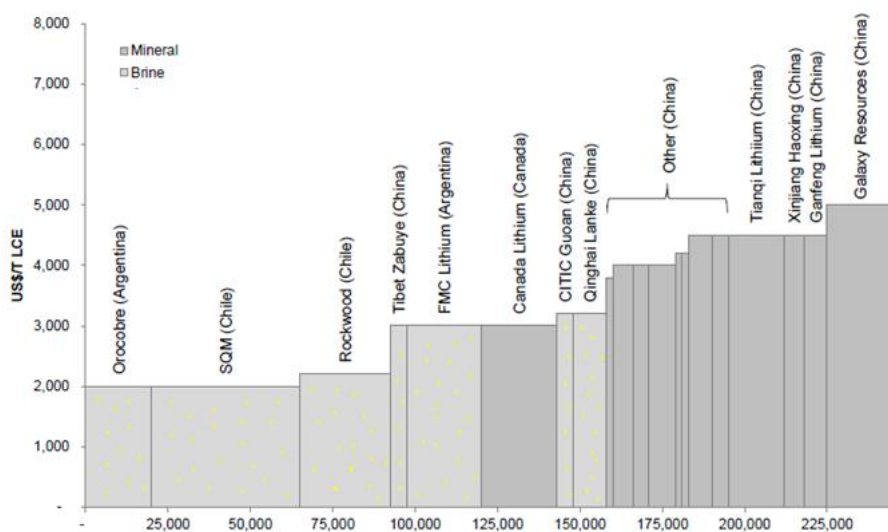
Les coûts sont majoritairement dépendants de la nature du gisement, de la teneur en lithium, des procédés d'extraction mis en œuvre et de la production de coproduits. Aujourd'hui les coûts sont donc situés entre 2000 \$/t LCE pour les gisements les plus rentables et 5 000\$/t LCE pour les plus onéreux.

<sup>11</sup> Le grillage est une chauffe à haute température en métallurgie extractive.

<sup>12</sup> Seule la technique de production de carbonate de lithium depuis le spodumène concentré est abordée car il s'agit du procédé de production dominant dans l'industrie (BRGM, 2011, p.97).



Figure 11 : Courbe des coûts de production par gisement, abscisses en kt LCE (gris clair : salars ; gris foncé : mines)

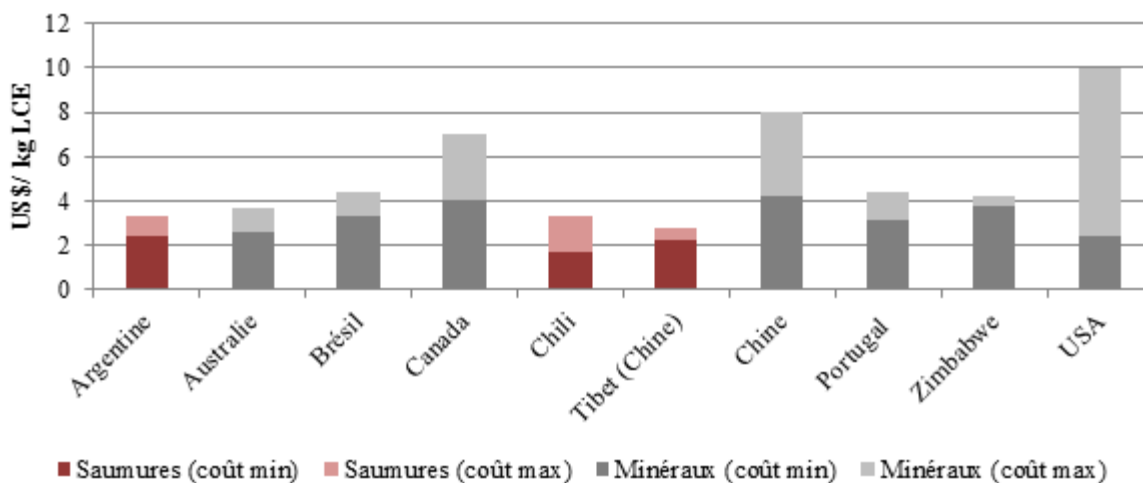


Source : estimations Roskill (2013)

Les coûts futurs d'extraction du lithium ne devraient, en toute logique pas dépasser les 10 000\$/t LCE, hors considérations environnementales ou politiques<sup>13</sup>. Cette évaluation réside sur les coûts actuels d'extraction du lithium avec les méthodes usuelles (bassins d'évaporation pour les salars et co-extraction dans les mines) et au regard des réserves connues<sup>14</sup>.

Il est également possible de raisonner par pays et non par gisement Cette méthode a été choisie ici car les plus gros gisements sont représentatifs d'une production nationale (en dehors de la Chine où sont exploités roches et salars) et cela permet d'extrapoler les coûts sur les réserves nationales qui sont connues et fournies par l'USGS (hors USA). En utilisant une fourchette haute et basse par pays, il est ainsi possible d'obtenir les coûts observés sur la Figure 12.

Figure 12 : Coûts estimés de la production de lithium par pays



Sources : Yaksic (2009), sites des producteurs, auteurs

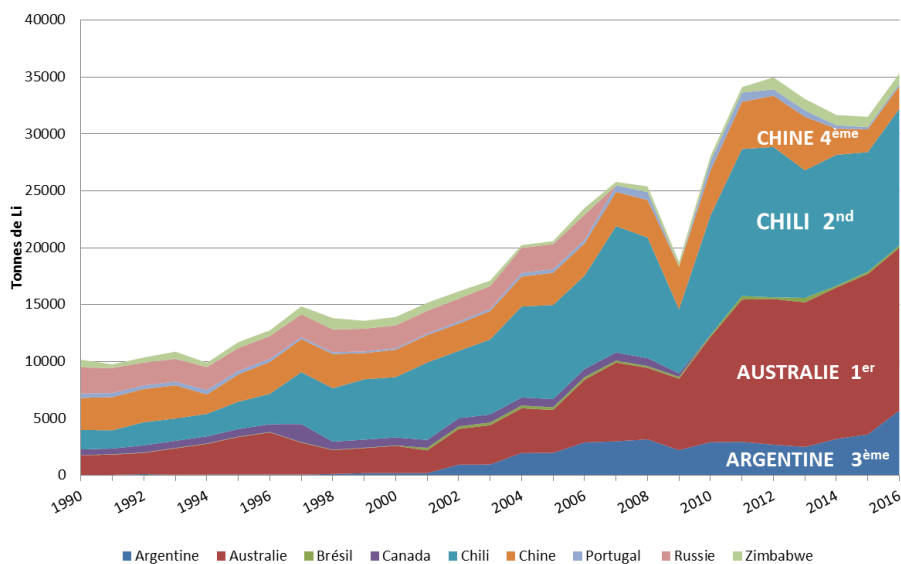
<sup>13</sup> Yaksic (2009).

<sup>14</sup> Les ordres de grandeur des coûts d'extraction des principaux gisements de roches ou des salars sont donnés par les sites des producteurs.

### 3.3. Les zones de production du lithium

La production de lithium est concentrée en Australie, au Chili, en Argentine et en Chine ; ces 4 pays représentant environ 80 % de la production mondiale en 2016 (**Figure 13** et **Figure 14**). L'Australie, premier fournisseur de la Chine a connu une évolution continue de son exploitation pour devenir rapidement la première zone de production mondiale.

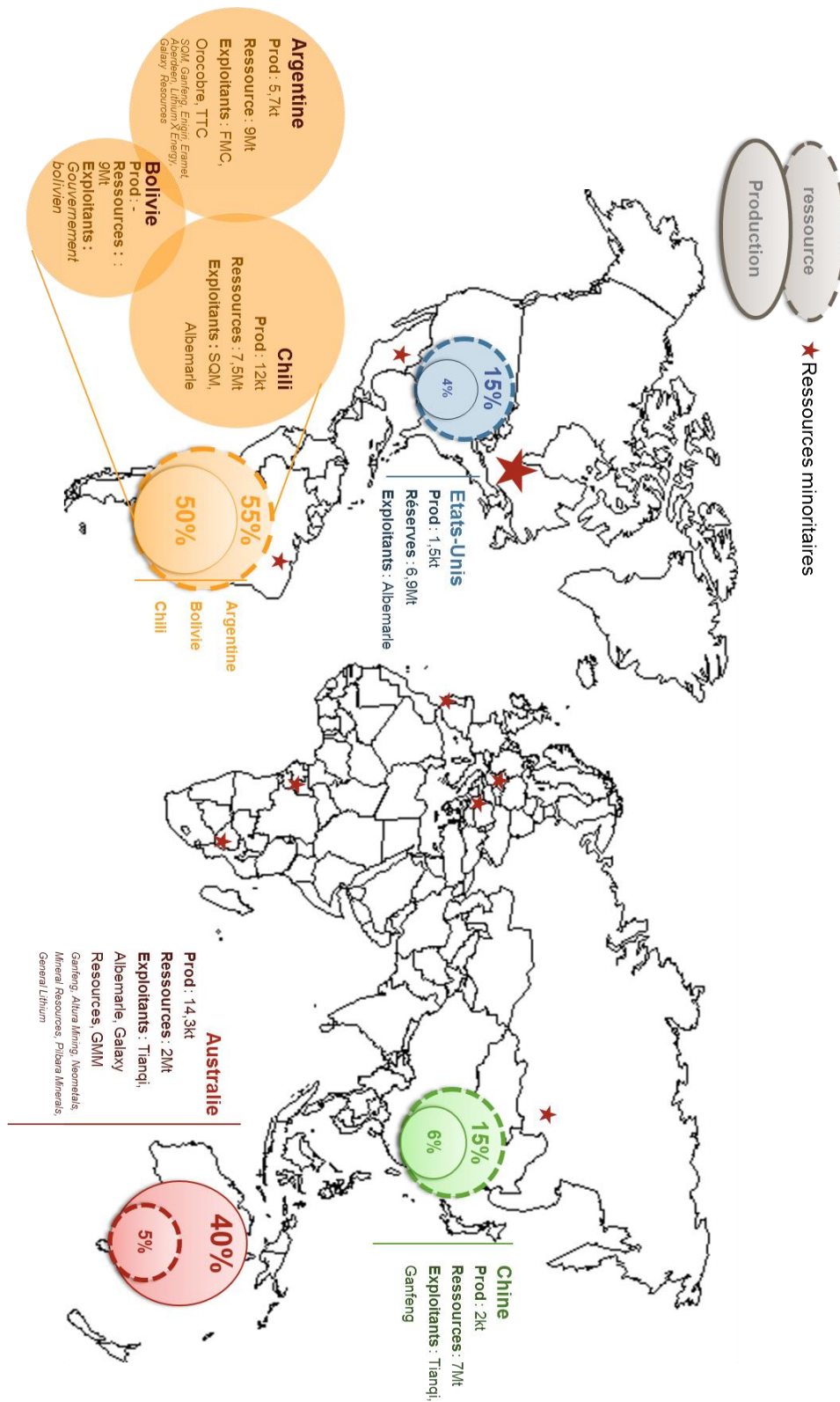
**Figure 13 : Evolution de la production de lithium dans le monde selon la localisation des gisements**



Source : USGS (2017)



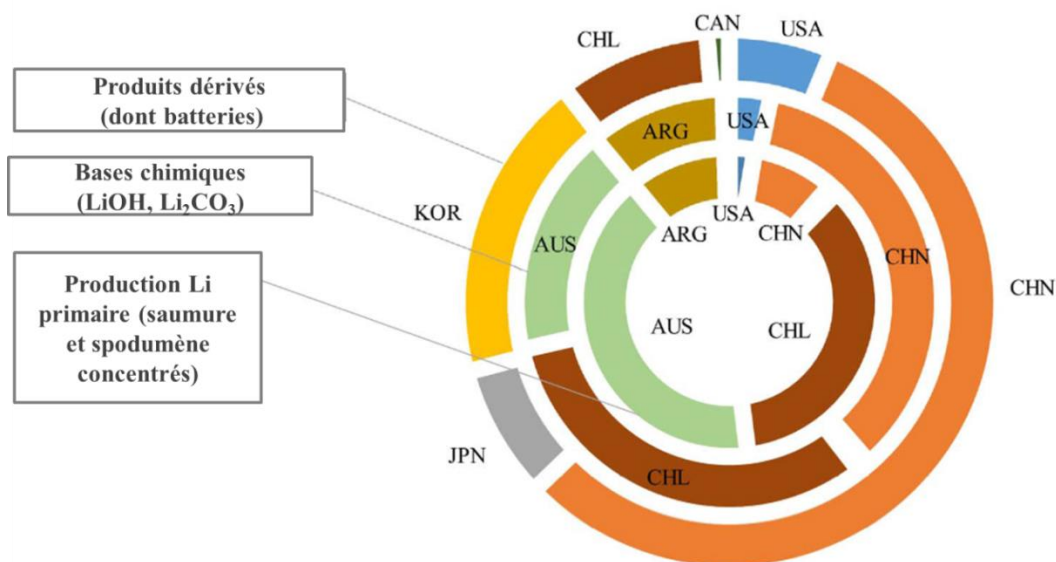
Figure 14 : Répartition des réserves (cercles en traits pointillés) et de la production (cercles en trait plein) primaire mondiale avec les principales entreprises présentes sur les sites de production actuels et les projets en cours



Sources : USGS (2017), annonces des producteurs

La géographie de la production primaire de lithium (saumure, roches) peut être différente de celles des bases chimiques (LiOH, Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>...) ou des produits utilisant des dérivés chimiques du lithium, qui nécessitent encore d'autres procédés pour leur production (cathodes au lithium par exemple). Cette question est résumée sur la **Figure 15** issue d'une étude menée en 2017 sur les flux internationaux de lithium<sup>15</sup>. L'exemple est particulièrement parlant pour l'Australie et la Chine puisque, si l'Australie est le plus gros fournisseur de lithium primaire (sous forme de spodumène concentré), les procédés de raffinage sont effectués en Chine pour produire les bases. A l'inverse le Chili exporte la très grande majorité du lithium produit sur son territoire sous forme de carbonate au lithium.

**Figure 15 : Répartition géographique de la production de lithium (salsars/roches), de bases chimiques (LiCoO<sub>2</sub>, LiOH) au lithium et de dérivés du lithium (matériel d'électrode) par pays**



Source : Hao et al. (2017)

Les pays possédant des réserves sur leur territoire ont des stratégies différentes tant au niveau des législations propres à l'extraction du lithium que sur les incitations politiques à l'exploitation et au développement des technologies basées sur le lithium. Le **Tableau 8** résume les différentes politiques des pays producteurs vis-à-vis de l'exploitation des gisements. Les différentes stratégies nationales seront abordées en détails dans le travail de modélisation présenté dans la dernière partie de cette étude.

<sup>15</sup> Tracing global lithium flow: A trade-linked material flow analysis, Resources, Conservation & Recycling, 124, (2017) 50–6.





**Tableau 8 : Données légales et financières pour l'exploitation du lithium selon les pays**

Pays	Propriété	Législation	Impôt sur le revenu	Royalties
<b>Argentine</b>	Concessible	Favorable aux investissements étrangers (>10 projets en développement)	35 %	3 %
<b>Australie</b>	Concessible	Minerai propriété de l'Etat – Le lithium est traité comme les autres minéraux	35 %	5 %
<b>Bolivie</b>	Non concessible	Le gouvernement est propriétaire des réserves de lithium– Très défavorable aux investissements étrangers	25 %	12,5 %
<b>Canada</b>	Concessible	Minerai propriété de l'Etat	16,5 %	10-16 %
<b>Chili</b>	Non concessible	Lithium considéré comme stratégique et devant être exploité par l'Etat ou via des contrats spécifiques – Seules les concessions antérieures à 1979 peuvent extraire	25 %	6,8 % pour SQM
<b>Chine</b>	-	Compagnies nationales – rôle actif du gouvernement (subventions VE)	25 %	-
<b>Etats-Unis</b>	Pas besoin de concession	Le propriétaire foncier est le propriétaire du sous-sol	15-35 %	12,5 %

Sources : SignumBox 2017, Cochilco, sites des ministères correspondants

### 3.4. Les acteurs historiques de la production de lithium

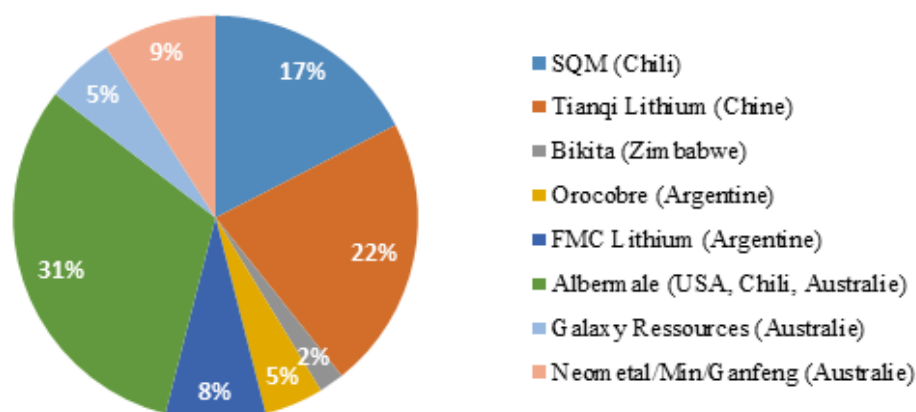
La production de lithium est contrôlée par un petit nombre d'acteurs dont les parts de marché actuelles sont représentées en **Figure 16**. L'analyse des volumes de ventes au niveau international permet de distinguer 3 groupes, selon que les acteurs considérés produisent et/ou transforment le lithium : les producteurs-transformateurs, les producteurs seuls et les transformateurs seuls. Les plus gros acteurs industriels sont des groupes du secteur de la chimie, de l'agroalimentaire (avec les engrais azotés) ou de la pharmaceutique, pour qui le lithium ne représente par ailleurs qu'une dizaine de pourcents du chiffre d'affaires<sup>16</sup>. C'est le cas des acteurs historiques américains *Albemarle* (ex-Rockwood) et *FMC*, et du chilien *SQM*. Ces sociétés extraient le lithium, puis le transforment en carbonate de haute pureté ou en composés de lithium à plus haute valeur ajoutée. Les deux compagnies chinoises majeures, *Tianqi* et *Ganfeng*, sont historiquement des transformateurs et n'ont investi que depuis récemment sur l'ensemble de la chaîne de valeur. *Tianqi* possède notamment 51 % des parts de *Talison* en Australie (le reste est détenu à 49 % par *Albemarle*). A ces entreprises s'ajoutent les compagnies d'exploration, les compagnies juniors (*Junior Mining Companies*), dont le rôle est d'identifier les gisements et d'étudier la faisabilité de leur exploitation. Si les 3 grands acteurs historiques, *FMC*, *SQM* et *Albemarle* (nommé *The Big 3*) détiennent encore aujourd'hui un peu plus de 50 % des parts du marché, les entreprises chinoises étaient, en 2016, à l'origine de près de 40 % de l'approvisionnement en lithium, dont une grande partie est consacrée à leur consommation domestique<sup>17</sup>.

<sup>16</sup> L'exploitation des salars leur permet de produire des engrais à base de potassium qui contribuent à leur activité (Rapports annuels Rockwood et SQM).

<sup>17</sup> Les acteurs chinois, tout comme les nouveaux acteurs, seront étudiés plus en détails avec l'évolution de la structure du marché depuis l'émergence des batteries Li-ion pour le secteur automobile dans la partie suivante.



Figure 16 : Parts de marché début 2017 pour la production de lithium primaire<sup>18</sup>



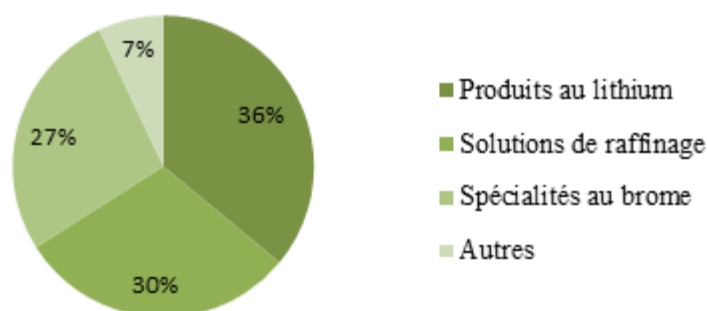
Sources : Galaxy Resources, annonces des industriels

NB : Ce graphique rend compte des sociétés qui exploitent le minerai ou le salar - ce qui explique la faible présence de Ganfeng qui est majoritairement un producteur de produits au lithium.

### 3.4.1. Albemarle

L'entreprise américaine est entrée sur le marché du lithium en 2014 avec l'achat du producteur *Rockwood*. Ce dernier avait réalisé une politique d'acquisitions d'entreprises du secteur (l'Allemand *Chemetall* qui contrôlait aussi le chilien *SCL* et 49 % de l'australien *Talison*). *Albemarle* exploite une partie du salar le plus profitable de la planète, celui d'Atacama au Chili, qui alimente son usine de La Negra (Chili), pour une production de 25 kt LCE/an<sup>19</sup>. *Albemarle* contrôle également le seul gisement actif de lithium aux Etats-Unis, au lac salé de Silver Peak (5 kt LCE de production). L'entreprise possède deux usines, l'une qui produit du carbonate de lithium à Silver Peak (5 kt LCE), et l'une qui produit de l'hydroxyde de lithium (5 kt LCE) à Kings Mountain. L'entreprise a également acquis, en 2016, l'usine de Xinyu détenu par *Jiangxi Jiangli New materials*, produisant du carbonate et de l'hydroxyde de lithium en Chine (10kt LCE). La stratégie d'*Albemarle* est très intégrée et diversifiée. L'entreprise a investi sur l'ensemble de la chaîne de valeur, de l'extraction jusqu'à la transformation et reste l'une des seules entreprises à proposer tous les produits dérivés du lithium. Sa présence sur un grand nombre de secteurs de la chimie lui permet de générer des synergies entre ses productions. Ainsi, le coût de sa production de lithium est diminué par les engrais à haute valeur ajoutée produits à partir de la potasse extraite des salars. Les ventes de lithium et de produits dérivés représentent 36 % des ventes d'*Albemarle* en 2015, soit 968 millions de dollars, sur un chiffre d'affaires total de 2,7 milliards de dollars.

Figure 17 : Volume des ventes par segments de l'entreprise Albemarle en 2016



Source : Albemarle (2017)

<sup>18</sup> Sur le marché du lithium le nombre d'acteurs industriels reste relativement restreint. En 2016 le calcul des HHI (Herfindahl Index) à partir de la Figure 16 donne un résultat autour de 2000, ce qui indique un marché très concentré donc toujours peu compétitif malgré l'entrée récente de nouveaux acteurs.

<sup>19</sup> Estimation de SignumBOX (2015).



*Albemarle* souhaite renforcer sa position de leader en augmentant progressivement la capacité de production de son usine de carbonate de lithium à La Negra (ouverture annoncée en 2017), ainsi que celle de l'usine de Xinyu qui transforme le concentré de spodumène en provenance d'Australie. De plus, l'entreprise envisage de rouvrir la mine de Kings Mountain, en Caroline du Nord, et expérimente l'extraction de lithium à partir de saumures de champs pétrolifères dans son usine pilote de Magnolia, en Arkansas. Sans compter *Talison*, l'ensemble de ces projets devraient lui garantir une capacité supplémentaire de 45 à 50 kt LCE/an dans les années à venir.

### 3.4.2. SQM

*SQM* est une entreprise minière et chimique chilienne qui exploite le Nord du salar d'Atacama. Sa production de 35 kt LCE à partir des saumures lui a assuré 22 % du marché du lithium en 2014. Ses usines ne fonctionnent cependant pas à plein régime car *SQM* annonce disposer d'une capacité de production de 48 kt LCE et 6 kt d'hydroxyde de lithium dans son usine de transformation d'Antofagasta (Atacama, Chili). Les accords avec le gouvernement chilien accordent un quota d'extraction de 180 kt Li, que *SQM* estime avoir à moitié consommé. Comme *Albemarle*, *SQM* tire profit de la potasse extraite des saumures lithinifères, afin d'alimenter sa production très variée d'engrais et est présente sur l'ensemble de la chaîne de valeur. *SQM* est le leader de la production de nitrate de potassium et d'iode. La production de lithium ne représente qu'environ 13 % de son chiffre d'affaires<sup>20</sup> (223 millions de dollars sur 1,728 milliard de dollars). Comparativement, le potassium et les engrais produits à partir du même salar représentent 38 % et 25 % du chiffre d'affaires. Les exportations de lithium de *SQM* sont principalement orientées vers l'Asie (67 %), l'Europe (21 %) et l'Amérique du Nord (11 %). *SQM* n'a annoncé qu'un seul projet d'extension de sa production : l'exploitation du salar de Cauchari-Olaroz en Argentine, en joint-venture avec *Lithium Americas* (ex-Western Lithium). L'usine devrait voir le jour cette année et produire 40 kt LCE grâce aux améliorations de rendement du procédé POSCO<sup>21</sup>.

Tableau 9 : Décomposition du chiffre d'affaire de SQM

	2013	2014	2015
Nutriments pour Plantes	31 %	35 %	38 %
Iode et Dérivés	21 %	17 %	15 %
Lithium et Dérivés	9 %	10 %	13 %
Potassium	28 %	29 %	25 %
Produits chimiques industriels	7 %	5 %	6 %
Autres	4 %	4 %	3 %

Source : Rapport annuel SQM (2015)

### 3.4.3. FMC

*FMC* est une entreprise chimique américaine spécialisée dans l'agrochimie et la pharmaceutique. Sa position sur le marché est fragilisée du fait du niveau décroissant de ses parts de marché sur le lithium (13 % en 2014), mais également du fait que *FMC* est la seule entreprise à n'avoir pas annoncé de nouveaux projets d'investissements. Elle exploite principalement le salar del Hombre Muerto en Argentine qui lui assure une production de 21 kt LCE. L'entreprise tire profit de la transformation du lithium. De plus, le coproduit de potasse et sa production propre de carbonate de sodium (soude), nécessaire à la production du lithium, lui servent également à abaisser ses coûts de production. Le lithium représente seulement 7 % de son chiffre d'affaires total (soit 200 millions de \$ sur 3,2 milliards de \$)<sup>22</sup>.

## 3.5. La formation des prix du lithium sur le marché

### 3.5.1. La structure de prix sur le marché du lithium

<sup>20</sup> Rapport Annuel SQM (2015).

<sup>21</sup> La technologie Posco (Sud-Coréen) permettrait d'exploiter les saumures en l'espace d'un mois au lieu de 2ans en augmentant les taux de récupération (de 50 à 70%). Pour cela l'extraction se ferait non plus par évaporation mais par solvant.

<sup>22</sup> Rapport Annuel FMC (2015).

Le nombre d'acteurs sur le marché du lithium est restreint et son marché spot reste peu développé à l'heure actuelle, excepté en Chine. La majorité des échanges se réalise sous forme de contrats d'approvisionnements à long terme (1 à 3 ans), mais la durée des contrats a eu tendance à diminuer ces dernières années, en raison de la volatilité du prix du lithium, entraînant l'ajout de clauses d'indexation. Désormais, les contrats d'une durée de 6 mois<sup>23</sup> sont majoritaires. L'information prix est peu accessible et il n'existe pas à l'heure actuelle de contrat financier pour le lithium. Il n'est toujours pas possible de gérer le risque de volatilité des prix<sup>24</sup> comme il existe pour l'ensemble des marchés de métaux non-ferreux au London Metal Exchange (LME). Le prix à l'achat reste très dépendant de la forme sous laquelle est disponible le lithium (carbonate, hydroxyde, chlorure), ainsi que de son grade (technique, industriel, batterie). Toutefois, face au développement du VE et dans un contexte où les prix ont connu de très fortes variations sur les années récentes, de nombreux industriels réclament la mise en place d'un contrat lithium au LME, une proposition à laquelle réfléchissent à l'heure actuelle les autorités de régulation<sup>25</sup>. L'institution londonienne avait lancé, en février 2010, un contrat sur le cobalt et sur le molybdène, coproduits du nickel et du cuivre, alors que les prix étaient extrêmement volatils. A l'échelle internationale, le marché du lithium est segmenté géographiquement entre l'Est et l'Ouest, chaque segment possédant des caractéristiques particulières. Le marché est ainsi scindé entre un marché atlantique (Europe/Etats-Unis se fournissant majoritairement en Amérique du Sud) et un marché asiatique (Chine ayant une production domestique et se fournissant majoritairement en Australie). Cette scission géographique concerne tant les productions/consommations que les prix sur les marchés. La tonne de lithium est ainsi aujourd'hui environ 1 k\$ plus chère sur le marché chinois<sup>26</sup>. De même, les prix opérés vers l'Europe sont plus élevés que ceux pratiqués aux Etats-Unis. Ceci s'explique par les plus faibles volumes à destination de ce marché et à un nombre plus faible d'entreprises consommatrices.

### 3.5.2. Historique des prix

Les prix du lithium dépendent de plusieurs facteurs au niveau microéconomique : la nature du produit (carbonate ou hydroxyde majoritairement), les grades (techniques ou supérieurs), les coûts de transports et la structure plus ou moins concurrentielle du marché. En outre, la croissance économique mondiale, la demande de mobilité et plus particulièrement la pénétration du VE sur les années récentes sont autant de facteurs déterminants dans les évolutions récentes de son prix.

Jusqu'au début des années 1990, l'approvisionnement en lithium était stable, la demande modérée et le marché du lithium représentait alors de très faibles volumes (< 5kt/an). La croissance du marché des batteries Li-ion a entraîné une demande soutenue de lithium dans un contexte où la société chilienne *SQM* a commencé, dès 1998, la production de carbonate de lithium au salar d'Atacama au Chili. La faiblesse des coûts de production dans cette zone et l'entrée de ce nouvel acteur sur le marché ont entraîné une réduction par deux des prix du lithium au niveau mondial, à environ 2000 dollars/tonne. Les prix ont ensuite triplé entre 2003 et 2007 en réponse à la forte demande chinoise en lithium pour les batteries Li-ion des applications portables (téléphone, ordinateur, etc.). Si la crise économique mondiale de 2007-2008 a provoqué un fléchissement des prix sur les marchés, ces derniers ont retrouvé, dès 2013, leur niveau d'avant crise, avant d'enregistrer un nouveau mouvement de hausse dès 2015. Le prix du carbonate de lithium a ainsi atteint 7 200 \$/t fin 2016. Dans le même temps, sur le marché spot chinois, les prix ont enregistré un pic à 22 900 \$/t en février de la même année, soit trois fois le prix observé l'année précédente à la même période.

---

<sup>23</sup> Interview d'un expert d'Asian Metal.

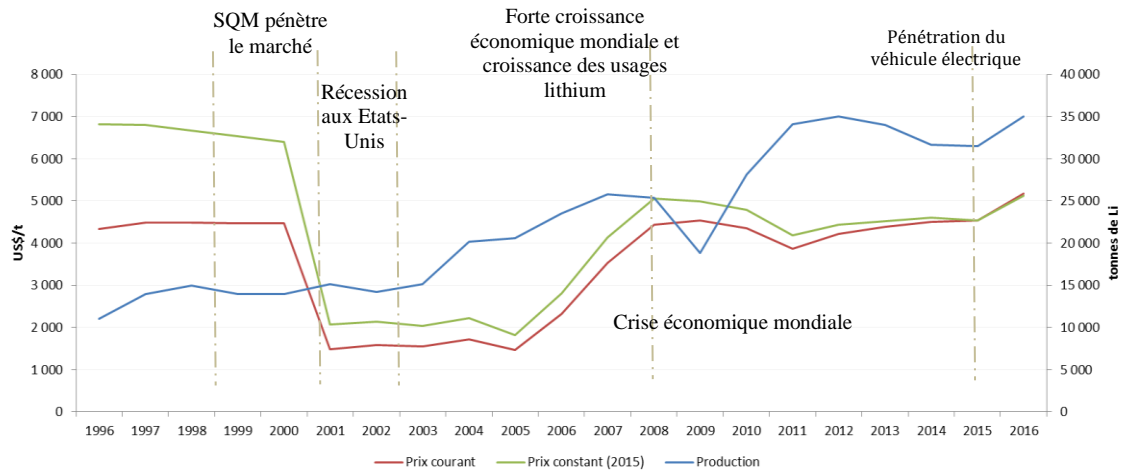
<sup>24</sup> Il existe néanmoins depuis 2010 un ETF (Global X Lithium)<sup>24</sup> sur le lithium qui permet d'investir sur tout le cycle du lithium depuis l'extraction jusqu'à la production de batterie. Celui-ci repose sur l'indice « Solactive Global Lithium Index » conçu par différentes entreprises de l'industrie du lithium à l'échelle mondiale.

<sup>25</sup> <https://www.ft.com/content/24c36964-89af-11e7-bf50-e1c239b45787>

<sup>26</sup> Expert Asian Metal.



**Figure 18 : Historique des prix du lithium aux Etats-Unis et consommation mondiale**



Sources : USGS, Roskill, (graphique tiré de Energy Storage Materials 6 (2017) 171-179)

Cette hausse peut s'expliquer en partie par une offre de lithium, notamment sous forme d'hydroxyde de lithium, insuffisante ces deux dernières années pour répondre notamment à la forte demande des constructeurs de batteries Li-ion pour les VE. Et ce, particulièrement en Chine et aux Etats-Unis où la production et la commercialisation de ces véhicules enregistre une croissance importante depuis 2011. Le déséquilibre a obligé les acteurs en place sur ces nouvelles applications à acheter des contrats de lithium à des prix très élevés pour assurer leur sécurité d'approvisionnement. Les acheteurs chinois semblent notamment prêts à dépenser de fortes sommes afin de sécuriser leur approvisionnement en lithium pour soutenir la rapide croissance que connaît leur industrie des batteries et du VE

## 4. Restructuration du marché face à la nouvelle demande de lithium dans le secteur de la mobilité

Depuis quelques années, sous l'impulsion d'un usage croissant dans le secteur des batteries, le marché du lithium a évolué rapidement. Entre 2004 et 2014, la consommation de lithium a augmenté, en moyenne, de 8 % par an (USA inclus) (**Figure 19**). Depuis 2013, l'offre peine à satisfaire une demande toujours plus croissante. La production de lithium a, pour sa part, pourtant augmenté de 12 % en 2016. En 2015, la capacité installée était ainsi estimée à 49,4 kt de lithium<sup>27</sup> pour une production de 31,5 kt (hors USA), ce qui laisse entendre un taux d'utilisation des capacités de production de seulement 64 % en 2015, un chiffre qui a atteint 70 % en 2016 (35 kt de production estimée hors USA).

**Figure 19 : Evolution de la production de lithium au niveau mondial (kt)**

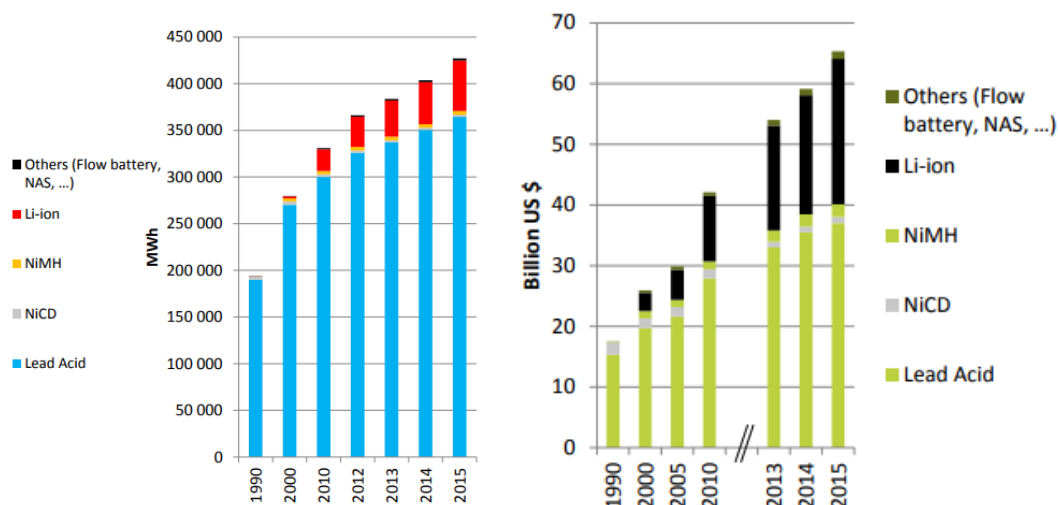


Source : Rapport USGS (2014)

### 4.1. Le marché des batteries Li-ion

En 2015, le chiffre d'affaires global du marché des batteries représentait 65 milliards d'euros et enregistrait une croissance globale de 5 % par an. La technologie toujours majoritairement commercialisée est celle des accumulateurs acide Plomb. Toutefois, les batteries Li-ion représentent désormais un tiers du marché. Ainsi sur 430 GWh d'énergie stockée au niveau mondial (60 % par les batteries portables et 35 % par l'industrie), environ 70 GWh proviennent des technologies Li-ion, un chiffre en croissance de 22 % par an.

**Figure 20 - Marché mondial des batteries en énergie stockée et en dollars**



Source : Avicenne (2015)

<sup>27</sup> USGS (2017).



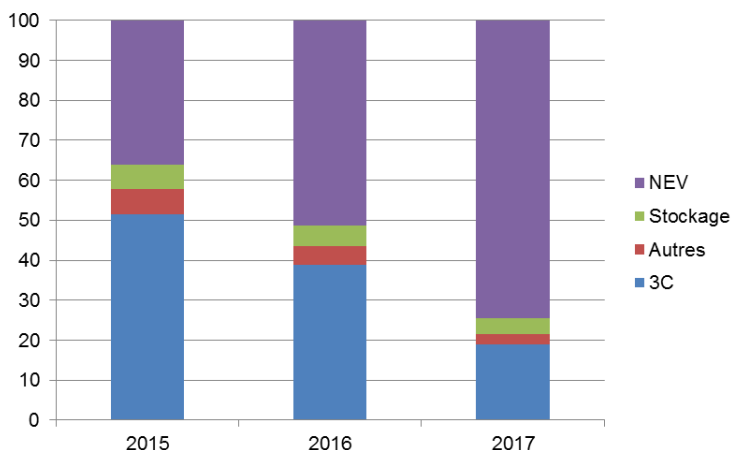
En matière de consommation de lithium cela représenterait 14 000 tonnes de lithium. Le secteur des batteries consomme ainsi aujourd'hui environ 40 % de la production de produits au lithium, un chiffre en constante augmentation. En outre, une part de plus en plus importante est consacrée à la production de batteries pour les VE, notamment en Chine comme l'illustre la **Figure 21**.

**Tableau 10 : Consommation des batteries Li-ion en 2016**

Demande totale de Li-ion (GWh)	70
Demande totale en Li (tonnes)	14 000
Besoin en lithium (t/MWh)	0,2

Source : Collège de France, Tarascon (2017)

**Figure 21 : Consommation sectorielle des batteries Lithium-Ion en Chine entre 2015 et 2017 \***



Source : CJ Securities (2017)

\*Prévisions pour 2017 (NEV : nouveau VE, 3C : batteries traditionnelles pour applications portables)

Le lithium est utilisé dans les matériaux d'électrodes et les électrolytes des technologies Li-ion. Il existe différents matériaux d'électrodes à base de lithium pouvant être utilisés pour la production des batteries. Ils possèdent des caractéristiques différentes et ne répondront pas aux mêmes applications. Ainsi si on retrouve dans nos téléphones portables majoritairement des batteries à oxyde de cobalt, les batteries développées pour les VE sont le plus souvent des piles Li-NMC à base de nickel, manganèse et cobalt (plutôt en Europe, par exemple la Zoé), NCA à base de nickel cobalt aluminium (plutôt aux Etats-Unis comme dans les voitures de Tesla) ou encore LFP à base de phosphate de fer (majoritairement en Chine comme dans les voitures du constructeur BYD). Dans le **Tableau 11**, les principaux usages et caractéristiques des batteries Li-ion sont décrits. Il faut noter qu'aujourd'hui, que pour les applications VE, sont aussi commercialisées des batteries lithium à base de polymère. Les batteries au lithium ne reposent donc pas toutes sur la technologie Li-ion.

**Tableau 11 - Principaux Matériaux d'électrodes pour les technologies Li-ion**

Acronyme	Formule chimique	Caractéristiques	Usage
<b>LCO (Lithium cobalt oxyde)</b>	$Li_{1-x}CoO_2$	Forte densité d'énergie, pas d'effet mémoire, faible autodécharge mais temps de chargement long et risque de surchauffe si endommagée	Téléphones et ordinateurs portables Appareils numériques
<b>LMO (lithium)</b>	$Li_{1-x}MnO_4$	Stable thermiquement, recharge rapide mais plus faible densité d'énergie	Outils électriques Instruments médicaux <b>Rare en mobilité</b>

<b>manganèse oxyde)</b>			
<b>NCA (Nickel Cobalt Aluminium)</b>	$\text{Li}_{1-x}\text{NiCoAlO}_2$	Forte énergie spécifique, longue durée de vie, points faibles au niveau de la sûreté et du coût, technologie utilisée par Tesla	<b>Mobilité</b> (moteur électrique), stockage de l'énergie
<b>NMC (Nickel Manganèse Cobalt)</b>	$\text{Li}_{1-x}(\text{NiMnCo})\text{O}_2$	Adaptable à des utilisations à forte énergie ou à forte puissance, technologie principalement utilisée par les producteurs de batteries au Japon ou en Corée du Sud	<b>Mobilité</b> (moteur électrique), outils électriques
<b>LFP (Lithium Fer Phosphate)</b>	$\text{Li}_{1-x}\text{FePO}_4$	Plus stable thermiquement et chimiquement, plus respectueux de l'environnement, largement utilisé en Chine par rapport aux technologies NMC/NCA	<b>Mobilité</b> (moteur électrique)

Pour notre étude, il est indispensable de s'interroger sur la quantité de lithium nécessaire à la réalisation des batteries ; cette dernière s'exprime en kWh de stockage, qui correspond à l'énergie stockée, puis délivrée par les batteries. En théorie, il faut ioniser 73 grammes de lithium pour libérer 1 kWh car la capacité théorique de stockage d'un gramme de lithium est 13,68 kWh<sup>28</sup>. Le **Tableau 12** donne des valeurs moyennes de consommation de lithium par commodité, calculés à partir d'une étude de Hao & al. (2017)<sup>29</sup>.

Au niveau des coûts, la production d'une batterie reste très peu sensible au prix du lithium car celui-ci ne représente qu'environ 2 % du prix total<sup>30</sup>. Le prix des cellules Li-ion a évolué particulièrement rapidement sur la dernière décennie. Si en 2004, leur prix était de 2000\$/kWh, il a chuté à environ 1000 \$/kWh en 2010, puis en deçà de 300\$/kWh en 2015. En considérant l'ensemble cellules et pack, les chiffres pour les voitures commercialisées aujourd'hui se situent autour de 400\$/kWh (Bloomberg, 2016). Et les perspectives d'évolution des coûts restent orientées à la baisse pour les prochaines années<sup>31</sup>. La **Figure 22** illustre parfaitement tout en montrant le gain énergétique obtenu ces dernières années. Attention toutefois car la densité énergétique est une énergie exprimée par kilogramme de batterie et non de lithium. Cette unité caractérise l'autonomie de la voiture<sup>32</sup>. Aujourd'hui elle se situe aux alentours de 250 Wh/kg de batterie pour la majorité des VE en circulation (soit environ 300Wh/l de densité énergétique volumique). Des valeurs qui restent donc très éloignées de la densité énergétique des carburants pétroliers (environ 9 400 Wh/l pour l'essence). Il faut bien garder à l'esprit qu'avec une technologie au lithium-ion la limite haute ne pourra dépasser les 350Wh/kg de densité d'énergie<sup>33</sup>.

<sup>28</sup> En considérant un accumulateur avec une tension de 3.6V ce qui correspond à une batterie Li-ion au cobalt classique (LCO) une densité de charge pour le lithium de 3,8Ah/g. Calcul pour 1g de lithium : 3.6 (V) \* 3,8 (Ah) = 13,68 (W.h).

<sup>29</sup> En accord avec "The Growing Role of Minerals and Metals for a Low Carbon Future", World Bank (2017), qui retient la valeur de 12.7 kg de véhicule tout électrique et des différentes études analysées lors de l'élaboration de cette étude (Bloomberg, Wood Mackenzie).

<sup>30</sup> BNEF a ainsi montré qu'une augmentation de 200 % du prix du lithium n'entraînait qu'1,1% d'augmentation du coût d'un pack de batterie de technologie NMC. Bloomberg New Energy Finance, *Metals demand from batteries: Large Numbers, Small impacts* (2017).

<sup>31</sup> En 2015, Elon Musk, PDG de Tesla Motors, a annoncé que sa société serait en mesure, d'ici 2020, de produire des batteries aux alentours de 125\$/kWh.

<sup>32</sup> Plus la densité en énergie (nombre Wh par kg de batterie) est élevée, plus la batterie aura d'autonomie.

<sup>33</sup> Théoriquement 387kWh/kg en conditions optimales.





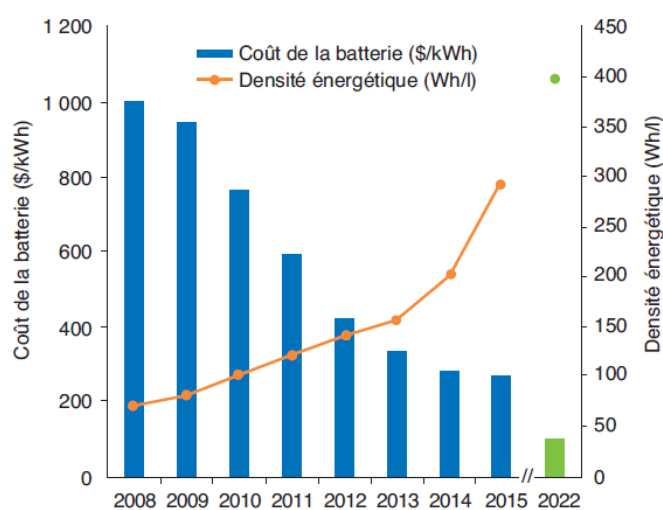
**Tableau 12 : Quantité moyenne de lithium utilisé dans des objets utilisant des batteries au lithium**

Commodité	Quantité de lithium par unité
VE	14,9 kg
Bus électrique	49,7 kg
Bus hybride électrique	12,8 kg
Véhicule hybride électrique	9,0 kg
Vélo électrique	0,3 kg
Téléphone mobile	4,8 g
Ordinateurs portables	31,7 g
Système de stockage	0,59 t /MWh

Source : Hao et al. (2017)

Au niveau environnemental, il est intéressant d'analyser la production des batteries. En effet 1 kWh de batterie Li-ion nécessite une énergie d'environ 387 kWh à produire et rejette 95 kg de CO<sub>2</sub><sup>34</sup>. Un rapport de l'ADEME paru en 2013<sup>35</sup> mettait ainsi en exergue le fait que le VE était beaucoup plus consommateur d'énergie primaire et avait un potentiel de changement climatique plus important que les véhicules diesel ou essence à sa production. Il faut donc effectuer un nombre minimum de kilomètres (entre 30 000 et 100 000 km selon les scénarios) pour que le VE ait une véritable pertinence environnementale relative. Aujourd'hui les recherches se concentrent donc sur l'utilisation de matériaux d'électrodes plus abondants (Fer, Magnésium, Titane) ou sur l'abaissement des températures de synthèse pour économiser de l'énergie. Néanmoins les technologies de stockage à base de lithium vont vraisemblablement rester majoritaires sur le marché dans les années futures car il n'existe pas encore de substitut efficace à ce jour.

**Figure 22 - Evolution du coût de production et de densité énergétique des batteries Li-ion**



Source : DOE

<sup>34</sup> Conférence Tarascon J-M, Collège de France (2017).

<sup>35</sup> Elaboration selon les principes des analyses de cycle de vie des bilans énergétiques, des émissions de gaz à effet de serre et des autres impacts environnementaux induits par l'ensemble des filières de véhicules électriques et de véhicules thermiques, VP de segment B (citadine polyvalente) et VUL à l'horizon 2012 et 2020, ADEME, novembre 2013, 281p.



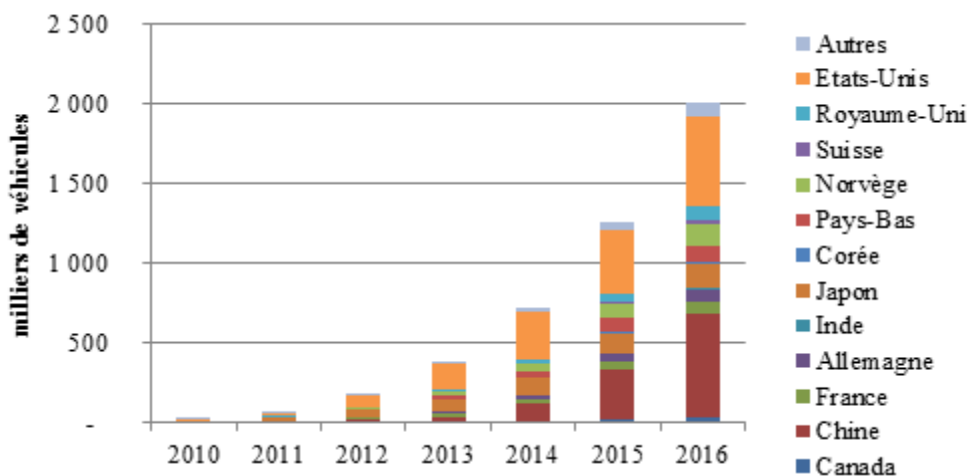
## 4.2. De la cellule à la roue

Les secteurs consommateurs de lithium ne devraient pas enregistrer de transformations majeures dans les décennies à venir, néanmoins des innovations et des nouveaux usages dans celui des batteries vont continuer à bouleverser le marché du lithium. Les grands acteurs du marché des batteries (Panasonic, LG Chem, CATL, etc.) ont déjà annoncé la construction de capacités de production qui pourraient tripler la production mondiale de batteries au lithium d'ici 2020<sup>36</sup>. La nature de ces projets laisse supposer que, dans un premier temps, les batteries construites seront principalement destinées aux voitures électriques et les applications liées au stockage sur le réseau électrique prendront le relais d'ici quelques années<sup>37</sup>.

### 4.2.1. Le marché de la voiture électrique

Si l'émergence du VE était encore sujet à caution il y a quelques années, force est de constater que la croissance observée du VE à l'heure actuelle et ses projections à venir sont particulièrement dynamiques pour les prochaines décennies (**Figure 23**). Ces évolutions trouvent leur origine dans le besoin de limiter les émissions de CO<sub>2</sub> du secteur transport, notamment pour limiter les effets en matière de santé publique, et de réduire les coûts budgétaires et humains associés aux conséquences de la pollution de l'air en zone urbaine. Le marché des véhicules légers électrifiés a été multiplié par 10 en l'espace de 5 ans. En 2016, on comptabilisait 753 000 VE<sup>38</sup> au niveau mondial, soit une progression de 40 % par rapport à 2015. Deux pays concentrent la majorité des ventes de ce type de véhicules : la Chine et les Etats-Unis. Le nombre total de VE a ainsi dépassé la barre du million pour un parc automobile mondial de plus de 1 milliard de véhicules et des ventes mondiales totales estimées à près de 94 millions en 2016. En additionnant les véhicules hybrides, ce sont plus de 2 millions de véhicules avec batteries rechargeables qui sont aujourd'hui en circulation<sup>39</sup> au niveau international.

Figure 23 : Evolution du stock de véhicules légers électrifiés dans le monde



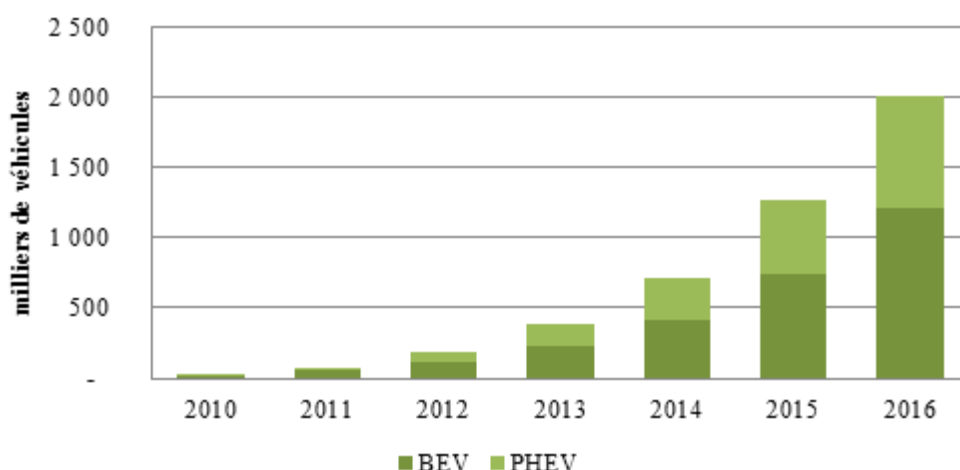
<sup>36</sup> <https://www.resource-capital.ch/en.html> Lithium report (2017).

<sup>37</sup> Aujourd'hui les systèmes de stockage d'énergie représentent une faible part de la demande de lithium (moins de 5 % du secteur total des batteries). Des projets sont néanmoins régulièrement annoncés notamment en Californie, au Nebraska ou encore au Royaume-Uni. (<https://www.energy-storage.news/news/uk-coal-power-station-could-be-replaced-by-natural-gas-and-200mw-of-battery>). En décembre 2017, Tesla a également inauguré le plus grand système mondial de stockage sur batterie Li-ion en Australie (100MW). En 2016, 90 % des nouveaux systèmes de stockage d'énergie construits aux Etats-Unis reposaient sur des batteries de technologie Li-ion. Webinar Wood Mackenzie (2017).

<sup>38</sup> Véhicules avec batteries rechargeables (incluant les véhicules hybrides).

<sup>39</sup> Données AIE basées majoritairement sur les données de l'EVI (Electric Vehicle Initiative).





Source : AIE (2017)

\*VE : BEV et PHEV : hybrides rechargeables

L'Europe n'est pas en reste et elle connaît également une croissance forte tirée en grande partie par la Norvège (+ 4,8 % d'immatriculations de VE entre l'année 2015 et 2016 et + 30 % entre les premiers trimestres 2016 et 2017). Les véhicules alternatifs qui connaissent la plus grande croissance restent les véhicules hybrides avec une augmentation de ventes de 27,3 % entre 2015 et 2016. Au total sur l'année 2016, les nouveaux enregistrements de véhicules alternatifs ont compté pour 4,2 % du total des ventes<sup>40</sup>. Dans de nombreux pays et notamment en Chine, on observe également une volonté d'électrification des transports urbains. En l'espace de 5 ans, les ventes de bus électriques ont ainsi été multipliées par 60 (Tableau 13).

Tableau 13 - Ventes de bus en Chine selon la technologie (BEV : électrique, PHEV : hybride rechargeable, HEV : hybride)

	2012	2013	2014	2015	2016
<b>BEV</b>	1904	1672	12760	94260	115700
<b>PHEV</b>	313	2637	16500	23051	19376
<b>HEV</b>	5825	6111	797		

Source : EV-sales blog (2017)

#### 4.2.2. Producteurs de batteries et de VE

Il existe un nombre important d'acteurs sur la chaîne de valeur depuis la production de lithium jusqu'à la production d'un VE. Le tableau ci-dessous recense à titre d'exemples quelques produits et fournisseurs positionnés sur les différents segments, certains acteurs étant intégrés sur plusieurs segments. De manière générale, il est possible d'assimiler les producteurs de cellules et de packs de batterie. Le marché de la production des batteries au Li-ion au niveau mondial est très majoritairement concentré sur 3 pays : la Chine, le Japon et la Corée qui représentent 67 % du total, et ce pour les applications de batteries portables ou automobiles. Ces 3 pays sont actuellement les 3 plus gros utilisateurs de lithium dans le monde.

<sup>40</sup> ACEA (European Automobile Manufacturers' Association).

**Tableau 14 : Chaîne de valeur du lithium depuis l'extraction jusqu'au recyclage**

	Produits au lithium	Composants de batterie	Cellules et packs de batterie	Segment OEM	Recyclage du lithium
<b>Exemples de Produits ou composé chimique</b>	Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , LIOH	Cathode, anode, électrolyte	xEV, PEV, ESS, CE	BEV, PHEV, HEV	Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (en sortie du cycle de recyclage)
<b>Exemples de Fournisseurs</b>	ALB, SQM, Tianqi	Umicore, Nichia, SMM	Panasonic, BYD, LG Chem, CATL	BMW, Tesla, GM, Renault	Umicore, Retrieval Technologies

Source : Albemarle

**Tableau 15 – Classement des fournisseurs de batteries VE pour les années 2015 et 2016**

		2015 MWh	2016 MWh	% 2015	% 2016
1	Panasonic	4.552	6.665	38	33
2	BYD	1.652	4.020	14	20
3	LG Chem	1.432	2.285	12	11
4	AESC	1.272	1.622	11	8
5	Samsung SDI	504	1.157	4	6
	Autres	2.877	4.651	21	23
	<b>Total</b>	<b>12.289</b>	<b>20.400</b>	100	100

Source: ev-sales.blogspot.fr (2017)

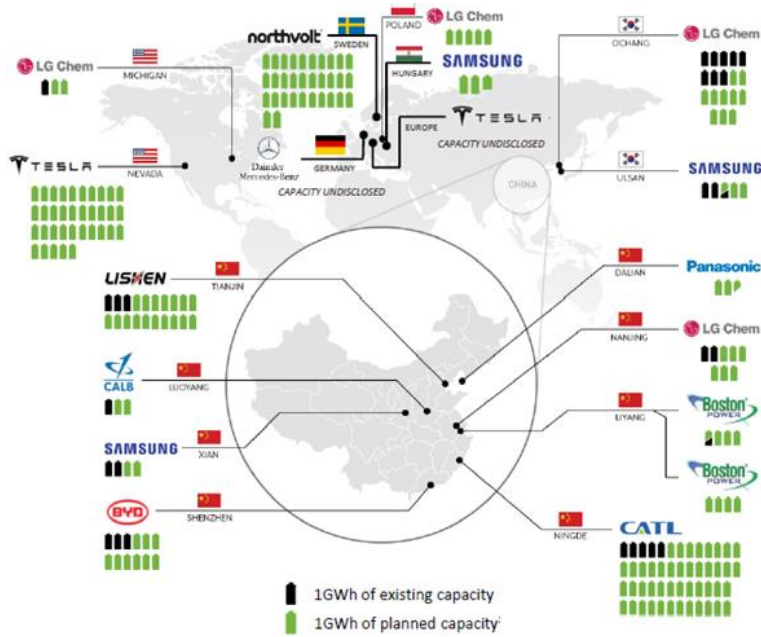
Panasonic est l'actuel leader du marché et détenait en 2016 33 % des parts de marché (en volume), soit 6,7 GWh. Cette entreprise travaille avec Volkswagen et Ford, mais c'est surtout son accord passé avec Tesla Motors qui devrait lui garantir sa place de leader à moyen terme<sup>41</sup>. Elle est suivie par l'entreprise BYD (*Build Your Dreams*), un constructeur automobile chinois, qui connaît une croissance très dynamique depuis quelques années. Entre 2014 et 2015, ses parts sur le marché des voitures électriques sont passées de 6 % à 14 % puis à 20 % en 2016, soit 4 GWh<sup>42</sup>. En 2016, comme en 2015, les batteries de LG Chem ont représenté 12 % du marché (respectivement 2,3 et 1,4 GWh). A la différence de Panasonic, LG Chem parie sur une multitude de partenariats et équipe les voitures électriques des groupes General Motors, Renault Nissan et Daimler. Au début de l'année 2016, LG Chem devait disposer de 7,5 GWh de capacités de production grâce aux projets terminés en 2015. AESC est un producteur de batteries né d'une joint-venture entre NEC et Nissan. De 23 % des parts de marchés en 2014, AESC a décliné à environ 8% (1.2 GWh) en 2016, en raison du rapprochement entre Nissan et LG Chem. D'autres acteurs ont annoncé la création de nouvelles usines : le chinois CATL ou encore l'américain Boston Power qui veut construire 10 GWh avec l'aide d'un financement du gouvernement chinois avant 2020. Samsung cherche lui aussi à devenir un acteur clé du marché automobile à travers des partenariats avec BMW et FIAT. A l'échelle européenne, la BEI (Banque européenne d'investissement) a approuvé en février 2018 un financement de 52,5 millions d'euros pour le fabricant de batteries suédois Northvolt. Cette initiative européenne vise à concurrencer les constructeurs asiatiques et américains.

<sup>41</sup> Les deux entreprises se sont associées pour construire une *Gigafactory*. L'usine située dans le Nevada a pour objectif de produire 35 GWh de batteries Li-ion par an, soit 5 fois la production mondiale de batteries pour VE en 2014. L'usine devrait produire des batteries pour 500 000 VE par an, mais également des batteries destinées au stockage domestique d'énergie.

<sup>42</sup> En outre, ce chiffre ne prend pas en compte les batteries de bus électriques, dont BYD a inauguré le 10 000<sup>ème</sup> en mai 2016, après 6 ans de production. Le producteur a porté sa capacité de 6 à 10 GWh entre 2014 et 2015 et a prévu d'augmenter ses capacités de production de 6 GWh par an pour atteindre 34 GWh en 2020.



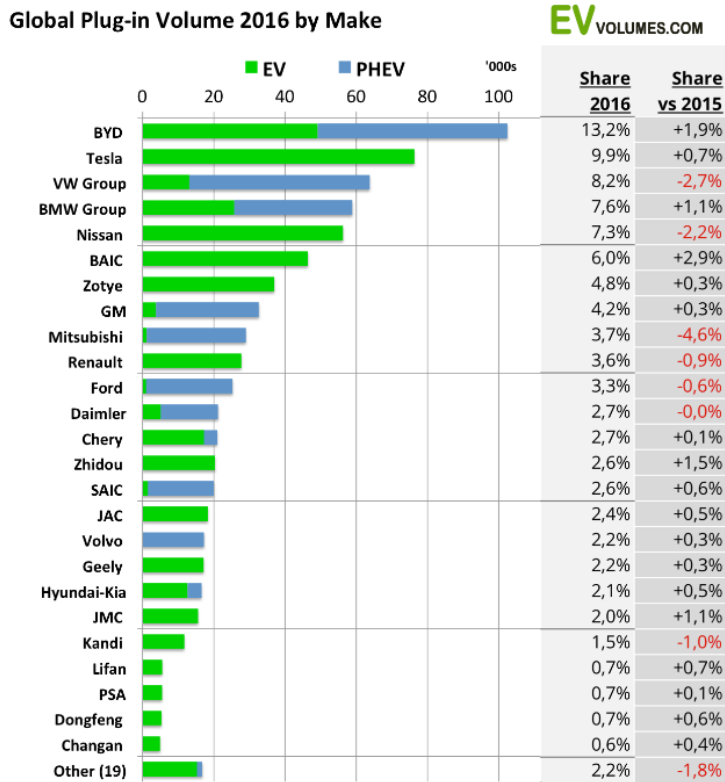
Figure 24 : Capacité de production installée et future des gigafactories



Source : Galaxy Resource (2017)

Aujourd'hui tous les constructeurs automobiles annoncent des projets de VE utilisant majoritairement les technologies Li-ion. Ainsi parmi eux, le chinois BYD est en tête des ventes pour l'année 2016 alors que le VE le plus vendu a été le Model S de l'américain Tesla. En Europe, c'est la Zoé du constructeur français Renault qui enregistre un succès en 2017.

Figure 25 : Classement des constructeurs de véhicules électrifiés dans le monde par part de marché en 2016. Bleu : PHEV, vert : VE.



Source : EV-volumes (2017)

Il existe une réflexion à l'heure actuelle pour les producteurs de VE et de batteries sur leur possible intégration verticale (modèle de Toyota) ou sur celle fondée sur l'externalisation (modèle de Tesla qui utilisent les batteries Panasonic, qui lui-même dépend de Sumitomo pour son approvisionnement en lithium). La première stratégie, plus capitaliste semble la moins risquée dans un contexte de demande exponentielle de lithium. Toutefois si la technologie li-ion est remplacée dans les prochaines décennies par une technologie Li-soufre ou Li-métal, il sera nécessaire de développer d'autres stratégies d'approvisionnement.

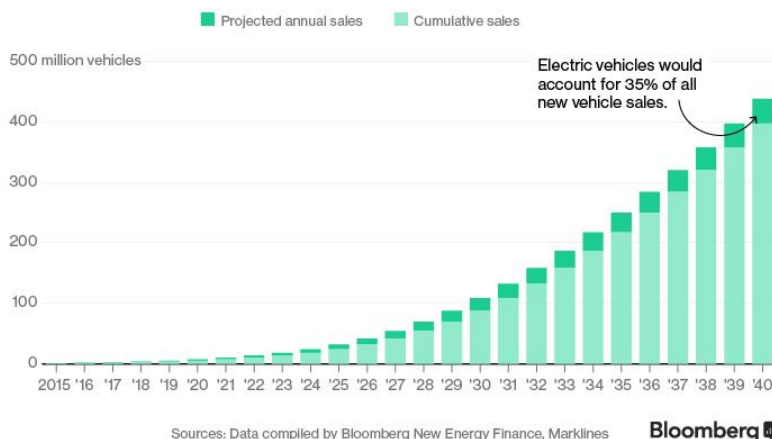
#### 4.2.3. Facteurs majeurs influençant le déploiement du VE

A l'échelle nationale, les gouvernements disposent d'une multitude d'outils de politiques publiques pour favoriser la diffusion du VE (externalité CO<sub>2</sub>, fiscalité spécifique, prime à l'achat, primes à la casse, etc.). En parallèle, l'évolution du coût du VE est un facteur explicatif fondamental pour comprendre les effets de diffusion sachant que le coût du VE est majoritairement dépendant de celui de la batterie. La production à très grande échelle de batteries peut représenter pour les producteurs ou distributeurs d'énergie électrique une opportunité non négligeable, les prix peuvent être considérablement réduits *via* ce biais<sup>43</sup>. Le coût des batteries pourrait aussi être indirectement diminué par un poly-usage de la batterie ou par un usage en seconde vie. En effet, les batteries des VE consomment de l'électricité, mais peuvent également devenir des générateurs, c'est-à-dire restituer de l'énergie au réseau. Un grand parc de VE permettrait ainsi de lisser les pics de consommation d'électricité, grâce à l'effacement ou par la fourniture d'énergie au réseau lorsque la demande est très forte<sup>44</sup>. Les batteries, après leur utilisation en VE, peuvent encore servir car il leur reste en moyenne 75-80 % de leur capacité initiale. Le stockage stationnaire, qui demande des appels de puissance moins importants, est un exemple de réutilisation très souvent mentionné<sup>45</sup>. Toutefois il existe un coût de reconditionnement non négligeable<sup>46</sup>.

#### 4.2.4. Demande de lithium associée aux scénarios 2017 de déploiement du VE de l'AIE

Les scénarios les plus optimistes montrent que le VE pourrait représenter un tiers du marché en 2025, la moitié en 2040 et jusqu'à 1,7 milliards de VE d'ici 2050, soit une part de marché de 70 %. Selon Bloomberg, les VE représenteraient 35 % des ventes en 2040, ce pourcentage pourrait monter à 70 % pour les deux-roues. Même l'OPEP a revu ses scénarios à la hausse de 500 % entre 2015 et 2016<sup>47</sup>. La majorité des acteurs du secteur de l'automobile s'accorde à dire que cette mutation du secteur devrait être durable, d'autant plus que le prix des batteries est en constante diminution et que de nombreux constructeurs de VE (Tesla Motors, General Motors, Ford Motor) annoncent des véhicules aux alentours de 30 000\$ dans les prochaines années.<sup>48</sup>

Figure 26 : Projection des ventes de véhicules électriques à l'horizon 2040



Source : Bloomberg (2016)

<sup>43</sup> Selon le département de l'énergie américain le coût du pack de batteries pourrait être réduit de 13 % en augmentant le volume de production de 25 000 à 100 000 unités.

<sup>44</sup> Y. Perez et al. (2017), Jin-Woo Jung et al. (2014).

<sup>45</sup> Jiao, N., Evans, S. (2016).

<sup>46</sup> Aujourd'hui la réutilisation des batteries des VE (transport, test, cyclage, repackaging) a un certain coût (estimé à près de \$100/kWh par Bloomberg), néanmoins celui-ci peut être diminué avec des économies d'échelle si les VE se généralisent (<\$50/kWh). Il faut compter, toujours selon Bloomberg, environ \$400/kWh pour ensuite les convertir en système stationnaire. <https://about.bnef.com/blog/kcbs-bnef-curry-on-ev-batteries-second-life/>

<sup>47</sup> BNEF : A l'horizon 2040 l'OPEP estime ainsi le nombre de véhicules électriques à 266 millions d'unités en 2016 contre 43 millions l'année précédente.

<sup>48</sup> Déduction faite des aides gouvernementales.



D'après la **Figure 26**, les ventes cumulées de VE en 2040 pourraient ainsi atteindre environ 400 millions. A l'heure actuelle, la Zoé de Renault nécessitant environ 8,2 kg de lithium<sup>49</sup> et la Tesla Model 3 environ 15 kg<sup>50</sup> de lithium, 400 millions de Zoé équivaldraient donc à 3,3 millions de tonnes de lithium et 400 millions de Tesla Model 3 à 6 millions de tonnes de lithium. Sur une période de 25 ans cela correspond à des productions annuelles de l'ordre de 100 à 250 kt/an, soit 3 à 7 fois la production actuelle.

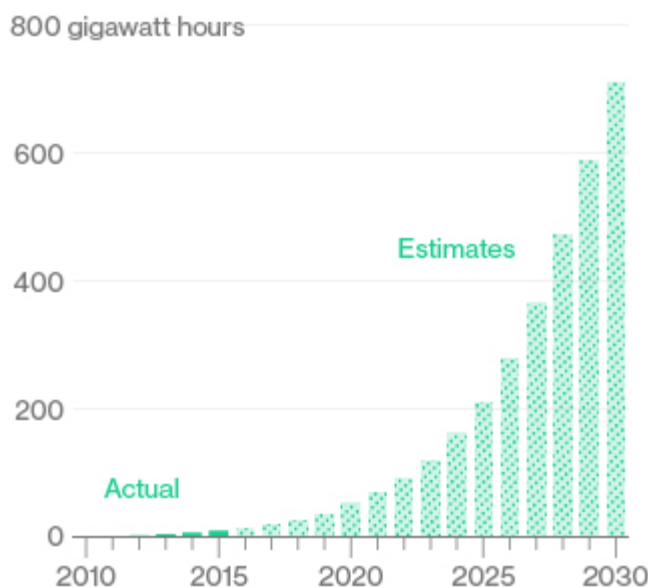
**Figure 27 : Demande en lithium associée à la consommation du secteur des batteries à l'horizon 2025**

	2015	2020	2025
Demande totale Li-ion (GWh)	59	~139	~210
Demande totale en Li (tonnes)	11 580	23 407	35 073
Besoin en lithium en t/MWh	0,2	0,17	0,16

Source : Renault (2017)

En 2016, la consommation totale des batteries automobile a été mesurée à 78 GWh et pourrait atteindre jusqu'à 1 TWh en 2040 selon Renault. C'est 15 fois plus qu'aujourd'hui et cela représenterait une production annuelle de 200 kilotonnes de lithium<sup>51</sup> (soit une production multipliée par 5 par rapport à celle actuelle, tous secteurs confondus, et une production cumulée de 6,6 millions de tonnes de lithium). L'ordre de grandeur est cohérent avec les estimations de Bloomberg ou les scénarios optimistes de l'AIE<sup>52</sup>.

**Figure 28 : Demande de puissance annuelle pour les batteries de VE**



Source : Bloomberg (2017)

Pour estimer la demande en lithium à l'horizon 2030 nous avons utilisé les scénarios de pénétration du VE fournis par l'AIE (Global EV Outlook 2017).

4 scénarios de pénétration du VE sont envisagés :

- **Le Reference Technology Scenario (RTS)** reflète les projections qui répondent aux politiques d'efficacité énergétique, de diversification de l'énergie, de qualité de l'air et de décarbonation qui ont été annoncées

<sup>49</sup> En considérant que pour la Zoé, sa batterie 41kWh consomme 200gLi/kWh (sans considération de perte d'usage).

<sup>50</sup> Si l'on considère d'une part que la Gigafactory au Nevada devrait fournir 500 000 batteries/an (Gigafactory) et nécessiter annuellement environ 10.000t de lithium (communiqué de l'Usine Nouvelle) et si l'on considère d'autre part une consommation batterie de 200gLi/kWh associée à une énergie de 75KWh, on arrive alors à un total de 15kg de lithium par véhicule.

<sup>51</sup> A raison de 0.2t/MWh.

<sup>52</sup> Global EV Outlook 2017, IEA.

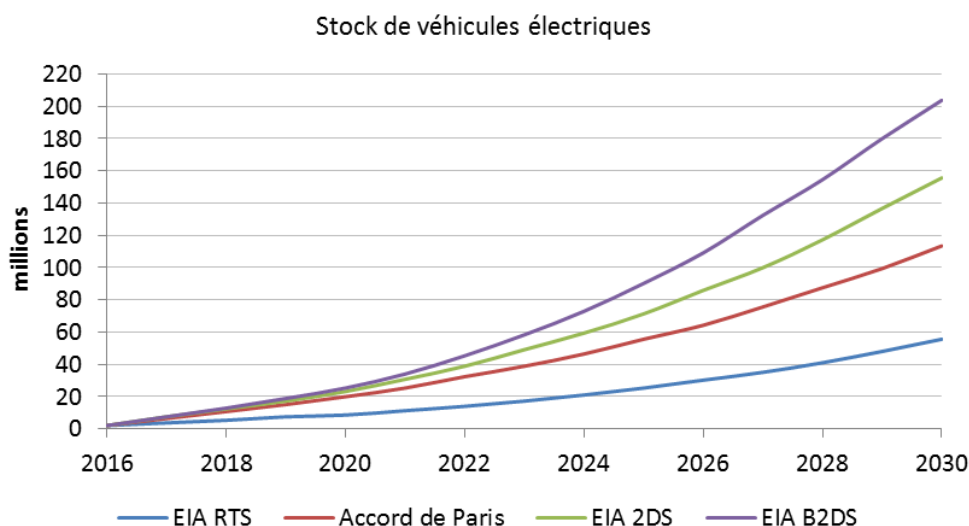
ou envisagées (incluant les INDCs<sup>53</sup> prises à la COP 21). En ce sens il diffère du scénario « business as usual ». Selon ce scénario l'accroissement moyen de la température en 2100 sera de 2,7°C et continuera de s'accroître.

- **Le 2°C Scenario (2DS)** reflète un contexte compatible avec une probabilité de 50 % de limiter l'augmentation de la température moyenne globale à 2°C en 2100.
- **Le Beyond 2°C Scenario (B2DS)** vise à atteindre des émissions nettes nulles de GES du secteur de l'énergie peu de temps après 2060, compatible avec une probabilité de 50 % de chance de limiter l'augmentation moyenne future de la température à 1,75°C.
- **Scénario Accords de Paris** considère l'ambition de la déclaration de Paris sur l'électromobilité d'atteindre un seuil minimal de 100 millions de VE en 2100.

Le scénario RTS est cohérent avec les estimations de Bloomberg à l'horizon 2030 (une centaine de millions de VE dans la flotte mondiale).

Ces scénarios de fortes pénétrations, dans le respect des accords sur le climat vont dépendre en grande partie de la motivation des gouvernements à limiter leurs émissions de CO<sub>2</sub>.

**Figure 29 : Stock de VE selon les scénarios de l'AIE**



Source : AIE (2017)

Nous avons ensuite travaillé avec deux concentrations moyennes de lithium dans les VE afin d'avoir une estimation basse et haute. Dans le premier scénario, la consommation d'un VE est de 5kg par véhicule<sup>54</sup>.

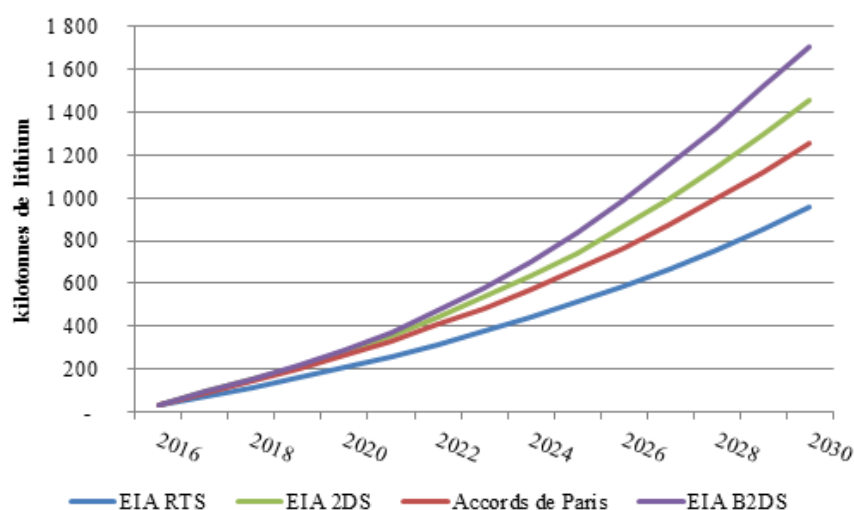
<sup>53</sup> INDCs : Intended Nationally Determined Contributions. Dans le cadre du nouvel accord international sur le climat les pays se sont engagés à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre et ont rendu publique une contribution décidée à l'échelle nationale.

<sup>54</sup> En considérant qu'en 2016, 4,55kt de lithium (soit un tiers des 39% de la production de lithium attribuée au secteur des batteries – mobilité et batteries portables confondues) ont été consacrés à la production d'un peu moins d'un million de véhicules électriques (données AIE).





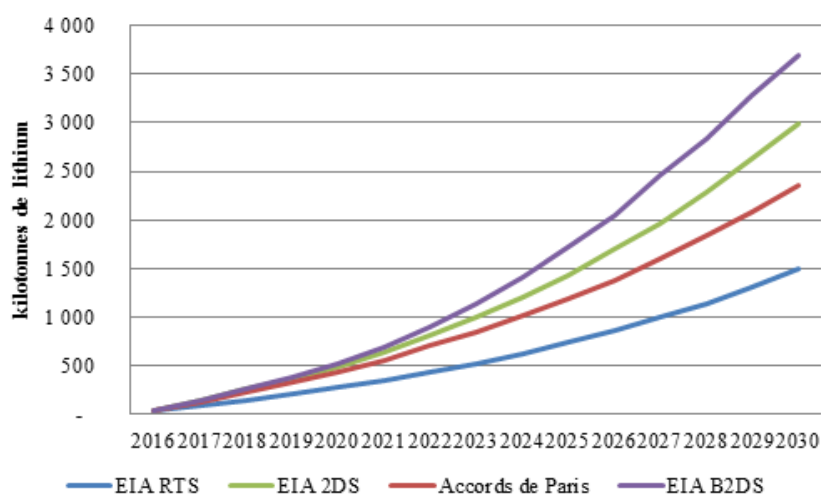
Figure 30 : Production cumulée de lithium avec une hypothèse de 5kg Li/véhicule



Source : auteurs, tiré des scénarios AIE (2017)

Dans le second sous scénario, la consommation d'un VE est de 14,9 kg par véhicule<sup>55</sup>.

Figure 31 : Production cumulée de lithium avec une hypothèse de 14,9kg Li/ véhicule



Source : auteurs, tiré des scénarios AIE (2017)

D'après la **Figure 30** et la **Figure 31**, pour respecter le scénario 2°C, il faudra d'ici à 2030 produire en cumulé entre 1 400 et 3 000 kt de lithium, soit des productions annuelles variant de 90kt à 200kt de lithium entre aujourd'hui et 2030. Ces résultats sont cohérents avec les approximations effectuées sur les estimations Bloomberg et Renault dans les parties précédentes. Il faut néanmoins prendre garde car en extrapolant à 2050, les réserves risquent d'être beaucoup plus sollicitées et le recours au recyclage plus systématique (cf. 4.3.3).

### 4.3. Les nouveaux gisements et procédés d'extraction

#### 4.3.1. Gisements conventionnels : nouveaux procédés de production

##### 4.3.1.1. Salars

En étant dépendant de paramètres climatiques, le procédé d'extraction conventionnel reste rudimentaire et n'est pas non plus optimal dans la mesure où il ne permet d'extraire que 40 % à 50 % du lithium contenu dans les saumures. Du fait de la solubilité du lithium les taux de récupération sont d'environ 75 % auxquels s'ajoutent des

<sup>55</sup> Material flow analysis of lithium in China, Sarkis (2017).



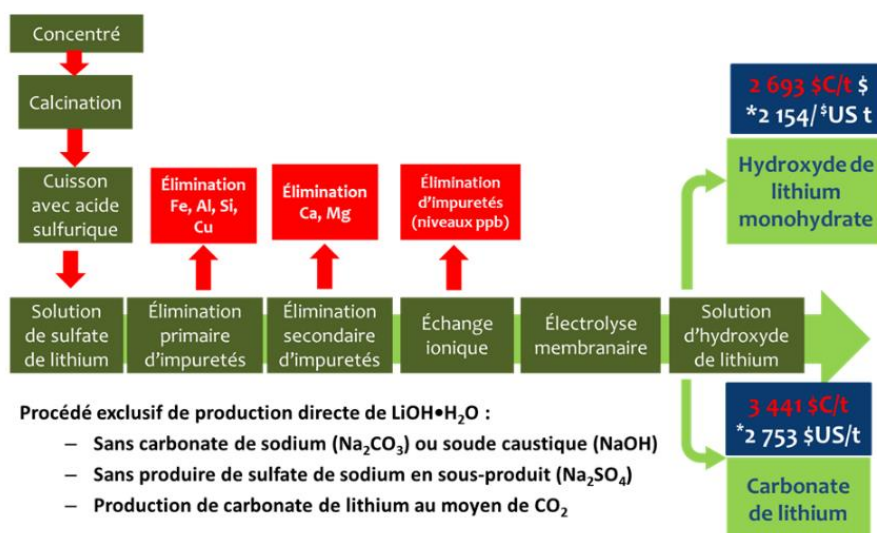
pertes réelles dues aux fuites dans les bassins d'évaporations ou lors de l'entraînement du sel qui ne permettent finalement que des rendements assez faibles. Les optimisations du procédé portent sur le poste le plus coûteux : les bassins d'évaporation qui ont également un impact négatif sur l'environnement et entraînent des temps de récupération longs. C'est un procédé également coûteux en espace et qui nécessite des conditions d'ensoleillement favorables. Les nouveaux procédés peuvent intervenir sur la phase de concentration ou directement en amont durant la phase d'extraction. Les procédés étudiés peuvent ainsi reposer sur l'électrolyse<sup>56</sup>, l'adsorption, les échanges ioniques et l'extraction par solvant ou plus minoritairement la séparation membranaire. Il n'existe aujourd'hui pas de chiffres publics sur les coûts. On peut toutefois émettre l'hypothèse que si les taux de récupération peuvent être augmentés jusqu'à 40 % et le coût des bassins supprimés, le coût d'investissement moyen pour exploiter un salar pourrait diminuer de 20 % à 40 % en s'affranchissant des bassins d'évaporation. Il faut aussi tenir compte du fait que ces nouveaux procédés d'extraction directe peuvent permettre la mise en production de saumures aujourd'hui non exploitées car présentes dans un environnement où l'évaporation solaire n'est pas possible (manque de place, manque d'ensoleillement, etc.).

A noter qu'un des enjeux actuels repose également sur la production directe d'hydroxyde de lithium à partir des saumures sans passer par le carbonate de lithium. En effet, avec l'essor des VE, le marché de l'hydroxyde de lithium est de plus en plus conséquent.

#### 4.3.1.2. Roches lithinifères

Comme pour les saumures, les industriels ont annoncé plusieurs technologies permettant d'optimiser la production de carbonate depuis les ressources minérales en substituant une partie des réactifs nécessaires à la production. Ceci laisse présager une réduction significative des OPEX puisque, d'après la **Figure 10**, les réactifs comptent pour 43 % du coût de production. *Clariant* et *Nemaska Lithium* développent ainsi un procédé permettant de remplacer le coûteux carbonate de sodium (soude) par du dioxyde de carbone. Cette technique ramènerait le coût de production au niveau de celui des salars et augmenterait la pureté du carbonate ou de l'hydroxyde de lithium ainsi produits<sup>57</sup>.

Figure 32 : Procédé Nemaska/Clariant



Source : Nemaska Lithium

De même, le procédé ELi Process de *Neometals* et *Mineral Resources* permettrait aussi d'obtenir du carbonate et de l'hydroxyde de lithium à partir de concentré de spodumène.

#### 4.3.2. Gisements non conventionnels

Il existe plusieurs types de gisements non conventionnels pour le lithium, mais la faible quantité de ressources qu'ils représentaient jusqu'à la fin des années 2000, ajoutée aux difficultés techniques d'exploitation, n'ont pas incité au développement de leur production.

<sup>56</sup> Lee et al. (2013).

<sup>57</sup> <http://www.nemaskalithium.com/fr/whabouchi/procedes-developpes/>

Toutefois, le regain d'intérêt pour le lithium dans la première moitié des années 2010 a mis au jour de nouveaux gisements non conventionnels conjointement à de nouvelles techniques d'exploitation réduisant les coûts. Même si ces gisements ne représentent qu'une dizaine de pourcents des ressources mondiales en 2016 (**Tableau 6**), leur importance est capitale en termes de capacité de production. Les faibles coûts de production annoncés ont conduit des entreprises comme Tesla à parier par exemple sur le gisement argileux mexicain exploré par Bacanora pour l'approvisionnement de son usine du Nevada.

Le plus grand gisement potentiel réside dans les océans, mais avec un coût cette fois nettement supérieur aux gisements exploités actuellement. Estimés entre 15 et 22\$/kg LCE, ils représentent 10 fois les coûts de production du Salar d'Atacama. Ces coûts peuvent donc être considérés comme des plafonds potentiels pour les prix du lithium.

### 4.3.3. Le recyclage des déchets : un gisement de lithium peu exploité

Le lithium peut également provenir du recyclage. Cette potentielle source secondaire de lithium doit faire l'objet d'une analyse car nous disposons déjà de *véritables gisements urbains* dans lesquelles le lithium est présent. Aujourd'hui, de plus en plus d'entreprises essaient d'intégrer la récupération du lithium dans les procédés de recyclage des batteries. La difficulté majeure provient de la séparation des différents constituants qui composent ces assemblages. Néanmoins, il est estimé que ce sont 28 tonnes de batteries Li-ion qui sont nécessaires pour obtenir 1 tonne de lithium, contre 250 tonnes de minerai ou 750 tonnes de saumure ! Avant d'être recyclés, les packs de batteries peuvent être utilisés dans un usage secondaire, nécessitant moins d'énergie, afin de limiter la demande en lithium. C'est notamment le cas pour le stockage stationnaire. Enfin, il existe certaines sources de lithium provenant du traitement de certains déchets tels que les eaux usées issues de l'exploitation pétrolière<sup>58</sup>. Ces dernières restent cependant des marchés de niches. Le lithium recyclé représente aujourd'hui moins de 1 %<sup>59</sup> de l'offre totale, alors que certains métaux ont déjà des filières de recyclage mature, comme celles du cuivre, du cobalt, de l'aluminium ou du nickel qui ont toutes des taux de recyclage supérieurs à 50 %.<sup>60</sup>

En raison de leur toxicité, la quasi-totalité des batteries acide-plomb est recyclée, contre seulement 10 % à 15 % des batteries Li-ion. Dans ce cas, c'est majoritairement le cobalt qui est récupéré, car il fournit le revenu le plus élevé. Malgré son prix élevé, le lithium ne représente que 3 % en masse des composants utilisés dans les équipements portatifs<sup>61</sup> (téléphones mobiles, microordinateurs etc.) et il existe très peu de filières de recyclage de ce type de batteries<sup>62</sup>. Le **Tableau 16** reprend la liste des principales sociétés qui s'intéressent au recyclage des batteries de grand format, donc issues de l'automobile ou du stockage stationnaire. De manière générale, on observe le développement de nouvelles structures de recyclage pour l'électronique (*e-waste recycling*). Tout comme pour le recyclage du matériel électronique, il existe peu de données industrielles sur le recyclage des batteries. En Europe, il existe une directive européenne (2006/66/CE) qui impose un taux de collecte minimum de 45 % des batteries en 2016, ainsi qu'un recyclage à hauteur de 50 % de leur poids, ce qui ne favorise pas le lithium étant donnée sa légèreté.<sup>63</sup>

En tenant compte des coûts des procédés et des quantités récupérées lors du recyclage, et ce malgré des prix aujourd'hui élevés, il n'est toujours pas économique de recycler le lithium contenu dans les batteries. La durée de vie des batteries étant estimée à 8-10 ans<sup>64</sup>, un développement important du VE contribuerait à la réalisation d'importantes économies d'échelles pour le recyclage et donc à une diminution des coûts de collecte et de récupération du lithium<sup>65</sup>. De récents résultats fournis par Chen et al. (2018) présentent une nouvelle approche

---

<sup>58</sup> L'entreprise *MGX Minerals* a annoncé, début 2017, pouvoir extraire du lithium des eaux usées issues du processus de SAGD (Steam Assisted Gravity Drainage), une méthode de récupération assistée du pétrole lourd et des sables bitumineux, notamment au Canada. Ce processus requiert beaucoup d'eau et, en fin de cycle, celle-ci est contenue une certaine quantité de lithium qu'il serait possible de récupérer. *MGX Minerals* travaille aujourd'hui avec la société *Pur Lucid* pour mettre en place une usine pilote permettant de traiter ces eaux riches en huiles lourdes et en minéraux comme le lithium. Un brevet, *Petrolithium*, a été déposé, et selon *MGX*, la teneur en lithium est de 87 mg/L avec une récupération possible à 40 %. Le lithium ainsi obtenu est sous forme de carbonate de lithium.

<sup>59</sup> Chen et al., 2015; Graedel et al., 2011; Reck and Graedel, 2012.

<sup>60</sup> UNEP (2011), Recycling rates of metals, a status report.

<sup>61</sup> Technique de l'Ingénieur – Métallurgie du lithium.

<sup>62</sup> On peut citer pour les procédés les plus matures les sociétés Umicore, Accurec, Recupyl, Retriev Technologies (ex-Toxco). Les procédés traditionnels de recyclage des batteries reposent sur 4 techniques majeures : la séparation mécanique, les procédés pyrométallurgiques, les procédés hydrométallurgiques, les procédés hydrométallurgiques avec prétraitement thermique. Ces méthodes sont très consommatrices d'énergie ou de solvant, ce qui engendrent un fort coût environnemental et économique, notamment vis-à-vis de la récupération du lithium

<sup>63</sup> <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2006:266:0001:0014:en:PDF>

<sup>64</sup> Marano et al., 2009.

<sup>65</sup> Economies of scale for future lithium-ion battery recycling infrastructure, Resources, Conservation and Recycling 83 (2014) 53– 62.

non destructive et plus éco-énergétique pour régénérer les matériaux cathodiques (LiCoO<sub>2</sub> ou NMC) des batteries usagées<sup>66</sup>. Des économies d'énergie sur les procédés pourraient notamment induire des réductions de coûts.

**Tableau 16 : Principales compagnies recyclant ou ayant planifié de recycler les batteries Li-ion de grand format**

Entreprise	Localisation	Capacité (t bat/an)	Procédé
<b>Accurec</b>	Allemagne	6000	Pyrométallurgie Hydrométallurgie
<b>Batrec</b>	Suisse	1000	Mécanique
<b>Brunp</b>	Chine	10000	Pyrométallurgie
<b>Fuuoshan Bangpu</b>	Chine	3600	Pyrométallurgie
<b>OnTo</b>	US	Pilote	Extraction par solvant
<b>Recupyl</b>	France, Singapour	ND	Hydrométallurgie
<b>Retriev Technologies (ex Toxco)</b>	US	4500	Hydrométallurgie
<b>Shenzhen Battery Electronics Recycling Limited</b>	Chine	5000	Pyrométallurgie
<b>SNAM</b>	France	25000	Pyrométallurgie
<b>Sony &amp; Sumitomo</b>	Japon	150	Pyrométallurgie
<b>Telerecycle</b>	Chine	ND	Pyrométallurgie
<b>Umicore</b>	Belgique	7000	Pyrométallurgie
<b>Xstrata</b>	Canada, Norvège	7000	Pyrométallurgie

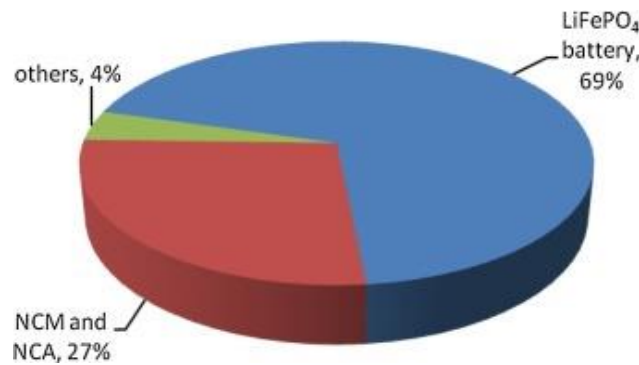
Source : Bloomberg New Energy Finance (2016)

L'hydrométallurgie, avec la lixiviation, semble le procédé le plus efficace de recyclage du lithium. Toutefois, il présente des taux de récupération plus faibles que pour les autres métaux. Sur une batterie Li-ion, on pourrait ainsi récupérer seulement 3,5 g de Li par 100 g de batterie. Les taux de récupération pour le lithium dans la littérature avoisinent les 80 %. Ces rendements sont cependant définis à l'échelle du laboratoire. Les incitations à recycler vont dépendre en partie de la chimie des électrodes et des composés qui la composent. Si on se concentre sur les utilisations en mobilité, la technologie des batteries pour véhicules est différente de celles du petit électronique. Aujourd'hui les technologies se concentrent sur les NMC (et NCA), il y a également un fort gisement de batteries LFP en Chine.

<sup>66</sup> Chen et al. (2018). Le procédé consiste en un traitement hydrothermique de particules d'électrodes cyclées suivi d'un bref traitement de recuit. Les chercheurs ont construit de nouvelles batteries en utilisant les cathodes régénérées. La capacité de stockage de charge, le temps de charge et la durée de vie de la batterie ont tous été restaurés à leurs niveaux d'origine.



Figure 33 : Proportions des différentes technologies de batteries utilisées en Chine pour la mobilité électrique



Source : Wang (2017)

Tableau 17 : Revenus tirés de la revente du lithium recyclé selon la nature de la batterie

Type de batterie	Revenu total \$/t LIBs	Revenu Li \$/t LIBs (prix Li 2014)	% Li revenu (prix MP 2014)
LCO	8 850	1 000	10 %
LFP	1 230	600	50 %
LMO	840	750	90 %

Sources : Gaustad et al. (2014), auteurs

Le **Tableau 17** précédent illustre le fait que l'incitation à recycler est plus faible pour les LFP et LMO du fait d'un revenu moins élevé, les quantités de métaux variant significativement d'une technologie à une autre). Toutefois pour ces technologies, si le recyclage est mis en place, alors il est stratégiquement intéressant de récupérer le lithium qui constitue entre 50 % et 90 % du revenu. L'avantage du recyclage des batteries des VE est la concentration du gisement, beaucoup moins diffus que pour le petit électronique (de technologie LCO). Les économies d'échelle seraient donc plus faciles à mettre en place. A noter que le développement d'une unique technologie de batterie au lithium permettrait également de faire de réelles économies d'échelle lors du recyclage même si ce scénario est peu probable.

#### Questionnement stratégique sur le recyclage du lithium

Si aujourd'hui le lithium recyclé représente moins de 1 % de la production de lithium, ce taux pourrait évoluer dans le futur, notamment sous l'impulsion des pays producteurs de batteries qui restent dépendants de leurs approvisionnements extérieurs. Le recyclage du lithium pourrait avoir un rôle important à jouer dans la chaîne d'approvisionnement. Il permettrait d'éviter l'extraction de nouvelles ressources et pourrait également constituer un gisement d'emplois locaux tout en évitant les coûts de mise en décharge. Certaines études prennent en compte des taux élevés de recyclage du lithium dans les années futures (90 % en 2100 d'après Buchert et al., 2009). Il est attendu que certains pays, dont la Chine, développent rapidement des filières de recyclage afin de diminuer leur dépendance vis-à-vis de l'étranger. Ces filières pourraient constituer un enjeu stratégique, notamment en Europe.

### 4.4. L'évolution de la structuration du marché

#### 4.4.1. La montée en puissance des acteurs chinois

La production chinoise est assurée par une dizaine de producteurs, au sein desquels l'entreprise publique *Tianqi Lithium* et l'acteur privé *Jiangxi Ganfeng Lithium*, cotés à la bourse de Shenzhen ; ils font figure de concurrents sérieux face aux acteurs traditionnels occidentaux (The Big 3).

#### 4.4.1.1. Tianqi Lithium

Si la première usine de production de carbonate de lithium de *Tianqi* date de 1992, ce n'est qu'en 2012 que l'entreprise obtient sa première licence d'exploitation de spodumène dans la province du Sichuan. Depuis, elle n'a cessé de consolider sa position au niveau national et international, avec notamment le rachat de 20 % de la filiale de *Tibet Mineral Development*, puis de 51 % des parts de *Talison*, le plus important producteur australien. En 2015, *Tianqi* a acquis 100 % de l'usine de Jiangsu, qui était détenue par la compagnie *Galaxy Lithium* et 2,1 % des parts de la société *SQM*. En 2016, elle a acheté pour 400 millions de dollars, l'usine de transformation de Kwinana en Australie<sup>67</sup>. Aujourd'hui *Tianqi* est l'un des plus importants producteurs au monde de carbonate de lithium, de qualité batterie. L'entreprise dispose, en 2016, d'une capacité installée de 34 kt LCE et affiche un projet majeur de construction d'une nouvelle usine de production de 24 kt de LiOH, à Kwinana, en Australie.

#### 4.4.1.2. Jiangxi Ganfeng Lithium

Créée en 2000, l'entreprise *Ganfeng* est aujourd'hui l'une des principales compagnies du secteur de la transformation, avec une capacité installée de 30 kt de LCE par an. Elle produit ainsi plus d'une vingtaine de produits au lithium différents. Ses principaux débouchés sont les Etats-Unis, l'Allemagne, la Corée du Sud, les Pays-Bas et l'Inde. Elle a développé depuis 2007 la première ligne de production permettant de produire directement du chlorure de lithium ou du carbonate de lithium de qualité batterie depuis la saumure, c'est-à-dire sans passer par la qualité Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> technique. Dans un souci de sécurité d'approvisionnement, la société poursuit depuis quelques années, une politique d'intégration verticale en investissant dans l'activité d'extraction du lithium, notamment dans le projet de Mt Marion en Australie<sup>68</sup>. La société espère grâce à ce gisement doubler sa production à 60 kt LCE. Le groupe investit également en Argentine, via *Lithium Americas*, pour l'exploitation du salar de Cauchari-Olaroz (19,9 % de participation dans le projet actuellement<sup>69</sup> et 17,6 % de participation dans la société) et en partenariat avec la société canadienne *International lithium* dans l'exploration du salar Mariana.

### 4.4.2. Les nouveaux acteurs

A l'inverse des acteurs historiques, les nouveaux entrants ont des difficultés à accéder à des sources de financement et communiquent beaucoup sur les marchés. Il existe depuis maintenant 9 ans un sommet sur le lithium (Lithium Supply and Market Conference) dont les principaux acteurs sont représentés par ces nouvelles sociétés, moins rodées aux réglementations minières régionales et ne disposant pas nécessairement des technologies spécifiques au secteur. Depuis 2010, elles ont exploré un grand nombre de concessions et ont parfois mené leurs explorations jusqu'aux études de faisabilité. L'intensité capitalistique du secteur, notamment pour l'exploitation des gisements rocheux, reste un frein à leur développement. En effet, elles ont généralement peu d'activités autour du lithium qui auraient pu leur apporter des revenus complémentaires, comme c'est le cas pour les acteurs historiques. Ainsi dans de nombreux cas, les concessions prometteuses sont en partie rachetées par l'un des Big 4 (Big 3 + Tianqi). De plus en plus, les juniors sont également conduites à s'associer pour investir dans les infrastructures de production (mise en production du gisement de Mt Marion par *Neometals* et *Mineral Resources* par exemple). L'émergence de ces nouveaux acteurs<sup>70</sup> va de pair avec le développement des nouvelles technologies d'extraction permettant de diminuer les coûts et le temps de production.

### 4.4.3. Consolidation et partenariat

Le nombre important de joint-ventures et de partenariats entre les acteurs sur les différents gisements, traduit l'attractivité du marché du lithium à l'heure actuelle et la volonté d'une présence à l'échelle internationale. Les producteurs tendent à s'intégrer sur la chaîne de valeur depuis l'extraction jusqu'à la production des composés chimiques finaux (carbonate ou hydroxyde de lithium). Les acteurs chinois se sont consolidés notamment en

---

<sup>67</sup> KPMG, *Demystifying Chinese Investment in Australia* (2017).

<sup>68</sup> Elle y détient 43 % des parts (en partenariat avec *Mineral Resources* et *Neometals*).

<sup>69</sup> Financial Times, «*China's Ganfeng steps up lithium push with Argentine deal*», janvier (2017).

<sup>70</sup> Les nouveaux acteurs qui sont aujourd'hui les plus à même de développer des projets et de prendre des parts de marché sont nombreux : *Orocobre* (AR), *Neometals* (AU), *Mineral Resources* (AU), *Lithium Americas* (CA), *Eramet* (FR), *Altura Mining* (AU), *Galaxy Resources* (AU), *Pilbara Metals* (AU), etc. *Galaxy Resources* est présente en Argentine, en Australie, et au Canada. Elle détient 100 % des parts de ces différents gisements et a récemment acquis *General Mining*. *Orocobre*, société argentine, opère en Argentine sur le salar de Cauchari-Olaroz en *Joint-ventures* (JV) avec *Toyota Tsucho* et le gouvernement provincial. La société canadienne *Nemaska Lithium*, a été créée en 2010 après avoir découvert du lithium dans la région de James Bay alors qu'ils exploitaient du nickel à proximité. *Lithium Americas* (ex *Western Lithium USA Corp.*) est quant à elle une société canadienne focalisée sur le développement de deux projets de lithium (salar de Cauchari-Olaroz en Argentine et Kings Valley). On retrouve également les jeunes sociétés australiennes *Neometals* et *Mineral Resources* sur l'exploitation du gisement de Mt Marion en Australie depuis janvier 2017 au côté du chinois *Ganfeng*.





investissant dans l'extraction du lithium à travers le monde et ont, en l'espace de 3 ans, affirmé une position de leader dans le secteur. Certaines entreprises comme *Orocobre* tirent également leur épingle du jeu avec des projets ambitieux, notamment en Argentine. De manière générale les interdépendances entre acteurs sont visibles au travers du nombre important de Joint-Ventures observés, particulièrement ces dernières années.

**Tableau 18 : Partenariats entre les entreprises du secteur**

Partenariats forts	Nouveaux Partenariats	Echecs de Partenariats
Orocobre – Toyota Tsusho	Lithium Americas – Ganfeng – Bangchak	Lithium Americas – Mitsubishi – Magma Corp
Neometals - Mineral Resources - Ganfeng	Pilbara - Ganfeng	Galaxy - KORES
Lithium Americas - SQM	Pilbara – General Lithium	

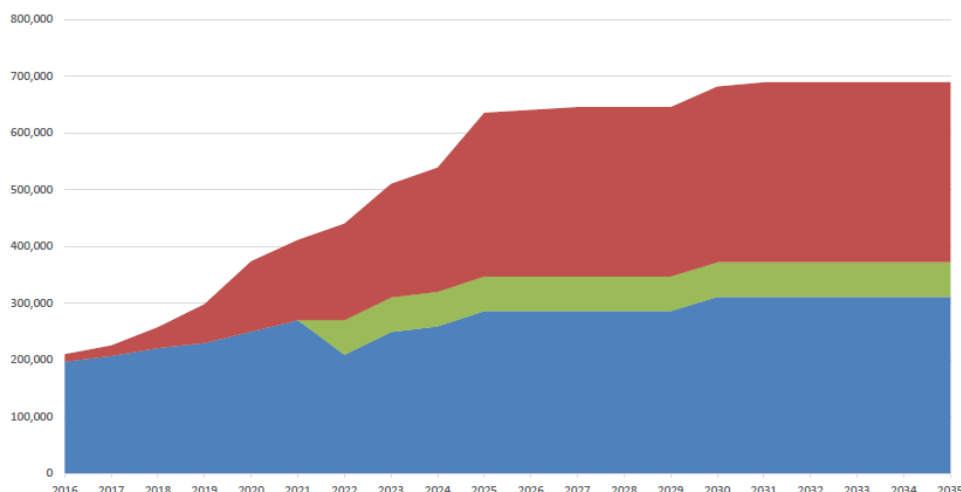
Source : auteurs sur la base des rapports annuels des sociétés

Ces collaborations semblent motivées par des raisons *a priori* économiques pour les jeunes entreprises et plutôt stratégiques pour les acteurs historiques qui consolident leurs positions sur le marché.

#### 4.4.4. L'offre future de lithium

En prenant en compte les annonces des entreprises du secteur, une dizaine de nouveaux gisements devrait être exploitée en 2018. Le futur approvisionnement en lithium proviendrait ainsi de quelques projets principaux relayés dans le **Tableau 19**. D'après les chiffres annoncés par les nouvelles entreprises, ce serait entre 350 et 450 kt LCE (soit 65-85 kt de lithium) qui pourraient arriver sur le marché dans les 3 prochaines années. Il faut cependant noter que la plupart des chiffres concernent des capacités de production et non des productions effectives. Au regard de la production publiée par l'USGS en 2016 (35 kt de lithium, soit un équivalent de 185 kt de carbonate de lithium), ce serait un triplement de la production. Et pourtant les experts du domaine restent assez pessimistes pour l'approvisionnement en lithium à court terme (notamment en 2018). Du point de vue des acteurs, la majorité des projets crédibles annoncés dépassent les 15 kt LCE/an et sont portés en partie par de jeunes acteurs comme *Lithium Americas*, *Orocobre* ou *Galaxy Resources*.

**Figure 34 : Estimation des capacités de production (t LCE) entre 2016 et 2035 ; producteurs actuels (bleu), SQM (vert), Nouveaux arrivants (Rouge)**



Source : SignumBox (2017)

**Tableau 19 : Recensement des principaux projets de lithium avec une mise en production entre 2016 et 2020 (gris : mines seulement, bleu : intégration activités de transformation)**



Pays	Projet – Gisement (nature)	Exploitant (nationalité)	Début du projet	Statut	Mise en service prévue	Production annuelle estimée (LCE)
Argentine	Salar del Rincon (Saumure)	ADY Resources (Enirgi Group - AU)	1989	Pilote	2018	50kt (25ans)
Argentine	Salar de Cauchari-Olaroz (saumure)	JV Lithium Americas (CA) /SQM (CL) (50/50) + apport financier de Ganfeng (CH) en janvier 2017 Procédé POSCO	2009	Construction	2019	1 <sup>ère</sup> phase : 25kt 2 <sup>ème</sup> phase : 25kt
		Orocobre (AR) (+ discussion de JV avec Advantage Lithium (CA))	2007	Phase 1 : Production commerciale Phase 2 : pilote	Phase 1 : 2016 Phase 2 : 2018	Phase 1 : 17,5kt (40ans) Phase 2 : 22,5kt
Argentine	<u>Sal de Diabillios - salar de los Angeles (saumure)</u>	JV Aberdeen International(CA) /Lithium X Energy (CA) (50/50)	2015	Pré-étude de faisabilité	2020+-	15-25kt (>20ans)
Argentine	<u>Salar de Centenario-Ratones (Saumure)</u>	Eramet (FR)	2010	Etude de faisabilité définitive	Mi-2017	15-25kt (30ans)
Argentine	<u>Sal de Vida - Salar del Hombre Muerto (saumure)</u>	Galaxy Resources (AU)	-	Etude de faisabilité définitive	2020+	25kt (40ans)
Argentine	Salinas Grandes (saumure)	Orocobre (AU)	2007	Pré-étude de faisabilité	2020+	10kt
Argentine	3Q - Province de Catamarca (saumure)	<u>Neo Lithium (CA) – Procédé POSCO</u>	2015	Pré-étude de faisabilité	2019	-
Australie	Mt. Cattlin (spodumène)	Galaxy Resources (AU)	2007	Production commerciale	2016	20kt
Australie		Pilbara Minerals (AU) / General Lithium (CH)	2014	Pilote	Q1 2018	44kt (15ans)

	Pilgangoora (spodumène)	Altura Mining (AU)	2014	Pilote	Q4 2017	36kt (12ans)
Australie	Mt Marion (spodumène)	NeoMetals (AU) / Mineral Resources (AU) / Ganfeng (CH) (27/30/43)	2009	Production commerciale	2017	27kt
Bolivie	Salar d'Uyuni (saumure)	Gouvernement bolivien (COMIBOL)	-	Pilote	2019	30kt
Canada	Projet Rose – Québec (spodumène)	Critical Element Corporation (CA)	2011	Pré-étude de faisabilité	-	26kt (17ans)
Canada	Mines de Whabouchi – James Bay (spodumène)	Nemaska Lithium (CA) + financement chinois	2010	Construction	Q3 2018	28kt
Chili	Salar de La Negra	Albemarle (US) en mémorandum avec le gouvernement	-	Construction	Q4 2017	36kt (extension du salar d'Atacama)
Chili	Salar de Maricunga (saumure)	Li3 (US) / Wealth Mineral (CA)	2004	Pré-étude de faisabilité	-	-
Etats-Unis	Kings Valley (argile)	Lithium Americas (CA)	2007	Etude de faisabilité définitive	2019	12,5-25kt
Mexique	Projet Sonora - Argiles de Bacanora	Bacanora Minerals (détenu à 20% par Rare Earth Minerals (GB))	2007	Etude de faisabilité définitive	2018	17,5-35-50kt
Serbie	Jadar (jadarite)	Rio Tinto (AU – UK)	2009	Pilote	2020+	50kt

Source : sites des producteurs

## 5. Modélisation prospective du marché du lithium

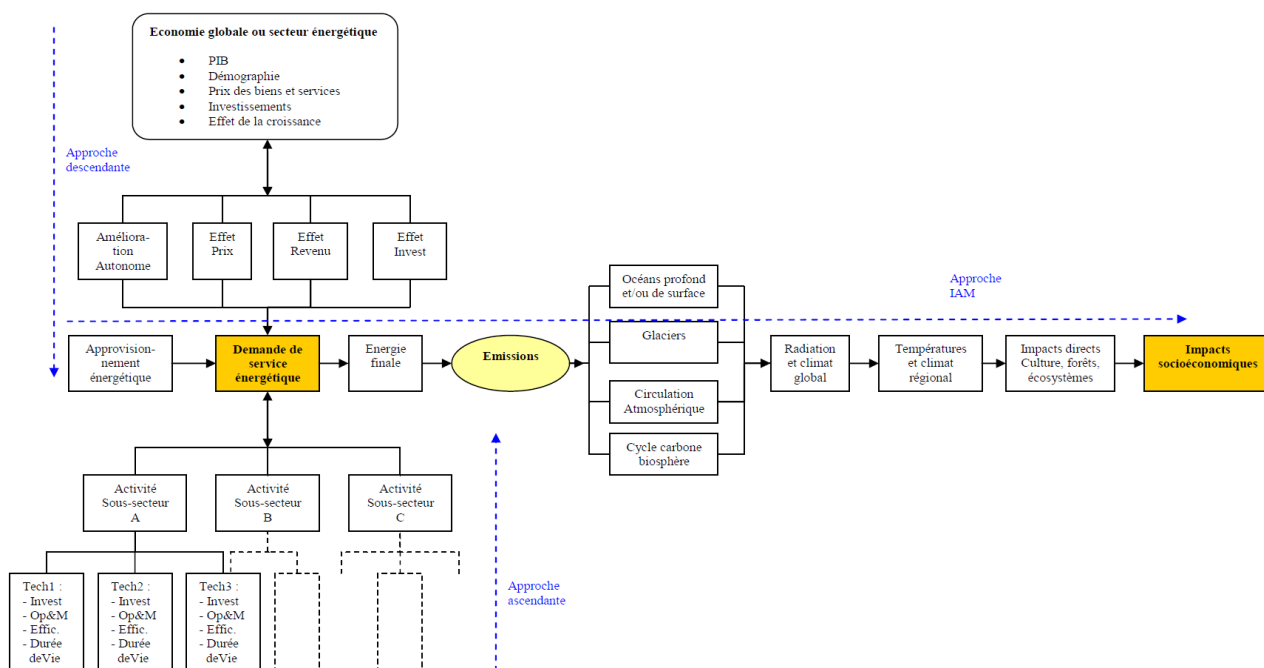
L'ensemble des informations collectées dans notre phase d'analyse du marché du lithium a été intégré dans notre travail de modélisation. Il permet ainsi de préparer en amont l'analyse de la contribution du secteur du transport dans l'évolution du marché du lithium en fonction des politiques énergétiques et environnementales mondiales, actuelles et futures. Comment évolueraient les échanges internationaux de lithium avec la pénétration croissante de véhicules électriques dans le monde ainsi que les mix de production par région ? Quel serait le niveau de criticité du lithium et comment quantifier l'impact du secteur transport à l'horizon 2050 ?

Lorsque l'on décide de recourir à la modélisation pour l'analyse énergétique, la question du choix du modèle est parmi les plus délicates. Il n'y a pas de modèle capable de répondre à toutes les questions prospectives offrant une approche cohérente et détaillée de tous les aspects. Par conséquent, les besoins et objectifs variés ont mené au développement de nombreux modèles énergétiques. Boulanger et Bréchet (2003) ont distingué six classes de modèles : Modèles macro-économétriques, modèles multi-agents, modèles d'équilibre général calculable (MEGC), modèles bayésiens, modèles d'optimisation et les modèles de systèmes dynamiques. Une autre distinction inhérente au paradigme les subdivise en trois grandes familles (**Figure 35**) : IAM (Integrated Assessment Models),



modèles économiques avec une approche descendante (modèle "Top-Down"), et enfin les modèles technologiques avec une approche ascendante ("Bottom-Up" models).

Figure 35 : Schéma explicatif des différentes approches



Source : Assoumou E. (2006)

L'analyse de la criticité du lithium requiert la combinaison d'analyses au niveau régional et international. L'objectif principal est de développer un modèle d'optimisation global permettant d'étudier le marché du lithium du système global (énergie-environnement-économie) avec une évolution de coûts des différentes options du secteur transport au niveau mondial. Notre choix s'est donc tourné vers une approche intégrée (IAM), et plus exactement le modèle TIAM (TIMES Integrated Assessment Model), pour sa flexibilité et une haute désagrégation technologique. Il sied particulièrement bien à des exercices de prospective permettant de comprendre les facteurs économiques, technologiques et géopolitiques pouvant influencer l'évolution du secteur transport au niveau mondial, duquel le marché du lithium peut fortement dépendre.

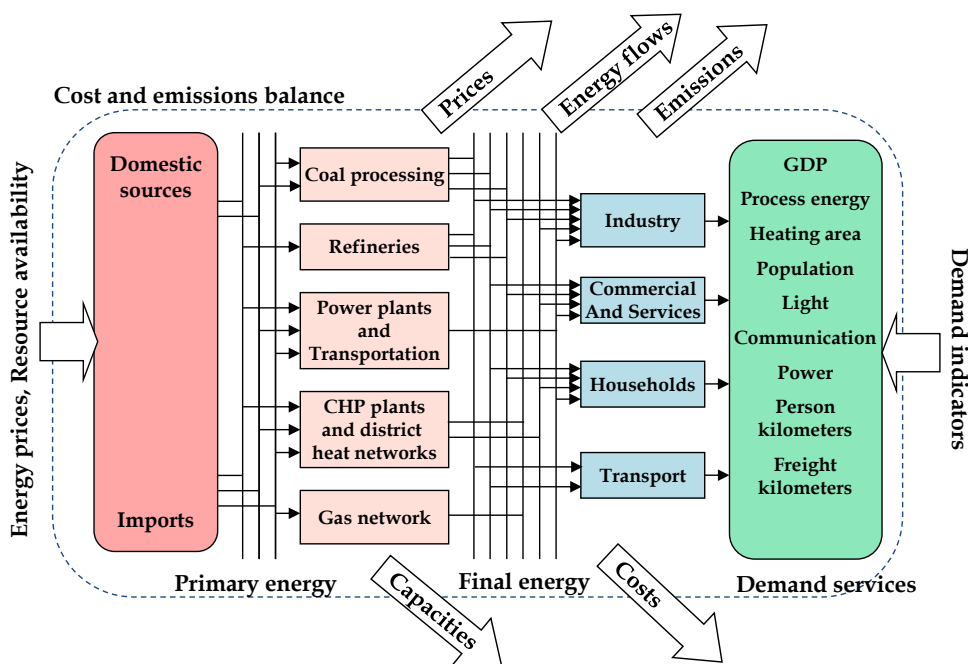
### 5.1. Modèle mondial TIAM-Transport

TIMES<sup>71</sup> (The Integrated Markal-EFOM system), successeur de MARKAL (MARKet ALlocation) est un générateur de modèle caractérisé par une approche ascendante fondée sur une optimisation de coûts. TIMES Integrated Assessment Model (ETSAP-TIAM) est l'incarnation mondiale multirégionale du générateur de modèle TIMES.

TIAM est un modèle représentant tout le système énergétique, appelé système énergétique de référence (SER), couvrant des ressources énergétiques et matières premières jusqu'aux secteurs d'usages finaux en passant par le secteur de conversion de ces ressources (**Figure 36**).

<sup>71</sup> Développé en 1997 par l'ETSAP (Energy Technology Systems Analysis Programme) comme le successeur des anciens générateurs MARKAL et EFOM, en ayant les mêmes fonctionnalités que ses prédécesseurs, avec de nouvelles fonctionnalités facilitant ainsi la compréhension des systèmes. L'ETSAP est l'organisation mise en place pour la gestion, le développement et l'organisation des modèles de la famille MARKAL créée en 1976 par l'AIE (Agence Internationale de l'Energie).

Figure 36 : Système Energétique de Référence (SER)



Source : Remme et al. (2001)

La fonction objectif, qui représente le coût total du système actualisé sur l'horizon considéré, est le critère qui est minimisé par le modèle via une programmation linéaire.

Tableau 20 : Les différentes régions considérées dans le modèle TIAM

Regions	Countries
Africa (AFR)	Algeria, Angola, Benin, Cameroon, Congo, Congo Republic, Egypt, Ethiopia, Gabon, Ghana, Ivory Coast, Kenya, Libya, Morocco, Mozambique, Nigeria, Other Africa, Senegal, South Africa, Sudan, Tanzania, Tunisia, Zambia, Zimbabwe
Australia and New Zealand (AUS)	Australia and New Zealand
Canada (CAN)	Canada
China (CHI)	China
Central and South America (CSA)	Argentina, Bolivia, Brazil, Chile, Colombia, Costa Rica, Cuba, Dominican Republic, Ecuador, El Salvador, Guatemala, Haiti, Honduras, Jamaica, Netherlands Antilles, Nicaragua, Other Latin America, Panama, Paraguay, Peru, Trinidad-Tobago, Uruguay, Venezuela
India (IND)	India
Japan (JAP)	Japan
Middle-East (MEA)	Bahrain, Iran, Iraq, Israel, Jordan, Kuwait, Lebanon, Oman, Qatar, Saudi Arabia, Syria, Turkey, United Arab Emirates, Yemen
Mexico (MEX)	Mexico
Other Developing Asia (ODA)	Bangladesh, Brunei, Chinese Taipei, Indonesia, North Korea, Malaysia, Myanmar, Nepal, Other Asia, Pakistan, Philippines, Singapore, Sri Lanka, Thailand, Vietnam
South Korea (SKO)	South Korea
USA (USA)	United States of America
Western Europe (EUR)	Austria, Belgium, Bulgaria, Croatia, Cyprus, Czech Republic, Denmark, Estonia, Finland, France, Germany, Greece, Greenland, Hungary, Iceland, Ireland, Italy, Latvia, Lithuania, Luxembourg, Malta, Netherlands, Norway, Poland, Portugal, Romania, Slovakia, Slovenia, Spain, Sweden, Switzerland, United Kingdom
Russia (RUS)	Russia
Central Asian Caucase (CAC)	Armenia, Azerbaijan, Georgia, Kazakhstan, Kyrgyzstan, Tajikistan, Turkmenistan, Uzbekistan
Other Eastern Europe (OEE)	Albania, Belarus, Bosnia-Herzegovina, Macedonia, Montenegro, Serbia, Ukraine, Moldova

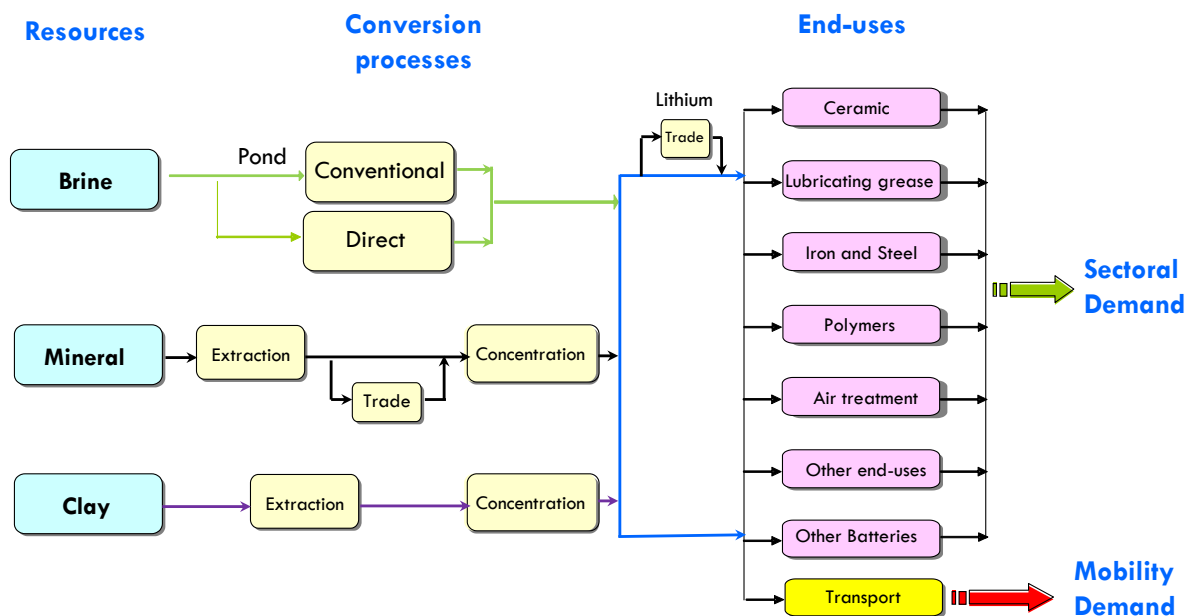
TIMES est un modèle d'équilibre partiel en ce sens qu'un seul marché est étudié, isolément des autres. Cela implique deux choses : d'une part, qu'une modification des conditions d'offre et de demande sur ce marché ne



modifie pas les autres marchés et, d'autre part, qu'une modification des conditions sur les autres marchés n'influence pas le marché étudié « *Ceteris Paribus* »<sup>72</sup>.

TIAM est subdivisé en 16 régions (Tableau 20) où chaque région a son propre système énergétique ainsi que son secteur de transport. Chaque région peut effectuer des échanges de ressources fossiles, de biomasse, de matériaux ou de permis d'émission avec d'autres régions ou dans un marché centralisé. Ainsi, le modèle décrit totalement à l'intérieur de chaque région toutes les technologies existantes et futures de l'offre (ressources primaires) à la demande en passant par les différentes étapes de conversion (Figure 37).

Figure 37 : Description détaillée du lithium dans chaque région TIAM



Source : auteurs

Les différentes demandes finales sont liées à des drivers exogènes tels que la croissance de la population et/ou l'évolution du PIB ou la croissance sectorielle. Les échanges inter-régionaux dépendront de l'évolution de la demande, de la disponibilité et des coûts des ressources (offre). Dans cette version ETSAP-TIAM d'IFPEN, l'accent a été mis sur le développement du module Transport au niveau mondial avec un niveau de désagrégation très élevé et des évolutions technologiques comme nous le verrons dans la partie suivante.

## 5.2. Scénarios et hypothèses

Les résultats dérivent de 5 scénarios sur une période d'étude de 2005 à 2050. Ces scénarios ont été définis dans l'optique d'observer l'impact du profil technologique automobile en réponse à des contraintes énergétiques ou de mesures incitatives sur le marché du lithium :

- **BAU "Business As Usual"**, C'est le scénario de référence, dans lequel on considère qu'aucune nouvelle mesure n'est adoptée dans le futur. La tendance actuelle se poursuit dans le futur. Ce scénario permet ainsi de mesurer l'impact d'une nouvelle politique dans des scénarios alternatifs.
- **Scen\_NoTherm2040** : C'est le scénario dans lequel est implantée la fin de la commercialisation des voitures thermiques émettant des gaz à effet de serre (GES) d'ici 2040, un objectif déjà annoncé dans certains pays émergents (Chine, Inde) ou européens (France, Royaume-Uni). Nous faisons donc l'hypothèse d'un retrait total des véhicules particuliers thermiques (essence et diesel) dans le monde à partir de 2040 dans notre scénario. Comme stipulé précédemment, notre objectif est l'étude de la criticité dans les scénarios prospectifs. Ceci explique le choix d'un scénario avec des objectifs plus ambitieux que les annonces faites sur les véhicules thermiques à l'heure actuelle dans de nombreux pays, afin d'étudier le stress sur l'approvisionnement en lithium engendré.

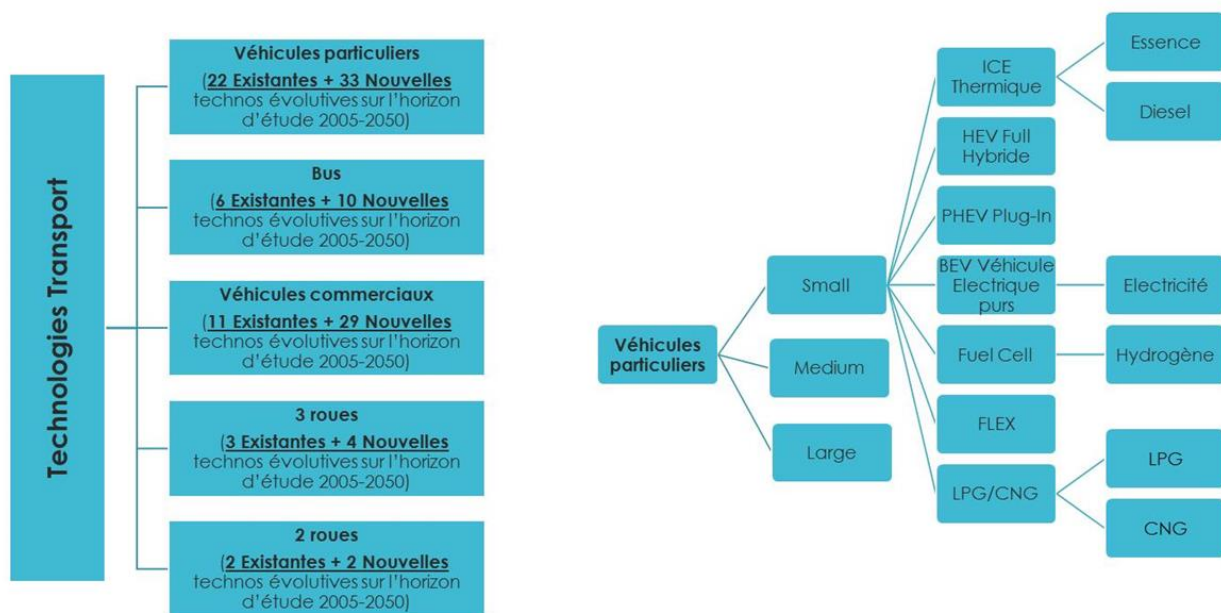
<sup>72</sup> Toutes choses égales par ailleurs

- **Scen Facteur 2 et Scen Facteur 4** : Afin d'évaluer l'impact des évolutions du secteur transport sur la criticité du lithium, nous avons élaboré des scénarios très contraignants d'émissions de CO<sub>2</sub>. En effet, dans ces deux scénarios, nous supposons respectivement une division par 2 et 4 des émissions de CO<sub>2</sub> par rapport au niveau 2005 dans toutes les régions du monde à l'horizon 2050<sup>73</sup>. Cela permettra d'observer le stress que pourrait créer le développement de la filière électrique sur le marché du lithium. Il est intéressant de noter que ces deux scénarios sont proches en termes d'objectifs de décarbonation du secteur transport des deux scénarios de l'AIE 2DS et le B2DS<sup>74</sup> figurant dans l'ETP<sup>75</sup> 2017. En effet, dans ces derniers, des diminutions d'émissions de GES respectivement d'environ 54 % et 83 % en 2060 par rapport à 2015 ont été obtenues (ETP, 2017).
- Et enfin, un dernier scénario appelé **Scen Facteur 4 SubEV** où on rajoute une politique publique fondée sur une subvention des véhicules électriques au niveau mondial dans le scénario facteur 4 mentionné plus haut.

Dans notre module Transport de TIAM, nous avons représenté environ **515 technologies véhicules** (220 véhicules particuliers (VP), 66 bus, 185 véhicules commerciaux (VC) subdivisés en légers, poids lourds et moyens, 27 technologies 3 roues et enfin 14 technologies 2 roues (**Figure 38**).

La représentation des technologies fait appel à une connaissance précise du secteur transport dans chaque segment (VP, VC, Bus et 2/3 roues). Les technologies existantes sont caractérisées par leur capacité installée existante (stock) en milliers d'unités de véhicules. Nous avons pris en compte pour toutes les technologies de chaque segment, sur tout l'horizon d'étude i.e. 2005-2050, l'efficacité<sup>76</sup>, le facteur de disponibilité annuelle<sup>77</sup>, la durée de vie, les coûts (coût d'achat, coûts fixes et variables) etc., et éventuellement les paramètres inhérents aux orientations stratégiques tels que les taxes, les subventions...etc.

**Figure 38 : Subdivision des technologies de IFPEN TIAM-Transport**



Source : auteurs

<sup>73</sup> Nous avons considéré dans les deux scénarios une évolution identique jusqu'en 2030 i.e. diminution de 10% et 30% respectivement en 2020 et 2030 des émissions par rapport à au niveau de 2005. Ensuite dans le cas du facteur 2, on a une décroissance comme suite : -40% et -50% en 2040 et 2050 respectivement. Et enfin pour le facteur 4, une contrainte environnementale plus forte : -60% et -75% pour 2040 et 2050.

<sup>74</sup> Le scénario 2DS est de limiter l'augmentation de la température moyenne globale à 2°C et le B2DS repose sur les ambitions de l'accord de Paris (COP21) qui correspond à une limitation de la montée de cette température à 1,75°C.

<sup>75</sup> Energy Technology Perspectives.

<sup>76</sup> L'efficacité peut être interprétée ici comme le nombre de kilomètres que peut parcourir un véhicule avec 1 PJ d'énergie.

<sup>77</sup> Le facteur de disponibilité annuel représente la distance moyenne parcourue par un véhicule en une année.





Les paramètres susmentionnés, les évolutions techniques des différents types de motorisation (Thermique, Hybride, Electrique et mix de technologies) et les évolutions des coûts d'usage véhicule proviennent de l'exploitation de données de l'AIE sur le transport et des modèles BEAVeR<sup>78</sup> et FSIM<sup>79</sup> développés par IFPEN.

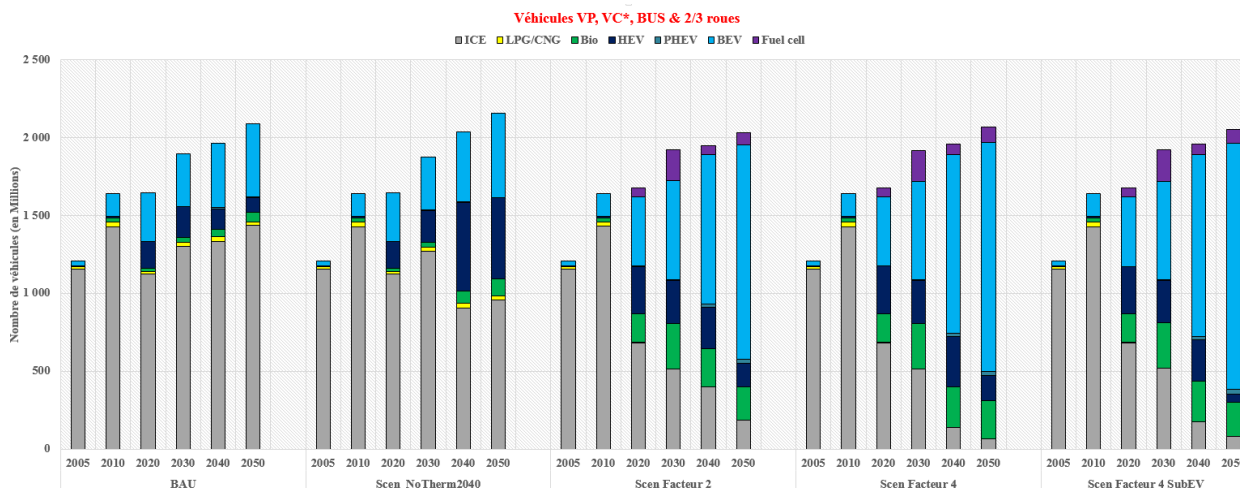
FSIM permet d'étudier les dynamiques du marché des véhicules particuliers, les effets d'une vaste gamme d'instruments et de politiques publiques et d'évaluer les impacts environnementaux (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, particules) de ces politiques. FSIM est axé sur les comportements des individus en ce sens qu'il simule les modifications de comportement des consommateurs en réponse à un changement de conditions économiques. BEAVeR, quant à lui, est un modèle permettant de calculer et de comparer le coût de possession et d'utilisation de différents véhicules routiers, que ce soit des véhicules particuliers, des véhicules utilitaires, des bus ou des poids lourds. Ce calcul pourra être réalisé aussi bien pour différentes configurations de tailles que de motorisations et d'usages, sur la base de la matrice de cas d'études préalablement élaborée.

### 5.3. Principaux résultats issus de la modélisation du lithium au niveau mondial

#### 5.3.1. Evolution du parc mondial de véhicules

L'analyse des résultats est faite sur la période 2005-2050 par pas de 10 ans. La **Figure 39** présente l'évolution du parc mondial de véhicules incluant les 2/3 roues par type de motorisation pour les 5 scénarios considérés. On atteint ainsi un parc d'un peu plus de 2 milliards de véhicules à l'horizon 2050 dans tous les scénarios. Dans le scénario BAU, on constate que le thermique est toujours la motorisation prépondérante pour plus de deux tiers du parc. Néanmoins, il y a une pénétration progressive des filières full hybride (HEV) et électriques purs (BEV) à partir de 2020 passant respectivement de 10,3 % et 19 % en 2020 à 4,5 % et 22,6 % à l'horizon 2050. Lorsqu'on contraint le modèle avec une disparition totale des moteurs thermiques (Essence et Diesel) à partir de 2040, on constate une substitution des thermiques par le mix de motorisation suivant : 12,3 % de BEV, 77,9 % de HEV, 8,6 % de biocarburants et 1,2 % de LPG/CNG. Ainsi la part du HEV atteint 28 % et 24 % du parc mondial en 2040 et 2050.

Figure 39 : Evolution du parc mondial par scénario



\*VP : Véhicules Particuliers; VC : Véhicules Commerciaux ; ICE : Véhicules thermiques essence et diesel ; HEV : Véhicules hybrides non rechargeables; PHEV : Véhicules hybrides rechargeables (Plug-in) ; BEV : Véhicules électriques purs

Pour les 2 scénarios avec des objectifs de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> très ambitieux, les véhicules thermiques sortent progressivement jusqu'à atteindre respectivement 9 % et 3 % du parc dans les facteurs 2 et 4 alors que les véhicules électriques purs suivent une tendance inverse (67 % et 71 % du parc mondial). Dans ces scénarios, on constate la pénétration de véhicules à pile à combustible hydrogène à partir de 2020 avec un pic en 2030 (environ 10 % dans les deux scénarios facteur 2 et 4). En effet, une réduction de 30% des émissions de CO<sub>2</sub> en

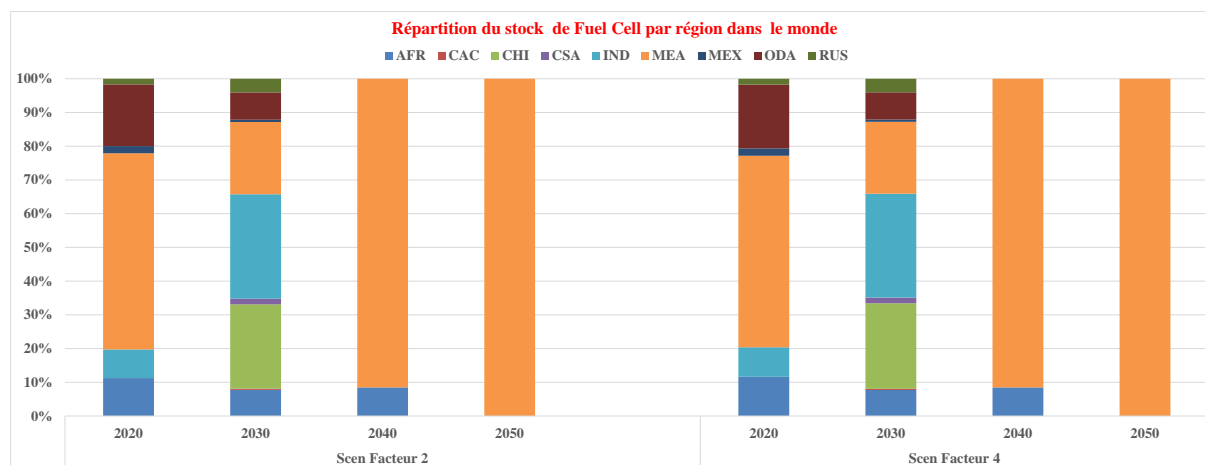
<sup>78</sup> Bilan Economique et ACV des Véhicules Routiers.

<sup>79</sup> Fleet Simulator est un modèle de simulation intégré.



2030 par rapport au niveau de 2005 du scénario BAU reviendrait à une réduction d'environ 65% des émissions par rapport au niveau de 2030 du scénario BAU<sup>80</sup>.

**Figure 40 : Véhicules pile à combustible dans le monde dans les scénarios Facteur 2 et 4**



Du fait de coûts d'abattement excessivement élevés, la filière hydrogène à partir du reformage de gaz naturel devient donc compétitive dans la plupart des régions ayant des réserves importantes de gaz<sup>81</sup>. C'est dans la région MEA (Moyen-Orient) (**Figure 40**) qu'on observe la plus forte pénétration mais aussi dans les régions Chine (CHI), Inde (IND), Afrique (AFR), Autres pays développés d'Asie (ODA) et Russie (RUS). Le cas du Moyen-Orient pourrait s'expliquer par un secteur électrique actuel composé de centrales thermiques au pétrole ou au gaz<sup>82</sup>.

Cela signifierait donc, pour des objectifs environnementaux ambitieux, que cette filière hydrogène pourrait être une filière d'avenir dans ces pays au vu de leurs ressources. De plus, nous remarquons que les tendances des FCEV suivent celles des prévisions de production de gaz naturel observées dans le WEO 2017 dans ces régions, avec une forte augmentation à l'horizon 2040. Au vu des résultats, la pénétration de la filière hydrogène pourrait être considérée comme un facteur de relaxation de la criticité. La baisse des coûts des véhicules électriques, et donc leur déploiement, a pour conséquence de limiter la pénétration de la filière hydrogène par la suite jusqu'en 2050.

En faisant un focus sur le parc de véhicules électriques purs (incluant véhicules particuliers, bus et véhicules commerciaux), le déploiement de la filière électrique devrait être compris entre 20 et 25 millions de véhicules en 2020, entre 40 et 50 millions en 2030 et entre 200 et 650 millions en 2040 (**Figure 41 (a)**). En ne considérant que les véhicules particuliers, on devrait atteindre entre 30 et 35 millions d'unités en circulation en 2030 et entre 150 et 550 millions de véhicules en 2050 (**Figure 41 (b)**). Ces prévisions sont du même ordre de grandeur que celles de l'AIE dans le Global EV Outlook 2017 où ils estiment le nombre de VP entre 9 et 20 millions en 2020 et entre 60 et 200 millions en 2030 selon les scénarios.

<sup>80</sup> L'arrêt de la recherche sur l'amélioration des performances des moteurs thermiques a été bien pris en compte dans notre modèle. En effet, ces améliorations atteignent une asymptote à partir de 2030.

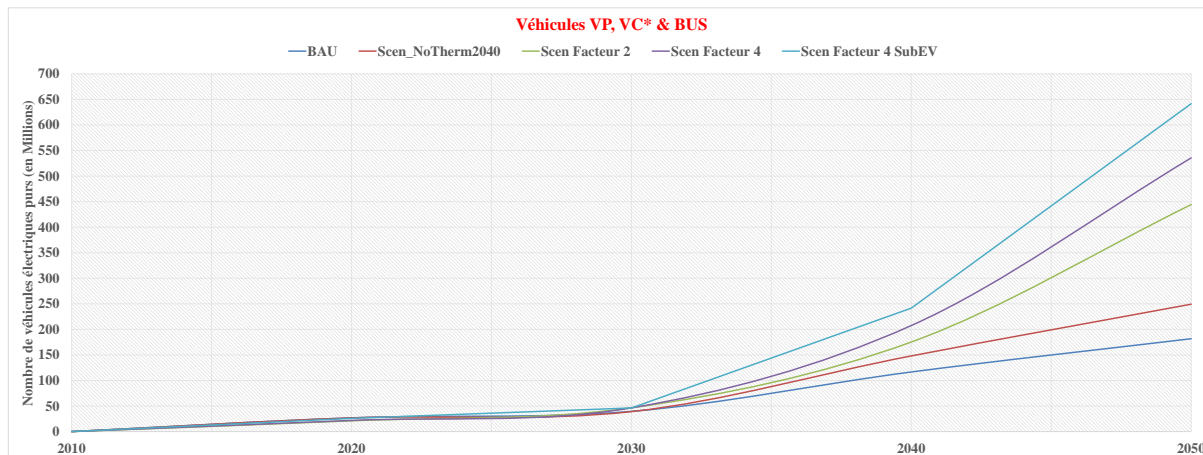
<sup>81</sup> En effet, la réduction des émissions n'est appliquée que sur le secteur du transport i.e. à l'usage final. Nous avons effectué les cas d'étude sur une réduction forte des émissions du secteur transport sans prendre en compte l'amont et/ou les autres secteurs (électrique etc...). Encore une fois, on analyse le niveau de criticité du lithium et surtout notre modèle est une aide à la décision qui permettra de mettre en exergue l'impact d'objectifs très ambitieux sur les principales régions du lithium, d'où l'étude de ces scénarios de façon spécifique.

<sup>82</sup> En l'évolution de ce secteur électrique avec les contraintes environnementales pourrait permettre une diversification vers plus de production d'hydrogène.

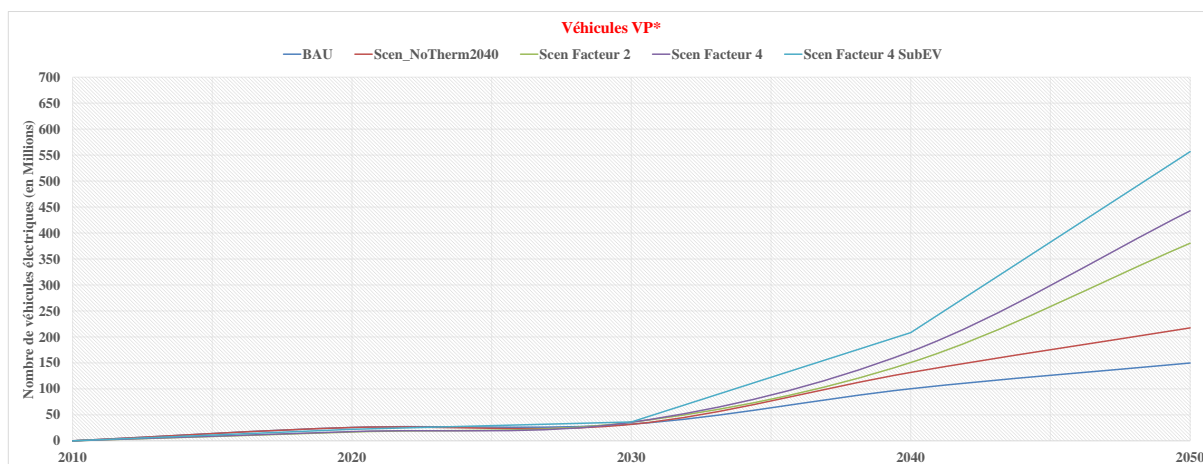


**Figure 41 : (a) Déploiement des véhicules électriques purs incluant VP, VC\* et BUS par scénario (b) Déploiement des véhicules électriques purs dans les VP\* par scénario**

(a)



(b)



\*VP : Véhicules Particuliers; VC : Véhicules Commerciaux

La mise en place d'une subvention des véhicules particuliers électriques purs de l'ordre de 20 % du coût d'achat permet un déploiement d'environ 110 millions d'unités supplémentaires. Ainsi, des politiques environnementales ambitieuses axées directement sur les émissions des véhicules et couplées à des subventions aideraient au déploiement de la filière électrique.

### 5.3.2...Quel impact sur le marché du lithium ?

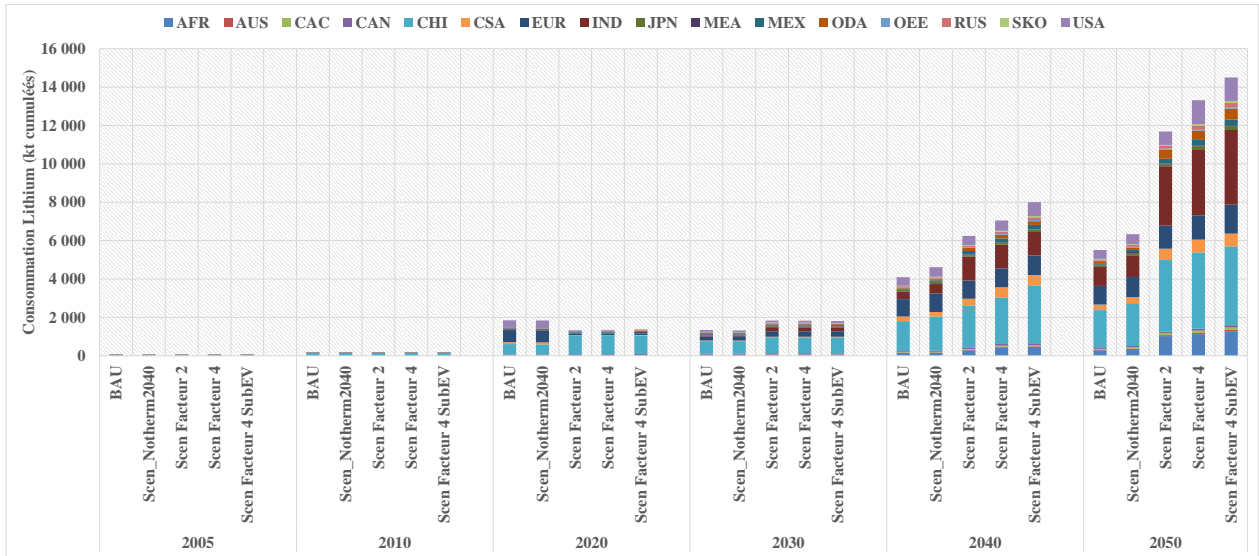
L'évolution de la consommation de lithium suit les mêmes tendances que celle de la pénétration des véhicules électriques (Hybrides inclus). La **Figure 42** (a) désagrège cette consommation par région. La demande totale de lithium à l'horizon 2050 est estimée à un peu plus de 14 millions de tonnes.

Cette demande est globalement tirée par les régions Inde, Chine et Europe avec respectivement environ 26 %, 30 % et 10 % de la consommation. La forte consommation des régions Inde et Chine provient du déploiement des 2/3 roues électriques purs en plus des véhicules particuliers basés exactement sur le paradigme « Eviter, Changer, Améliorer »<sup>83</sup> développé par l'AIE. Le continent Africain n'est pas en reste non plus, avec un poids non négligeable (environ 8 %) dans la consommation mondiale de lithium du fait du développement de la filière électrique (véhicules particuliers et 2 roues) à l'horizon 2050.

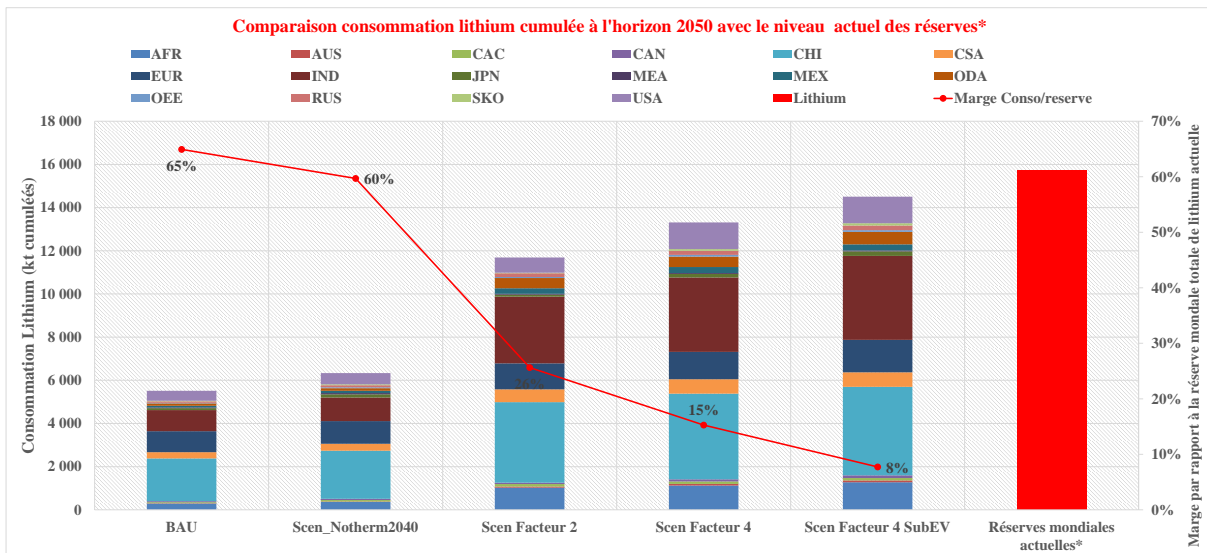
<sup>83</sup> « Eviter » qui repose sur une diminution de la demande de mobilité (passager km ou tonne km) ou de la distance moyenne annuelle parcourue. « Changer » en utilisant d'autres moyens de mobilité pour baisser les émissions et enfin les stratégies d'amélioration des véhicules en termes de rendement...etc.

**Figure 42 : (a) Evolution de la consommation mondiale cumulée de lithium par région (b) Comparaison de la consommation cumulée de lithium à l'horizon 2050 avec les réserves mondiales actuelles**

(a)



(b)



\* Les réserves de la Bolivie n'ont pas été prises en compte dans les réserves mondiales actuelles

La comparaison de l'évolution de cette consommation de lithium sur la période 2005-2050 par rapport au niveau actuel des réserves<sup>84</sup> nous renseigne sur le niveau de criticité du lithium. En effet la **Figure 42 (b)** montre à l'horizon 2050 une marge assez faible entre la demande de lithium et les réserves actuelles lorsqu'on met en place les objectifs ambitieux de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> du transport par rapport au niveau 2005 figurant dans le scénario facteur 4. On passe ainsi d'une marge de manœuvre de 65 % sur le scénario BAU à 8 % sur le scénario facteur 4 avec subventions.

### 5.3.3...et la dimension géopolitique ?

Les résultats obtenus lors de la modélisation prospective du marché du lithium à l'horizon 2050 mettent en exergue l'importance des immenses réserves de salar dans la région CSA Amérique Sud et Centrale (où l'on trouve le triangle du lithium : Argentine, Chili et Bolivie) dans le futur. Les **Figure 43 (a), (b) et (c)**<sup>85</sup> présentent le mix de

<sup>84</sup> Sans la prise en compte des réserves boliviennes

<sup>85</sup> Nous avons subdivisé la figure en trois parties (a), (b) et (c) en fonction des niveaux de consommations pour une meilleure visualisation du graphe. Dans le graphe (c), on a regroupé les plus grands consommateurs (Chine (CHI), Inde (IND), Europe (EUR) et Amérique du Sud et Centrale (CSA))

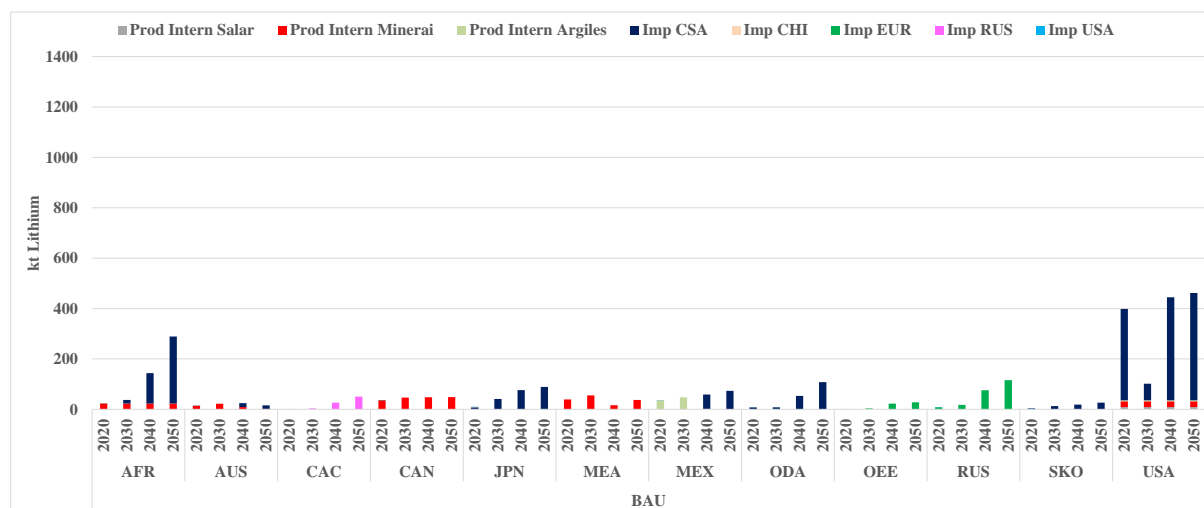


lithium par région avec une distinction entre les différents types de production nationale et les différentes régions et types d'importations de lithium dans les scénarios Bau et Facteur 4 avec subvention de la filière électrique pure pour les VP. Le choix de ce dernier scénario en guise de comparaison vient du fait qu'il y a une probabilité élevée de criticité du lithium avec des objectifs très ambitieux (5.3.2 **Figure 42** (b)).

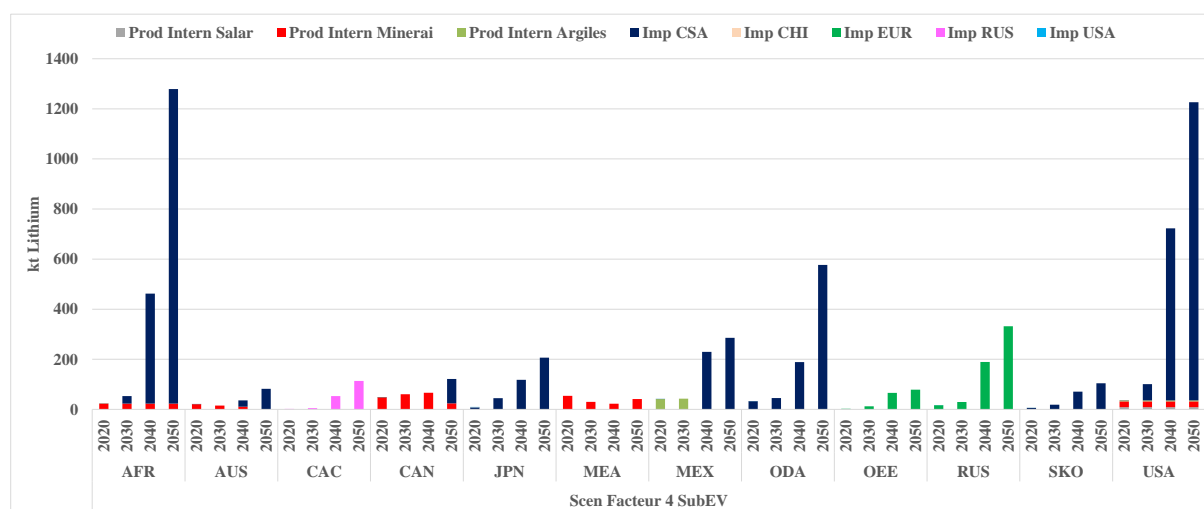
La région, concentrant 96% des échanges de lithium, devrait être une plaque tournante du fait de ses bas coûts de production. La **Figure 44** met bien en lumière les régions qui devraient importer le plus de lithium depuis la région Amérique du Sud et Centrale (CSA) à l'horizon 2050 en fonction des différents scénarios.

**Figure 43 : Profil de la consommation de lithium par région (Production interne et importations)**

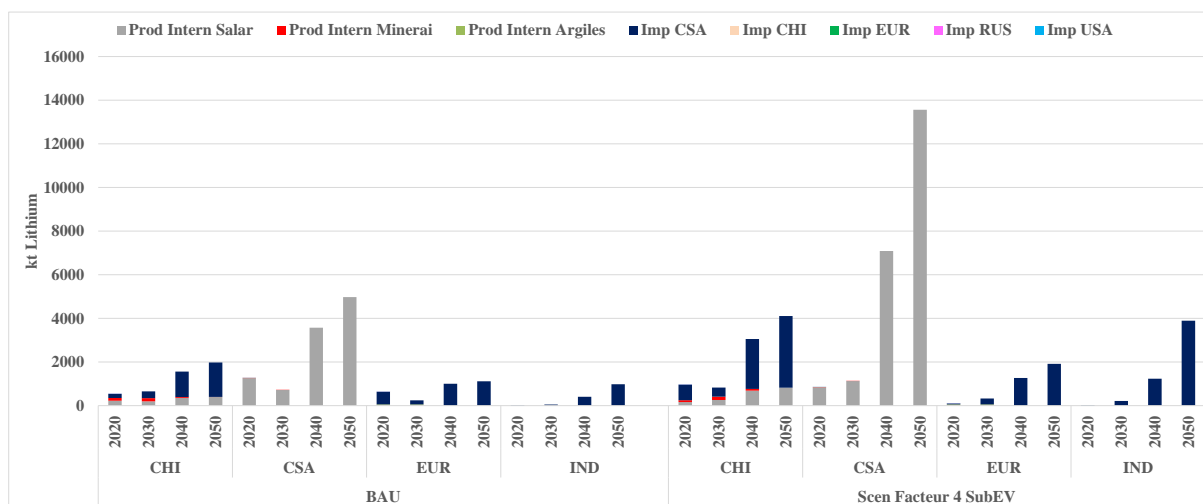
(a)



(b)

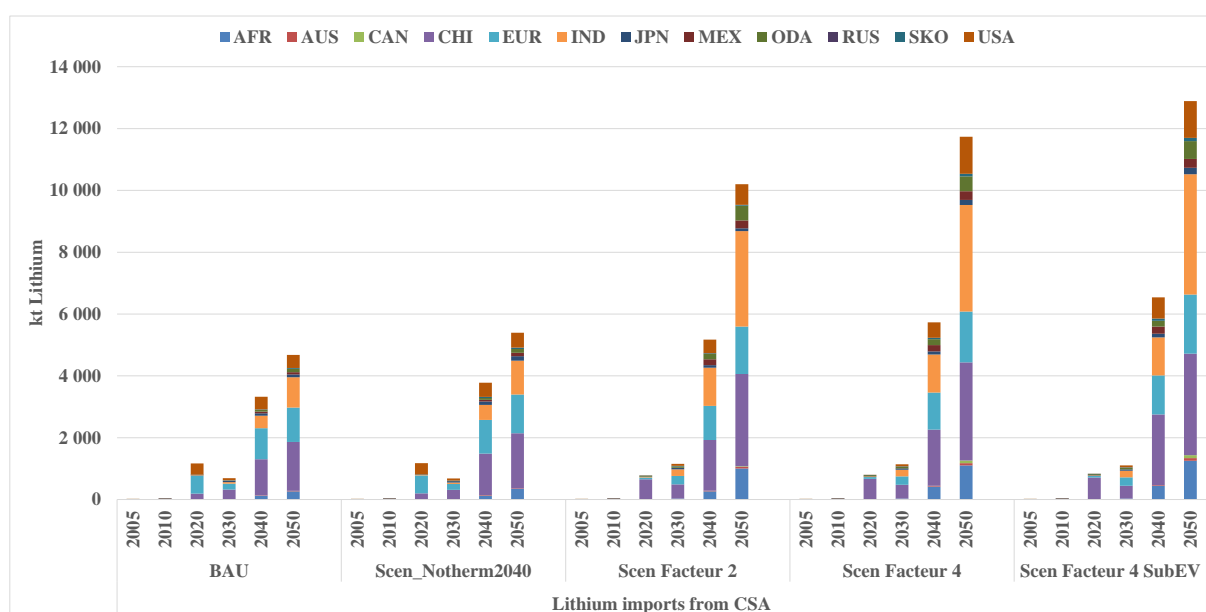


(c)



On remarque que les importations de la Chine à partir de la région CSA représentent près de trois quarts de ses besoins dans les deux scénarios alors qu'elles n'étaient que d'un tiers en 2020 dans le BAU. On voit ainsi une évolution de la politique du lithium chinoise qui rappelle à certains égards la politique pétrolière américaine. En effet, l'implantation croissante des entreprises chinoises dans les pays producteurs de lithium que nous pourrions appeler les « Pactes du lithium » en référence au Pacte du Quincy, offrent une opportunité d'alliances stratégiques entre les acteurs les plus importants. A l'aune des objectifs de l'Accord de Paris et du déploiement croissant de la filière électrique en Chine et en Inde, et donc *in fine* de leur consommation de lithium, on pourrait imaginer la ressource lithium comme arme diplomatique suivant son niveau de criticité. De même, l'évolution des stratégies nationales dans le triangle du lithium (Cf. 6.1.2 ci-après) pourrait être un facteur de risque pouvant faire évoluer le mix de production dans certaines régions telles que la Chine. Cette dernière pourrait ainsi être amenée à développer sa production intérieure avec ses réserves de salars et de minerais non négligeables.

**Figure 44 : Profil des exportations de lithium de la région Amérique du Sud et centrale (CSA)**



La région Afrique, quant à elle, connaît aussi une évolution fulgurante de sa demande en lithium jusqu'à être au même niveau que celle des Etats-Unis dans le scénario facteur 4 avec subvention. Cela pourrait s'expliquer par un développement très rapide des véhicules électriques purs dans le continent. Ce résultat introduit le concept de « leapfrogging »<sup>86</sup> dans cette région du globe dans la filière électrique dans le cas de scénarios très ambitieux. Il est important ici de rappeler que le modèle est en équilibre partiel et que pour observer la réalisation d'un tel scénario une électrification massive de l'Afrique est nécessaire<sup>87</sup>.

<sup>86</sup> Ce concept correspond à un saut technologique vers les plus avancées sans passer par les intermédiaires comme ce fut le cas de la téléphonie dans le continent africain en passant directement au téléphone mobile.

<sup>87</sup> On considère bel et bien un développement des infrastructures de production en Afrique avec une pénétration plus forte de renouvelables (Hydro, solaire et éolien...). Dans la plupart des analyses prospectives menées par l'Irena, ils considèrent un développement rapide de la production et donc des infrastructures :

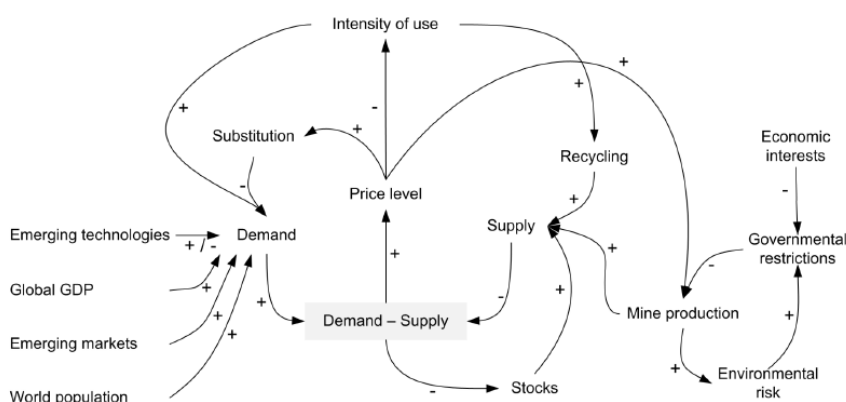


## 6. Conclusion : quelle criticité du lithium à l'horizon 2050 ?

Les scénarios développés dans le cadre de cette étude tendent à montrer qu'une forte pénétration du véhicule électrique au niveau mondial pourrait engendrer une diminution marquée de la marge de sécurité d'approvisionnement en lithium (rapport entre la consommation et les réserves) pour les scénarios les plus contraignants et donc de fortes tensions sur le marché.

La première phase de pénétration des VE au niveau mondial a certes déjà eu en partie pour conséquences (en parallèle du déploiement des batteries portatives de technologie Li-ion) une multiplication par 4 des réserves estimées entre 2005 et 2017. La même dynamique s'observe au niveau des volumes de ressources. Toutefois, les dynamiques d'équilibre à long terme sur les marchés de matières premières nous apprennent que l'absence de criticité géologique des ressources ne permettent pas d'occulter différentes formes de vulnérabilités, que ces dernières soient économiques, industrielles, géopolitiques ou environnementales (**Figure 45**). Dans le cas du marché du lithium, dans les scénarios les plus contraignants, les marges de sécurité sont faibles et leur criticité pourrait même être exacerbée si certains de ces risques se concrétisaient à l'horizon 2050.

**Figure 45 : Dynamiques d'équilibre sur les marchés de matières premières**



Source : tiré du projet « Value from waste » (ERA-NET AERTOs)

### 6.1. Les principaux risques pouvant affecter l'offre de lithium à l'horizon 2050

Nous avons identifié plusieurs facteurs de risque pour le lithium à l'horizon 2050.

#### 6.1.1. L'évolution de la structure du marché du lithium

Malgré la présence de nombreux entrants dans le secteur de l'exploration, le marché du lithium reste à l'heure actuelle encore dominé par un faible nombre d'entreprises (**Tableau 21**). Dans un contexte où les instruments de gestion de volatilité des prix ne sont pas encore disponibles dans les Bourses de matières premières (LME), cette concentration des acteurs induit une forte incertitude sur les prix futurs du lithium. La volatilité des prix pourrait ainsi fragiliser les nouveaux entrants sur le marché et conduire à des nouveaux mouvements de consolidations (fusions et acquisitions) entre les acteurs.

**Tableau 21 : Evolution de la structure du marché du lithium**

Période	Acteurs principaux	Nombre	Structure du marché	Formation des prix
1962-1998	FMC (US) Lithium company of America (US) Greenbushes Tin (AU) Sons of Gwalia (AU)	2/3	Oligopole coopératif	Prix fixés par les producteurs et publiés

- la partie ouest africaine devrait multipliée par environ 4 sa capacité de production en 2030 selon l'Irena  
- le barrage Grand Inga de 40-45 GW en Afrique Centrale ....

1998 - 2012	FMC (US) Albemarle (US) SQM (CL) Talison (AU)	3/4	Oligopole <i>non</i> coopératif	Opacité des prix
Depuis 2012	Entrée des acteurs chinois : Tianqi et Ganfeng Juniors : Orocobre, Lithium Americas, Galaxy Resources, etc.	The Big 5 + acteurs mineurs	Plus compétitif mais récente consolidation des acteurs	Opacité, marchés régionaux

Source : auteurs

Dans la structure actuelle de marché, le secteur est dominé par 5 entreprises (*Albemarle, SQM, FMC, Tianqi, Ganfeng*), auxquelles s'ajoutent un certain nombre de juniors (*Orocobre*<sup>88</sup>, *Galaxy Resources, Lithium Americas*, etc.). Les premières ont la particularité d'être des entreprises diversifiées, alors que les secondes sont beaucoup plus spécialisées. Les partenariats observés depuis quelques années tendent à montrer la complémentarité entre ces deux groupes d'acteurs sur le marché. A l'image de ce que l'on a pu observer dans d'autres secteurs (pharmacie notamment avec des start-ups innovantes et des entreprises historiques dont l'effort de R&D est moindre), la stratégie des juniors opérant dans le secteur de l'exploration est dynamique, mais ces entreprises souffrent de limitations technologiques ou financières, points forts des acteurs historiques. Dans ce contexte, la compétition entre les acteurs apparaît toute relative, malgré l'entrée de ces nouvelles entreprises sur le marché. Dès lors, la structure industrielle de la filière tend à montrer une criticité économique possible en raison du faible nombre d'acteurs et de leurs positionnements oligopolistiques.

### 6.1.2. Les stratégies nationales dans le triangle du lithium

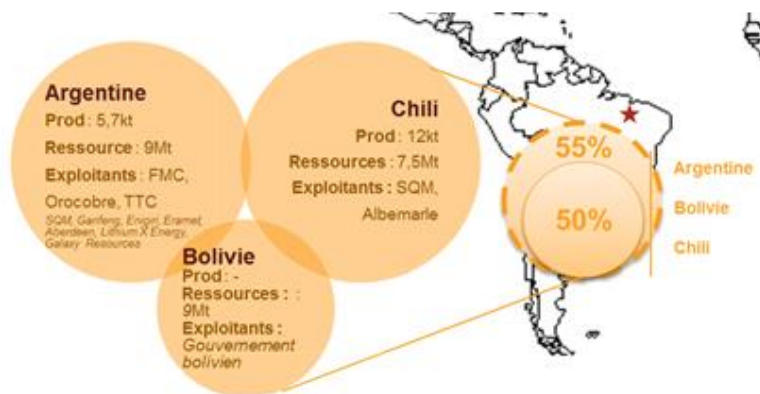
Les stratégies nationales constituent un paramètre de risque extrêmement important pour le marché du lithium dans les années à venir. Dans certains cas, les entreprises concessionnaires des gisements sont soumises à des quotas d'exploitation (Chili), ainsi qu'à des contrats de location à durée limitée. Dans d'autres cas, l'exploitation n'est pour l'instant pas possible. Le triangle du lithium qui réunit l'Argentine, la Bolivie et le Chili représente à l'heure actuelle 55 % des réserves mondiales et près de 50 % de la production (**Figure 46**). La Bolivie est un cas unique dans l'économie des matières premières : elle possède la plus grande ressource mondiale de lithium située dans le salar d'Uyuni mais ne produit actuellement pas de lithium. La stratégie du président actuel Evo Morales est de privilégier une intégration verticale de l'industrie locale pour se positionner sur les créneaux les plus rentables de l'industrie (batteries notamment). Ainsi, la Bolivie a déjà repoussé des offres de développement de la part de multinationales (le groupe français *Bolloré* ou le japonais *Mitsubishi*) et l'on peut questionner cette stratégie étant donnée l'importance des effets d'apprentissage dans ce type d'industrie. En 2015 le gouvernement avait annoncé vouloir investir plus de 900 millions de dollars pour la mise en production d'ici 2019 d'un site dans le salar d'Uyuni qui produirait jusqu'à 30 kt de carbonate de lithium par an. Le gouvernement a ainsi signé un contrat de 10 mois avec la compagnie allemande *K-UTEK AG Salt Technologies* pour réaliser une étude sur la conception d'un système d'extraction du lithium. Le pays a également inauguré sa première usine de batteries au lithium en 2014 construite en partenariat avec la compagnie chinoise *Linyi Dake*. Toutefois, les incertitudes concernant les évolutions politiques nationales en Bolivie demeurent. En effet, le gouvernement actuel s'interroge sur les conséquences du développement de la production de lithium d'un point de vue environnemental. A l'heure actuelle, la région d'Uyuni accueille près de 100 000 touristes chaque année et représente un site naturel d'exception. Dans ce contexte, l'offre de lithium au niveau mondial reste ainsi soumise à une très forte incertitude et l'ouverture possible du territoire bolivien à l'horizon 2050 est une clé importante de compréhension des évolutions du marché dans les années à venir.

<sup>88</sup> Orocobre possède par exemple 66.5 % du su projet Olaroz à travers une JV avec Toyota Tsucho avec une production estimée à 17.5ktpa.





Figure 46 : Le triangle du lithium



Source : USGS (2017)

La situation de l'Argentine et du Chili peut également questionner. En effet, l'arrivée au pouvoir du président Mauricio Macri en décembre 2015 a entraîné une hausse marquée des IDE, notamment dans le secteur minier national<sup>89</sup>. Depuis, le secteur du lithium argentin est devenu l'un des plus attractifs (Figure 47) et des plus rentables au niveau mondial avec plus d'une dizaine de projets développés dans la région de Puna. Dans ce contexte, la production a ainsi enregistré une hausse de près de 60 %, suite notamment à la mise en production du salar de Cauchari-Olaroz.<sup>90</sup> Toutefois, certaines incertitudes demeurent, notamment celle concernant la continuation de cette politique d'ouverture dans un pays où l'alternance politique entre le parti justicialiste et le parti radical voit les politiques d'IDE comme un sujet national.

Figure 47 : Taux de retour sur les ETF en Amérique du sud



Source : Bloomberg (2017)

La stratégie nationale de production du Chili est aussi un point névralgique, s'agissant de la production mondiale de lithium. En effet, le gouvernement chilien a créé une commission nationale du lithium afin de proposer une nouvelle impulsion politique et un nouveau cadre juridique pour l'exploitation du lithium. Tout comme celle de la Bolivie, la stratégie du Chili visant à remonter des filières (production à plus forte valeur ajoutée) est questionnée, comme l'est également la volonté de l'Etat d'encourager une politique de R&D dynamique dans les technologies d'extraction du lithium.

L'entreprise publique chilienne *Codeco* a ainsi été mandatée pour réfléchir à un planning de production à moyen terme pour les salars de Maricunga et Pedernales<sup>91</sup> et le gouvernement réfléchit également à une limitation de la

<sup>89</sup> <https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-12-06/macri-s-buy-argentina-mission-prompts-oil-lithium-listings>

<sup>90</sup> USGS 2017.

durée des nouveaux contrats pour les compagnies étrangères. L'enjeu principal pour le gouvernement réside dans la renégociation du niveau des royalties pour les productions réalisées hors-quotas.

Dans ce contexte, les incertitudes demeurent sur le niveau de production en Amérique du sud dans les années à venir. Il est intéressant de remarquer que les débats ont quelque peu évolué par rapport au milieu des années 2000. En effet, la dynamique des prix observée à partir de 2004 avait suscité de nombreuses interrogations de la part des analystes sur une possible cartellisation du marché du lithium, à savoir la création d'une forme « d'OPEP du lithium ». Si la proximité géographique des acteurs du triangle du lithium est avérée, la proximité stratégique l'est beaucoup moins. En effet, les politiques de développement du secteur du lithium enregistrées à l'heure actuelle en Argentine, en Bolivie et au Chili apparaissent non-coordonnées et ne laissent pas supposer une quelconque entente entre les acteurs nationaux. La fermeture politique et économique de la Bolivie, la gestion public-privé au Chili et la politique d'ouverture en Argentine sont autant de messages nationaux envoyés au marché. L'Argentine, et dans une moindre mesure le Chili, bénéficient pour l'instant de la stratégie de non-développement des ressources en Bolivie dans le secteur du lithium. Dans les années à venir, il sera nécessaire d'observer les évolutions stratégiques de chacun de ces pays étant données leur part dans les réserves mondiales de lithium et leur capacité à jouer sur l'offre de production.

### 6.1.3. Les délais de mise en production et la surestimation des capacités de production

Malgré la croissance dynamique de la demande ces dernières années, la production n'a enregistré qu'une hausse assez faible au niveau mondial, avec seulement 2 % de croissance entre 2014 et 2015 (USGS). La production a même connu un recul dans certains pays (Chili). Bien que la production de lithium soit économiquement rentable (en coextraction ou non), la mise en production des gisements reste longue, tout comme les méthodes de production actuelles. Si les nouvelles méthodes développées (procédé Posco par exemple) s'avèrent toutefois économiquement viables dans un futur proche, alors l'offre pourrait augmenter plus fortement et certains gisements s'avèreraient exploitables (sous réserve de pouvoir traiter des gisements avec de fortes teneurs en impuretés tels que le Mg, Ca, K, Fe...).<sup>92</sup> Les risques environnementaux et météorologiques (inondations des salars<sup>93</sup>, exploitation de sites naturels, etc.) et leurs plus ou moins grandes prises en compte sont autant d'éléments qui peuvent également déplacer la courbe d'offre et ainsi retarder la mise en exploitation de sites de production. Enfin, certains experts estiment que certaines entreprises surestiment leurs propres capacités de production<sup>94</sup>, ce qui pourrait in fine retarder les délais réels de production et fausser les anticipations des acteurs sur le marché à court terme. Il existe également à court terme et localement un risque réel de déséquilibre entre l'offre de spodumène et l'offre de raffinage associée pour les productions minières. En effet s'il est aisé d'augmenter les volumes d'extraction sur un gisement en exploitation il faut plus de temps, et de moyens financiers, pour augmenter les capacités de raffinage par la suite. Tous ces éléments pourraient être renforcés dans un contexte de forte volatilité des prix sur le marché dans les années à venir.

### 6.1.4. Le risque Chine

La Chine est un producteur historique de produits au lithium, extraits de ses terres (province du Sichuan) ou importés sous forme de spodumène depuis l'Australie. La Chine est un importateur net de lithium et un exportateur net de substances chimiques à base de lithium et de produits transformés au lithium (cathodes au lithium en autres). La Chine importe majoritairement des ressources qu'elle raffine sur son territoire (dont 75% de spodumène en provenance d'Australie et 25% de saumures en provenance d'Amérique du Sud). Acteur majeur intégré dans le secteur du lithium avec ses deux acteurs, *Tianqi* et *Ganfeng*, Pékin est devenu le plus gros producteur et le plus gros consommateur de lithium. Le secteur des batteries en Chine représente aujourd'hui plus de 50 % de la consommation intérieure du lithium contre 40% au niveau mondial. Le pays fournit à l'heure actuelle plus de 50 % des cathodes au lithium au niveau mondial. Dans ce contexte, les évolutions de la politique commerciale de la Chine (mise en place de quotas, embargo) doivent être analysées au regard des transformations passées observées sur les autres marchés de matières premières (terres rares, etc.).

## 6.2. Quelle volatilité des prix du lithium à l'horizon 2050 ?

Le marché du lithium reste un marché de petite taille par rapport aux marchés de métaux non ferreux<sup>95</sup> et comporte toutes les caractéristiques des micromarchés (métaux high-techs, etc.), à savoir une organisation des transactions

<sup>92</sup> C'est aujourd'hui le cas de la Bolivie pour laquelle les ratios élevés de Li:Mg rendent les procédés de production du lithium peu économiques.

<sup>93</sup> <http://www.mining.com/web/atacama-floods-lithium-impact-analysted/>

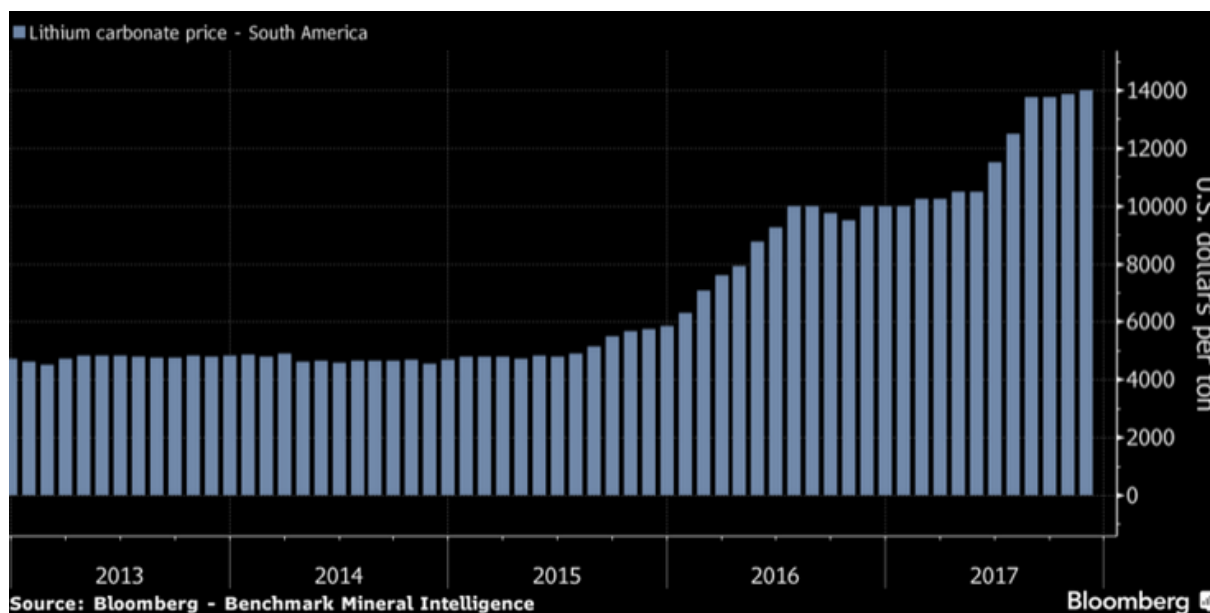
<sup>94</sup> Edward Anderson, chef exécutif de Tru Group Inc. Estime ainsi que le site exploité par Albemarle au Nevada devrait être épuisé d'ici 5 ans alors que le rapport annuel d'Albemarle de 2015 annonce une production à volume constant les 20 prochaines années.

<sup>95</sup> Les marchés des métaux non ferreux (cuivre, aluminium, nickel, etc.) ont des productions de plusieurs millions de tonnes.



régionales; une faible transparence des prix et des transactions réalisées de gré à gré. Une autre différence réside notamment dans l'absence de stocks tampons ou de stocks régulateurs identifiés sur les marchés.

**Figure 48 : Prix du lithium (carbonate) en Amérique du sud**

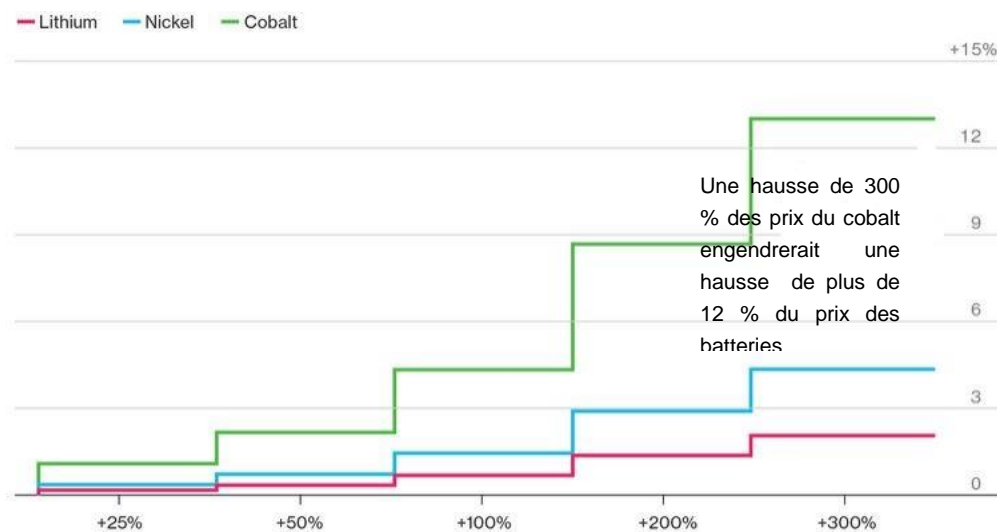


Source : Bloomberg (2017)

Cette caractéristique engendre des comportements de prix beaucoup plus volatils sur le marché et une moindre cyclicité. En effet, la dynamique de la demande peut engendrer des réactions très rapides des acteurs et une volatilité intrinsèque forte sur les marchés.

Pour autant, la question des prix du lithium, si elle est dommageable pour la planification des investissements dans le secteur n'a qu'une conséquence limitée sur le prix des batteries. Ainsi, Bloomberg (2017) a calculé qu'un triplement du prix du lithium aurait pour conséquence une augmentation de seulement 2 % du prix des batteries, alors que ce chiffre monte à près de 13 % pour le cobalt.

**Figure 49 : Impact d'une hausse des prix du cobalt, du lithium et du nickel sur les prix des batteries**



Source : Bloomberg (2017)

### 6.3. Quelle criticité sur les autres éléments composant les batteries ?

Cette étude s'est focalisée sur le lithium dans un contexte de pénétration du VE au niveau mondial, toutefois d'autres éléments composant les batteries pourraient faire l'objet d'une approche similaire avec le même type de modélisation. Pour les batteries NMC (Nickel-Manganèse-Cobalt), en fort développement aujourd'hui, les matières premières nécessaires présentent des profils de risque différents d'un point de vue géologique, économique ou géopolitique. Ainsi, avec près de 7 millions de tonnes de ressources pour une production de 123 000 tonnes en 2016, le profil géologique du cobalt laisse entrevoir un ratio R/P d'environ 57 ans. Toutefois de nombreux éléments doivent nous interroger à moyen terme. D'une part, le cobalt est produit majoritairement comme coproduit minier du nickel et du cuivre, ce qui crée des problématiques spécifiques notamment dans les réactions des producteurs aux évolutions du marché. Ainsi, en 2016, dans un contexte de croissance de la demande, la production de cobalt a diminué d'environ 2,5 % en raison d'une décélération de la production de nickel sur le marché. La question des coproduits impose de prendre en compte des élasticités particulières sur les marchés, la production de cobalt étant ainsi dépendante des plans d'investissements dans les secteurs du cuivre ou de nickel. D'autre part aujourd'hui, 45 % de la production de cobalt est à destination du secteur des batteries, et pour la Chine, premier consommateur mondial, ce chiffre monte à près de 80 %. Dès lors, les problématiques de pénétration du VE sont fondamentales pour apprécier les développements futurs sur le marché. Enfin, actuellement plus de 65 % de la production est localisée en République Démocratique du Congo, pays dont la situation économique et politique est aujourd'hui fortement instable. Le secteur minier fait l'objet de dénonciations d'ONG sur le niveau de corruption<sup>96</sup>, le travail des enfants ou les conditions de sécurité. Le risque politique est ainsi particulièrement prégnant sur ce marché comme l'est le risque de volatilité des prix, ces derniers ayant plus que doublé (+ 113 %) entre août 2016 et 2017. S'agissant du marché du nickel, le ratio R/P s'est établi à environ 34 ans en 2016 et les principales utilisations du métal concernent aujourd'hui le secteur des batteries (20 %) et la production d'acier inoxydable (60 %). Historiquement les prix du nickel sont extrêmement volatils et les investissements moins favorables que d'autres secteurs des métaux non-ferreux. Dans ce contexte, étudier les secteurs du cobalt et du nickel pourrait permettre d'approfondir la compréhension des évolutions futures des marchés de matières premières face aux grandes évolutions du secteur de la mobilité dans un contexte de décarbonation mondiale.

---

<sup>96</sup> 750 millions de dollars de recettes minières échappent au trésor public de la république démocratique du Congo, 21/07/2017, <https://www.globalwitness.org>



## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- Agence Internationale de l'Energie (AIE), 1998, Mapping the Energy Future: Energy Modeling and Climate Change Policy, Energy and Environment Policy Analysis Series.
- Agence Internationale de l'Energie (AIE), 2017a, Global EV Outlook.
- Agence Internationale de l'Energie (AIE), 2017b, « Energy Technology Perspectives » Tracking Clean Energy Progress.
- Agence Internationale de l'Energie (AIE), 2017c, World Energy Outlook (WEO)
- Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Energie (ANCRE), 2015, Rapport Ressources minérales et énergie, 75p. (Disponible à l'adresse suivante : [https://www.allianceenergie.fr/wp-content/uploads/2017/06/Ancre\\_Rapport\\_2015-Ressources\\_minerales\\_et\\_energie\\_0.pdf](https://www.allianceenergie.fr/wp-content/uploads/2017/06/Ancre_Rapport_2015-Ressources_minerales_et_energie_0.pdf))
- Assoumou E., 2006, Modélisation MARKAL pour la planification énergétique long-terme dans le contexte français, Mines ParisTech.
- Bardi U., 2010, Extracting Minerals from Seawater: An Energy Analysis, Sustainability Vol 2, p980-992.
- Basudev S., 2017, Recovery and recycling of lithium: A review, Separation and Purification Technology Vol 172, pp388-403.
- Beckdorf, A.Y., Tilton J.E., 2009, Using the cumulative availability curve to assess the threat of mineral depletion: the case of lithium.  
[http://mshp.mines.edu/UserFiles/File/economicsBusiness/Tilton/The\\_Case\\_of\\_Lithium.pdf](http://mshp.mines.edu/UserFiles/File/economicsBusiness/Tilton/The_Case_of_Lithium.pdf)
- Bloomberg Briefs, Nov. 21, 2016, "Demand for lithium spirals, but at what price?", Clean Energy & carbon.
- Boulanger P-M., Bréchet T., 2003, Une analyse comparative des classes de modèles : modélisation et aide à la décision pour un développement durable.
- Buchert M, Schüller D, Bleher D. 2009, Critical metals for sustainable technologies and their recycling potential. Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme (UNEP) and Oiko-Institut.
- Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), Juillet 2012, Panorama 2011 du marché du lithium, BRGM/P-61340-FR.
- Carles, L., 2010, Modelling Long-Term Global Lithium Stocks and Flows. Master Thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne (Switzerland).
- Chen et al., 2018, Effective regeneration of LiCoO<sub>2</sub> from spent lithium-ion batteries: a direct approach towards high-performance active particles, Green Chem. Vol 20, pp851-862
- Choubey P.K., Kang-Sup C., Min-seuk K., Lee J.C., Srivastava Rajiv R., 2017, Advance review on the exploitation of the prominent energy-storage element Lithium. Part II: From sea water and spent lithium ion batteries (LIBs), Minerals Engineering, Vol 110, pp104-121.
- Ciez R.E., Whitacre J.F., 2016, The cost of lithium is unlikely to upend the price of Li-ion storage systems, Journal of Power Sources Vol 320, pp310-313.
- Clean Energy Ministerial (CEM), 2017, Electrical vehicles initiative (EVI): Accelerating the deployment of electric vehicles (EVs) worldwide.
- Commissariat Général du Plan (CGP), 2002, Effet de serre: modélisation économique et décision publique, Rapport du groupe présidé par Pierre-Noël Giraud.

- Deutsche Bank, 2016, F.I.T.T. for investors, Welcome to the Lithium-ion Age.
- European Alternative Fuels Observatory (EAFO).
- European Automobile Manufacturer Association (ACEA), 2017, Alternative fuel registration.
- European Commission (EC), Directive 2014/94/EU of the European parliament and of the Council on the Deployment of Alternative Fuels Infrastructure.
- EV Sales blog.
- Experts : Martim Facada, Metal Market Analyst, Asian Metal, Ltd.
- Fouquet R., 2012, Trends in income and price elasticities of transport demand (1850–2010), Energy Policy Vol 50, pp62-71.
- Gemechu E. D., Helbig C., Sonnemann G., Thorenz A., Tuma A., 2015, Import-based Indicator for the Geopolitical Supply Risk of Raw Materials in Life Cycle Sustainability Assessments, Journal of Industrial Ecology.
- Graedel, T.E., Barr, R., Chandler, C., Chase, T., Choi, J., Christoffersen, L., Friedlander, E., Henly, C., Jun, C., Nassar, N.T., Schechner, D., Warren, S., Yang, M., Zhu, C., 2012. Methodology of metal criticality determination. Environ. Sci. Technol. Vol 46, pp1063–1070.
- Graedel T. E., Harper E. M., Nassar N. T., Reck B. K., 2013, On the materials basis of modern society, PNAS.
- Graedel T. E., Harper E. M., Nassar N. T., Nuss Philip, Reck B. K., 2015, Criticality of metals and metalloids, PNAS.
- Grosjean C., Herrera Miranda P., Perrin M., Poggi P., 2012, Assessment of world lithium resources and consequences of their geographic distribution on the expected development of the electric vehicle industry, Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol 16, pp1735– 1744.
- Gua F, Guo J., Yao X., Summers P. A., Widijatmoko, S. D., Hall P., 2017, An investigation of the current status of recycling spent lithium-ion batteries from consumer electronics in China, Journal of Cleaner Production Vol 161, pp765-780.
- Guo X., Cao X., Huang G., Tian Q., Sun H., 2017, Recovery of lithium from the effluent obtained in the process of spent lithium-ion batteries recycling, Journal of Environmental Management Vol 198, Part 1, pp84-89.
- Hache, E., Tchung-Ming, S., 2017, « Quelles politiques publiques pour stimuler les ventes de VE à l’horizon 2030 en Europe ? », IFPEN Fiche Panorama.
- Hall D., Moultak M., Lutsey N., 2017, Electric vehicle capitals of the World, demonstrating the path to electric drive, The International Council on clean transportation (ICCT), White Paper.
- Hall D., Lutsey N., 2017, Literature review on power utility best practices regarding electric vehicles, The International Council on clean transportation (ICCT), White Paper.
- Hao et al., 2017, Tracing global lithium flow: A trade-linked material flow analysis, Resources, Conservation & Recycling Vol 214, pp50-61.
- Hao H., Liu Z., Zhao F., Geng Y., Sarkis J., 2017, Material flow analysis of lithium in China, Resources Policy Vol 51, pp100-106.
- IFPEN, Départements motorisations (Rueil) et batterie (Solaize)
- Industrial Minerals, 2014, 6th Lithium Supply and Market conference – presentations, Montreal (Canada).
- Industrial Minerals, 2015, 7th Lithium Supply and Market conference – presentations, Shanghai (China).





- Industrial Minerals, 2017, 9th Lithium Supply and Market conference – presentations, Montreal (Canada).
- Jaskula B., 2017, Lithium: U.S. Geological Survey Mineral Commodity
- Jaskula B., 2014, Lithium: U.S. Geological Survey Mineral Yearbook
- Jin L., Slowik P., 2017, Literature review of electric vehicle consumer awareness and outreach activities, The International Council on clean transportation (ICCT), Working Paper 2017-03.
- Joule, 2017, Lithium-Ion Battery Supply Chain Challenges, <http://view6.workcast.net/ControlUsher.aspx?cpak=6547411026078656&pak=7233275140843186>
- Kesler et al., October 2012, Global lithium resources: Relative importance of pegmatite, brine and other deposits, Ore Geology Reviews Volume 48, pp55-69.
- Lee J., Yu SH., Kim C., Sung YE., Yoon J., 2013, Highly selective lithium recovery from brine using a  $\lambda$ -MnO<sub>2</sub>/Ag battery. Phys Chem Phys; 15 (20):7690-5.
- Liu X., Chen X., Zhao Z., Liang X., 2014, Effect of Na<sup>+</sup> on Li extraction from brine using LiFePO<sub>4</sub>/FePO<sub>4</sub> electrodes. Hydrometallurgy, 146:24-8.
- Loulou, R., Goldstein, G., 2005. Documentation for the TIMES Model PART II.
- Loulou, R., Labriet, M., 2008, ETSAP-TIAM: the TIMES integrated assessment model Part I: Model structure, Computational Management Science Vol 5, Issue 1–2, pp7–40.
- Lu B., Liu J., Yang J., 2017, Substance flow analysis of lithium for sustainable management in mainland China: 2007–2014, Resources, Conservation and Recycling Vol 119, pp109-116.
- Mancini L., Benini L., Sala S., 2016, Characterization of raw materials based on supply risk indicators for Europe, International Journal of Life Cycle Assessment.
- Martin G., Rentsch L., Höck M., Bertau M., 2017, Lithium market research – global supply, future demand and price development, Energy Storage Materials Vol 6, pp171-179.
- Maxwell P., 2015, Transparent and opaque pricing: The interesting case of lithium, Resources Policy Vol 45, pp92-97.
- Miedema J. H., Moll H. C., 2013, Lithium availability in the EU27 for battery-driven vehicles: The impact of recycling and substitution on the confrontation between supply and demand until 2050, Resources Policy Vol 38, pp204–211
- Mohr S. H., Mudd G. M., Giurco D., 2012 Lithium Resources and Production: Critical Assessment and Global Projections Minerals Vol 2, pp65-84.
- Moss R.L., Tzimas E., Kara H., Willis P., Kooroshy J., 2013, The potential risks from metals bottlenecks to the deployment of Strategic Energy Technologies, Energy Policy 55, pp556–564.
- Narins T.P., 2017, The battery business: Lithium availability and the growth of the global electric car industry, The Extractive Industries and Society Vol 4, Issue 2, pp321-328.
- Ordoñez J., Gago E.J., Girard A., 2005, Recovery of metal values from spent lithium-ion batteries with chemical deposition and solvent extraction, Journal of Power Sources Vol 152, pp278-284.
- Ordoñez J., Gago E.J., Girard A., 2016, Processes and technologies for the recycling and recovery of spent lithium-ion batteries, Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol 60, pp195–205.
- Organization for Economic Co-operation and development (OECD), 2015, “Policy strategies for vehicle electrification”.
- Parson, E., Fisher-Vanden, K., 1997, Integrated assessment models of global climate change, Annu Rev. Energy Environ.



- Prior T., 2013, Sustainable governance of scarce metals: The case of lithium, *Science of The Total Environment*, Volumes 461–462, pp785-791.
- Rotmans J., Van Asselt MB., 2001, Uncertainty Management in Integrated Assessment Modeling: towards a pluralistic approach, *Environmental Monitoring and Assessment* 69, pp101-130.
- Sergi F., Arista A., Agnello Ferraro G., Antonucci M., V., 2016, Characterization and comparison between lithium iron phosphate and lithium-polymers batteries, *Journal of Energy Storage* Vol 8, pp235-243.
- Sites des producteurs de lithium : Rapports annuels d'activités, Publications, relevés de presse
- Speirs J., Contestabile M., Houari Y., Gross R., 2014, The future of lithium availability for electric vehicle batteries, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Vol 35, pp183-193.
- Sverdrup H.U., 2016, Modelling global extraction, supply, price and depletion of the extractable geological resources with the LITHIUM model, *Resources, Conservation and Recycling* Vol 114, pp112–129.
- Swart P., Dewulf J., Biernaux A., 2014, Resource demand for the production of different cathode materials for lithium ion batteries, *Journal of Cleaner Production* Vol 84, pp391-399.
- Tarascon J-M., 2016-2017, Électrochimie appliquée : les différents systèmes de batteries, Cours au Collège de France, <https://www.college-de-france.fr/site/jean-marie-tarascon/course-2016-2017.htm>
- Tran T., Luong Van T., 2015, Lithium production processes, Department of Energy and Resources Engineering, Chonnam National University, Gwangju, Korea.
- Vikström et al., 2013, Lithium availability and future production outlooks, *Applied Energy* Vol 110, pp252–266.
- Wallace R. B., Lithium, a strategic element for energy in the world market, 2012, [www.depfe.unam.mx/p-cientifica/wallace-bruce\\_2012.pdf](http://www.depfe.unam.mx/p-cientifica/wallace-bruce_2012.pdf).
- Wang X., Gaustad G., Babbitt C. W., Kirti R., 2014, Economies of scale for future lithium-ion battery recycling infrastructure, *Resources, Conservation and Recycling* Vol 85, pp53– 62.
- Wood Mackenzie, 2017, Energetic growth: lithium's role in a decarbonising world, <https://woodmac.wistia.com/medias/uuxlmbvfo2>
- Zeng X., Li J., 2013, Implications for the carrying capacity of lithium reserve in China, *Resources, Conservation and Recycling* Vol 80, pp58-63.
- Zeng X., Li J., Liu L., 2015, Solving spent lithium-ion battery problems in China: Opportunities and challenges, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Vol 52, pp1759-1767.
- Ziemann et al., 2012, Tracing the fate of lithium-The development of a material flow model, *Resources, Conservation and Recycling* Vol 63, pp26–34.



## INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES

### TABLEAUX

Tableau 1 : Exemple tableau .....	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 2 : Ratio de réserves / production pour une sélection de matières premières .....	7
Tableau 3 - Facteurs de conversion LCE des principales molécules contenant du lithium dans l'industrie (NB : LCO, LMO, LPF, NCM, LiPF sont des matériaux de batteries).....	10
Tableau 4 - Grades et usages du carbonate et de l'hydroxyde de lithium .....	10
Tableau 5 : Récapitulatif des différents usages du lithium et des potentiels substitués.....	11
Tableau 6 – Prévisions annuelles de croissance sectorielle à l'horizon 2050* .....	13
Tableau 7 : Répartition des ressources mondiales principales de lithium par type de gisement.....	15
Tableau 8 : Principales comparaisons entre les gisements rocheux et de saumures conventionnels .....	17
Tableau 9 : Données légales et financières pour l'exploitation du lithium selon les pays .....	24
Tableau 10 : Décomposition du chiffre d'affaire de SQM.....	26
Tableau 11 : Consommation des batteries Li-ion en 2016 .....	30
Tableau 12 - Principaux Matériaux d'électrodes pour les technologies Li-ion .....	30
Tableau 13 : Quantité moyenne de lithium utilisé dans des objets utilisant des batteries au lithium .....	32
Tableau 14 - Ventes de bus en Chine selon la technologie (BEV : électrique, PHEV : hybride rechargeable, HEV : hybride).....	34
Tableau 15 : Chaîne de valeur du lithium depuis l'extraction jusqu'au recyclage .....	35
Tableau 16 – Classement des fournisseurs de batteries VE pour les années 2015 et 2016 .....	35
Tableau 17 : Principales compagnies recyclant ou ayant planifié de recycler les batteries Li-ion de grand format.....	43
Tableau 18 : Revenus tirés de la revente du lithium recyclé selon la nature de la batterie .....	44
Tableau 19 : Partenariats entre les entreprises du secteur .....	46
Tableau 20 : Recensement des principaux projets de lithium avec une mise en production entre 2016 et 2020 (gris : mines seulement, bleu : intégration activités de transformation) .....	47
Tableau 21 : Les différentes régions considérées dans le modèle TIAM .....	51
Tableau 22 : Evolution de la structure du marché du lithium .....	60

### FIGURES

Figure 1 : Les différents niveaux d'évaluation de la criticité .....	8
Figure 2 : Le lithium dans le tableau périodique des éléments.....	9
Figure 3 : Organigramme des composés de lithium et leurs utilisations finales.....	9
Figure 4 : Part des différents secteurs dans la consommation du lithium en 2016 .....	12
Figure 5 - Pays majoritairement importateurs de carbonate et d'oxyde/hydroxyde de lithium (en kt, 2016) .....	12
Figure 6 : Consommation sectorielle de lithium entre 2005 et 2016, en kt Li .....	13
Figure 7 : Evolution des exportations de composés lithium dans le monde.....	14
Figure 8 : Evolution des réserves de lithium dans le monde .....	15
Figure 9 : Décomposition du coût de production du carbonate de lithium à partir de saumures.....	18
Figure 10 : Décomposition du coût de production du carbonate de lithium à partir de spodumène .....	19
Figure 11 : Courbe des coûts de production par gisement, abscisses en kt LCE (gris clair : salars ; gris foncé : mines) .....	20
Figure 12 : Coûts estimés de la production de lithium par pays.....	20
Figure 13 : Evolution de la production de lithium dans le monde selon la localisation des gisements.....	21
Figure 14 : Répartition des réserves (cercles en traits pointillés) et de la production (cercles en trait plein) primaire mondiale avec les principales entreprises présentes sur les sites de production actuels et les projets en cours.....	22
Figure 15 : Répartition géographique de la production de lithium (salars/roches), de bases chimiques (LiCoO <sub>2</sub> , LiOH) au lithium et de dérivés du lithium (matériel d'électrode) par pays.....	23
Figure 16 : Parts de marché début 2017 pour la production de lithium primaire .....	25
Figure 17 : Volume des ventes par segments de l'entreprise Albemarle en 2016.....	25
Figure 18 : Historique des prix du lithium aux Etats-Unis et consommation mondiale .....	28
Figure 19 : Evolution de la production de lithium au niveau mondial (kt) .....	29
Figure 20 - Marché mondial des batteries en énergie stockée et en dollars.....	29
Figure 21 : Consommation sectorielle des batteries Lithium-Ion en Chine entre 2015 et 2017* .....	30

Figure 22 - Evolution du coût de production et de densité énergétique des batteries Li-ion .....	32
Figure 23 : Evolution du stock de véhicules légers électrifiés dans le monde .....	33
Figure 24 : Capacité de production installée et future des gigafactories .....	36
Figure 25 : Classement des constructeurs de véhicules électrifiés dans le monde par part de marché en 2016. Bleu : PHEV, vert : VE. ....	36
Figure 26 : Projection des ventes de véhicules électriques à l'horizon 2040 .....	37
Figure 27 : Demande en lithium associée à la consommation du secteur des batteries à l'horizon 2025 ..	38
Figure 28 : Demande de puissance annuelle pour les batteries de VE .....	38
Figure 29 : Stock de VE selon les scénarios de l'AIE .....	39
Figure 30 : Production cumulée de lithium avec une hypothèse de 5kg Li/véhicule.....	40
Figure 31 : Production cumulée de lithium avec une hypothèse de 14,9kg Li/ véhicule.....	40
Figure 32 : Procédé Nemaska/Clariant .....	41
Figure 33 : Proportions des différentes technologies de batteries utilisées en Chine pour la mobilité électrique.....	44
Figure 34 : Estimation des capacités de production (t LCE) entre 2016 et 2035 ; producteurs actuels (bleu), SQM (vert), Nouveaux arrivants (Rouge) .....	46
Figure 35 : Schéma explicatif des différentes approches .....	50
Figure 36 : Système Energétique de Référence (SER) .....	51
Figure 37 : Description détaillée du lithium dans chaque région TIAM.....	52
Figure 38 : Subdivision des technologies de IFPEN TIAM-Transport .....	53
Figure 39 : Evolution du parc mondial par scénario .....	54
Figure 40 : Véhicules pile à combustible dans le monde dans les scénarios Facteur 2 et 4 .....	55
Figure 41 : (a) Déploiement des véhicules électriques purs incluant VP, VC* et BUS par scénario .....	56
Figure 42 : (a) Evolution de la consommation mondiale cumulée de lithium par région (b) Comparaison de la consommation cumulée de lithium à l'horizon 2050 avec les réserves mondiales actuelles.....	57
Figure 43 : Profil de la consommation de lithium par région (Production interne et importations).....	58
Figure 44 : Profil des exportations de lithium de la région Amérique du Sud et centrale (CSA).....	59
Figure 45 : Dynamiques d'équilibre sur les marchés de matières premières .....	60
Figure 46 : Le triangle du lithium .....	62
Figure 47 : Taux de retour sur les ETF en Amérique du sud .....	62
Figure 48 : Prix du lithium (carbonate) en Amérique du sud .....	64
Figure 49 : Impact d'une hausse des prix du cobalt, du lithium et du nickel sur les prix des batteries.....	64

## SIGLES ET ACRONYMES

<b>ADEME</b>	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
<b>AFPIA</b>	Association pour la Formation Professionnelle dans les Industries de l'Ameublement
<b>AIE</b>	Agence Internationale de l'Energie
<b>BP</b>	British Petroleum
<b>BNEF</b>	Bloomberg New Energy Finance
<b>BRGM</b>	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
<b>DOE</b>	Department of Energy
<b>IFPEN</b>	IFP Energies Nouvelles
<b>LCE</b>	Lithium Carbonate Equivalent
<b>SQM</b>	Sociedad Química y Minera de Chile
<b>TIAM</b>	TIMES Integrated Assessment Model
<b>TIMES</b>	The Integrated MARKAL-EFOM System
<b>USGS</b>	United States Geological Survey
<b>VE</b>	Véhicules Electriques



## L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Elle met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale. L'Agence aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, les économies de matières premières, la qualité de l'air, la lutte contre le bruit, la transition vers l'économie circulaire et la lutte contre le gaspillage alimentaire.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de la Transition Ecologique et Solidaire et du ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

<https://www.ademe.fr/>

### LES COLLECTIONS DE L'ADEME



#### ILS L'ONT FAIT

*L'ADEME catalyseur* : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



#### EXPERTISES

*L'ADEME expert* : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous un regard.



#### FAITS ET CHIFFRES

*L'ADEME référent* : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



#### CLÉS POUR AGIR

*L'ADEME facilitateur* : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation



#### HORIZONS

*L'ADEME tournée vers l'avenir* : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.

# ELECTRIFICATION DU PARC AUTOMOBILE MONDIAL ET CRITICITE DU LITHIUM A L'HORIZON 2050

Les scénarios développés dans le cadre de cette étude tendent à montrer qu'une forte pénétration du véhicule électrifié au niveau mondial (jusqu'à 75% en 2050) pourrait engendrer une diminution marquée de la marge de sécurité d'approvisionnement en lithium (rapport entre la consommation et les réserves). Néanmoins, au regard du volume des ressources, l'approvisionnement en lithium apparaît relativement peu critique sur le long terme.

Toutefois, les dynamiques d'équilibre à long terme sur les marchés de matières premières nous apprennent que l'absence de criticité géologique des ressources ne permet pas d'occulter différentes formes de vulnérabilités, qu'elles soient économiques, industrielles, géopolitiques ou environnementales.

Le secteur du lithium se caractérise ainsi par une concentration marquée des ressources en Amérique du Sud où les stratégies nationales sont très différenciées. La structure industrielle tend également à montrer une criticité économique possible, en raison du faible nombre d'acteurs et de leurs positionnements oligopolistiques. La politique de la Chine et de ses entreprises, sur la filière lithium, mais également sur le marché des batteries, reste ainsi un élément clé de compréhension du marché du lithium dans le futur.

## Essentiel à retenir

Dans un scénario de forte électrification du parc automobile mondial, notre étude ne montre pas de risque géologique prégnant sur le marché du lithium

- *Le marché serait toutefois transformé, avec de grands pays consommateurs (Chine, Inde, États-Unis, Europe), dépendant de l'Amérique du Sud pour leurs approvisionnements en 2050*
- *La criticité sur le marché serait avant tout économique (faible nombre d'acteurs, positionnement oligopolistique ; politique de la Chine et de ses entreprises), géopolitique ou environnementale*