

République Algérienne Démocratique et populaire

Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique

Université d'Oran 2 Mohamed ben Ahmed

Faculté des Sciences de la Terre et de L'univers

Département des sciences de la terre



Mémoire

Présenté pour l'obtention du Diplôme Master en Sciences de la terre et l'univers

Option : GEODYNAMIQUE DE LA LITHOSPHERE

Thème :

**LE LITHIUM :**  
**MINERALISATION – INTERETS**  
**ET PERSPECTIVES**

Présenté par : BENAHMED Yasser Ali

Devant la commission d'examen :

Mlle R. Kared	MCA	Université d'Oran 2	Président
Mr. A. Baaouague	MAA	Université d'Oran 2	Encadreur
Mr. M. Mahmoudi	MAA	Université d'Oran 2	Examineur

Année 2022/2023

# Dédicaces

Je dédie ce travail à ma très chère famille,  
mes parents et les grands parents ainsi à mes chères sœurs.

Je dédie aussi ce travail à mes amis qui m'ont soutenu,  
Encouragé et apporté leur aide tout au long de ce travail.  
Que de noms que je ne pourrais cité en totalité Je n'ai pas les mots  
pour leur dire merci pour leur amitié, Leur compréhension,  
leurs encouragements et leur patience Avec moi.

**Yasser**

# REMERCIEMENTS

Merci à Dieu, qui par sa grâce, nous a donné le courage

Et la bonne volonté pour réaliser ce travail.

Nous tenons à exprimer notre grande gratitude

Et nos sincères remerciements mon notre

Encadreur **M. A.BAAOUAGUE** pour ses conseils

Et ses encouragements dans la Réalisation de cette recherche.

Je tiens également à exprimer mes sincères remerciements

À **Mlle R. Kared** pour nous avoir fait l'honneur de présider le jury.

Mes vif et chaleureux remerciements,

Vont également à **M. M. MAHMOUDI** qui a accepté de Juger ce travail,

Et de nous faire part de ces observations.

Je tiens également à remercier tous nos enseignants qui nous soutiennent

Avec leurs Motivations continuelles, et leurs conseils encourageants.

## **Résumé :**

Comme définition du mot "lithium", Le lithium est un élément chimique de symbole Li et de numéro atomique 3. C'est le métal le plus léger et le moins dense de tous les éléments solides. Il fait partie du groupe des métaux alcalins dans le tableau périodique des éléments.

Le lithium est largement utilisé dans divers domaines. Par exemple, il est utilisé dans les batteries rechargeables au lithium-ion, qui alimentent de nombreux appareils électroniques tels que les téléphones portables, les ordinateurs portables et les véhicules électriques. Le lithium est également utilisé dans les alliages métalliques pour améliorer leurs propriétés, dans les verres et les céramiques, ainsi que dans certains médicaments utilisés pour traiter certains troubles mentaux tels que le trouble bipolaire

En raison de ses propriétés chimiques et de sa grande réactivité, le lithium est stocké sous forme de composés tels que le carbonate de lithium ou le chlorure de lithium. Il est extrait de diverses sources, notamment de minéraux tels que le spodumène et le pétalite, ainsi que de l'eau de mer.

En résumé, le lithium est un élément chimique métallique léger, utilisé dans les batteries, les alliages, les médicaments et d'autres applications industrielles

Le lithium présente un intérêt majeur dans plusieurs domaines, notamment :

**Batteries rechargeables :** L'un des principaux intérêts du lithium réside dans son utilisation dans les batteries rechargeables au lithium-ion. Ces batteries sont largement utilisées dans les appareils électroniques portables tels que les téléphones portables, les ordinateurs portables, les tablettes et les appareils photo numériques.

## **Abstract:**

I assume you are looking for the definition of the word "lithium". Lithium is a chemical element with symbol Li and atomic number 3. It is the lightest and least dense metal of all solid elements. It is part of the alkali metal group in the periodic table of elements.

Lithium is widely used in various fields. For example, it is used in rechargeable lithium-ion batteries, which power many electronic devices such as cell phones, laptops and electric vehicles. Lithium is also used in metal alloys to improve their properties, in glasses and ceramics, and in some drugs used to treat certain mental disorders such as bipolar disorder

Due to its chemical properties and high reactivity, lithium is stored in the form of compounds such as lithium carbonate or lithium chloride. It is mined from a variety of sources, including minerals such as spodumene and pétalite, as well as seawater.

In summary, lithium is a light metallic chemical element, used in batteries, alloys, drugs and other industrial applications.

Lithium is of major interest in several areas, including:

Rechargeable batteries: One of the main interests of lithium lies in its use in rechargeable lithium-ion batteries. These batteries are widely used in portable electronic devices such as cell phones, laptops, tablets, and digital cameras

# Table des matières

Dédicaces

REMERCIEMENTS

Résumé

Liste des figures

Introduction générale : .....	1
I.1 Définition : .....	4
I.2 Source et contexte géologique : .....	4
I.3 Caractéristiques : .....	6
I.4 La prospection du lithium : .....	7
I.5 Condition géologique de formation du Lithium : .....	7
I.6 Exploration et évaluation des gisements de lithium : .....	8
I.7 Contexte géologique régional : .....	8
I.8 Les conditions géologiques favorables à la concentration du lithium : .....	8
I.8.1 Présence de sources lithinifères : .....	8
I.8.2 Conditions de concentration : .....	8
I.8.3 Stabilité géologique : .....	9
I.8.4 Conditions hydrologiques : .....	9
I.9 Processus géologiques impliqués dans la formation des gisements de lithium : .....	9
I.9.1 Formation des gisements de lithium dans les pegmatites et les roches ignées : .....	9
I.9.2 Formation des gisements de lithium dans les dépôts alluviaux : .....	10
I.9.3 Formation des gisements de lithium dans les saumures salines : .....	10
I.10 Propriétés minéralogique du lithium : .....	10
I.10.1 Les minéraux porteurs de lithium et leur occurrence géologique : .....	10
I.11 Composition chimique et propriétés physiques du lithium : .....	11
I.12 Abondance et distribution géographique du lithium dans l'écorce terrestre : .....	11
I.13 Les conditions géologiques pour la concentration du lithium : .....	12
I.14 Caractérisation des gisements de lithium : .....	12
I.15 Types de gisements de lithium : .....	13
I.16.1 Quelques exemples des régions d'existence des dépôts de lithium dans le monde : .....	14

<b>I.17 Les caractéristiques géologiques spécifiques de ces régions influencent la formation des gisements de lithium :</b>	<b>15</b>
<b>I.18 Cartographie géologique détaillée :</b>	<b>15</b>
<b>I.18.1 Analyse pétrographique :</b>	<b>15</b>
<b>I.18.2 Géochimie :</b>	<b>15</b>
<b>I.18.3 Techniques géophysiques :</b>	<b>15</b>
<b>I.18.4 Indicateurs géologiques :</b>	<b>16</b>
<b>I.19 Cristallisation fractionnée dans les pegmatites et les roches ignées :</b>	<b>16</b>
<b>I.20 Processus d'érosion et de transport :</b>	<b>16</b>
<b>I.21 Concentration dans les dépôts alluviaux et les saumures salines :</b>	<b>16</b>
<b>II.1 Historique :</b>	<b>19</b>
<b>II.2 Le lithium métallique :</b>	<b>20</b>
<b>III.1 Exploitation du lithium :</b>	<b>24</b>
<b>III.1.1 Dégâts pour l'environnement :</b>	<b>25</b>
<b>III.1.2Lithium et pollution :</b>	<b>25</b>
<b>III.1.3Enjeux Industriels :</b>	<b>25</b>
<b>III.2 Impacts de l'extraction et du raffinage du lithium sur l'environnement :</b>	<b>26</b>
<b>III.2.1 Les méthodes traditionnelles :</b>	<b>26</b>
<b>III.3L'extraction et le raffinage du lithium à partir des saumures :</b>	<b>29</b>
<b>III.3.1 Description de la technologie :</b>	<b>29</b>
<b>III.3.2 Préoccupations environnementales :</b>	<b>31</b>
<b>III.3.2 Comment diminuer l'empreinte écologique ?</b>	<b>33</b>
<b>III.4 L'extraction et le raffinage du lithium à partir des minerais :</b>	<b>33</b>
<b>III.4.1Description de la technologie :</b>	<b>33</b>
<b>III.4.2 Préoccupations environnementales :</b>	<b>35</b>
<b>III.4.3 Comment diminuer l'impact environnementale ?</b>	<b>36</b>
<b>Conclusion générale :</b>	<b>40</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>42</b>

## Liste des figures

<b>Figure I.1:</b> Le lithium aspect géologique économique et industriel .....	13
<b>Figure II.1:</b> Extraction de Lithium à partir de lépidolite .....	20
<b>Figure II.2 :</b> Lithium métallique dans l'huile .....	21
<b>Figure III.1:</b> Graphique illustrant l'évolution de la production (extraction du sol) mondiale de lithium depuis 1995, pour les principaux pays producteurs (source : Visual Capitaliste)....	28
<b>Figure III.2 :</b> Extraction du lithium par évaporation de saumures dans des bassins artificiels (source : Reuters) .....	29
<b>Figure III.3 :</b> Schéma des principales étapes de l'extraction et du raffinage du lithium à partir des aquifères salins, riches en lithium (source : Natural Resources Defence Council, NRDC).....	30
<b>Figure III.4 :</b> Mine à ciel ouvert de Green bushes en Australie (Source : Talison Lithium).....	33



# INTRODUCTION GENERALE

### Introduction générale :

Le lithium se trouve dans la nature dans environ 145 minéraux, mais seulement dans quelques-uns, il peut être considéré présent dans des quantités commerciales, en plus de sa présence dans les saumures, les eaux thermales et l'eau de mer, dans des quantités très différentes qui oscillent entre 20 ppm et 65 ppm.

Cet élément peut se trouver sous des formes très diverses, comme dans des concentrations anormales de pegmatites, dans des ambiances sédimentaires associées à l'argile, dans des zones d'altération hydrothermale associées à des minéraux à faibles et à hautes températures, dans des évaporites non marines, dans des saumures d'ambiances désertiques d'eaux salines ou dans des saumures associées à des gisements de pétrole, dans des gisements de bore, béryllium, fluor, manganèse et éventuellement phosphate, dans des ambiances lacustres associées à des silicates de magnésium, dans des eaux, plantes et sols d'ambiances désertiques et dans des roches sédimentaires riches en fer.

À tout ce qui a été énuméré ci-avant, il faut rajouter que les principaux gisements en exploitation, se trouvent dans des pegmatites ou dans des saumures de paléo-dépôts lacustres salins et, dans la plupart des cas, les facteurs de prospection indiquent uniquement la présence de concentrations anormales de lithium, qui n'ont pas rendement économique pour le marché actuel. Au Chili, le lithium se trouve dans les zones de dépôts salins de la Haute Cordillère et, dans une proportion moindre, dans les champs de nitrates et les gisements salins associés.

Le lithium a diverses applications tel que : Fabrication de batteries pour les ordinateurs, téléphones portables et voitures électriques (dont la demande va beaucoup augmenter avec leur production en masse), produits pharmaceutiques spécifiques pour les problèmes de troubles nerveux (antidépresseurs), purification de l'air ambiant, alliages pour l'aéronautique ( Mg-Li), lubrifiants industriels à base de lithium utilisés dans l'industrie nucléaire comme régulateurs du pH du réfrigérant, obtention de tritium pour les futures générations de réacteurs de fusion nucléaire.

Le carbonate de lithium ( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ) est le composé du lithium le plus utilisé. Un gramme de lithium est contenu dans 5,32 grammes de carbonate de lithium. Le Chili est le premier producteur mondial de lithium, avec des réserves connues dans le Salair d'Atacama de l'ordre de  $4.3 \times 10^6$  tonnes. Il s'agit de son principal réservoir et il correspond à 40 % des réserves d'intérêt économique au niveau mondial. Avec l'arrivée sur le marché de la Société minière

## **Introduction Générale**

---

Salar de Atacama Ltda., MINSAL, en 1998, le Chili est devenu le premier producteur et exportateur mondial de lithium, en atteignant 30 000 tonnes de concentré, ce qui équivaut à 50% de la demande du marché mondial, des chiffres grâce auxquels la que la Sociedad Chilena del Litio, SCL, lidère les exportations de ce minéral. Chaque année, uniquement au Japon des travaux sont publiés avec des études d'environ 10 000 nouveaux matériaux, avec des propriétés physiques, chimiques, électriques, magnétiques, ioniques et électrochimiques différentes. De nouveaux produits sont en cours de développement comme le cyanure, l'hydroxyde et le lithium métallique.

# **Chapitre I**

**Lithium : définition**

**caractéristiques et contexte géologique**

## **Chapitre I : Lithium : définition caractéristiques et contexte géologique**

### **I.1 Définition :**

Le lithium est un élément chimique alcalin de numéro atomique 3. Il est le plus léger des métaux alcalins et a une masse atomique de 6,94. Le lithium est un métal mou, argenté et très réactif qui peut être trouvé dans la nature sous forme de composés tels que le spodumène, la pétalite, la lépidolite et l'amblyopie. Du point de vue géologique, le lithium est considéré comme un élément rare, car il est présent dans l'écorce terrestre à des concentrations relativement faibles. Les gisements de lithium sont généralement associés à des roches ignées, telles que les granites, les pegmatites et les rhyolites, qui ont été formées par la cristallisation à haute température et à haute pression de magma. Les pegmatites sont les dépôts les plus courants pour les minerais de lithium, et ils peuvent contenir des concentrations de lithium allant jusqu'à plusieurs pour cent. Les sources secondaires de lithium comprennent les saumures, qui sont des liquides salés riches en lithium et qui se trouvent dans les bassins sédimentaires. Le lithium est devenu un élément d'importance stratégique et économique en raison de son utilisation dans les batteries rechargeables pour les véhicules électriques et les appareils électroniques portables, ainsi que dans les applications industrielles telles que les verres spéciaux et les céramiques. Les gisements de lithium sont actuellement exploités dans plusieurs pays, notamment en Australie, en Argentine, au Chili et aux États-Unis.



### **I.2 Source et contexte géologique :**

L'exploitation du lithium se fait essentiellement par deux types d'opération : l'exploitation des saumures enrichies en lithium dans les lacs salés (salars) ou l'extraction traditionnelle des minéraux de lithium dans les granites pegmatitiques.

La production mondiale de lithium provient en grande partie de saumures (environ 70 %) enrichies en chlorure de lithium extraites de lacs salés (salars) principalement en Amérique du Sud.

Les coûts de production sont de beaucoup inférieurs à ceux des exploitations traditionnelles (environ 30 %) de minéraux de lithium. Les principaux pays producteurs de lithium sont le Chili, l'Australie, la Chine et l'Argentine. En Australie, au Portugal, au Zimbabwe, au Canada,

## **Chapitre I : Lithium : définition caractéristiques et contexte géologique**

en Chine et au Brésil, le lithium est extrait de minéraux de lithium, tandis qu'au Chili, en Argentine, aux États-Unis et en Chine, l'extraction se fait principalement à partir de saumures. Les minéralisations de minéraux de lithium sont principalement associées à des assemblages de roches d'âge archéen comprenant des roches mafiques à ultramafiques ou des roches méta sédimentaires injectées par des dykes de granite pegmatitiques. Ces dykes sont souvent associés à de grandes intrusions granitiques mises en place dans des ceintures de roches vertes.

Ces pegmatites granitiques constituent souvent des complexes intrusifs hyper alumineux. Parmi ces différents types de pegmatite, seules les pegmatites complexes et les pegmatites à albite–spodumène renferment des minéraux de lithium. Ces types de pegmatite se distinguent par un assemblage typique de minéraux, une signature géochimique particulière, ainsi que par un potentiel économique en métaux rares.

Les pegmatites complexes forment généralement des dépôts lenticulaires ou podiformes, sans grande continuité en profondeur. Les diverses zones minéralisées à l'intérieur de ces pegmatites présentent des teneurs variables et des assemblages minéralogiques particuliers. Certaines zones très riches peuvent contenir jusqu'à 40 % de minéraux de lithium.

Les pegmatites à albite-spodumène sont caractérisées principalement par la présence de spodumène distribué uniformément à travers les dykes ou les amas de pegmatites. Les minéraux accessoires sont le béryl, la colombite, la tantalite et la cassitérite.

Les éléments chimiques caractéristiques des pegmatites à albite-spodumène sont le lithium (Li) associé parfois à l'étain (Sn), le béryllium (Be), le tantale (Ta), le niobium (Nb) et le bore (B). Une autre classification des pegmatites à métaux rares est basée sur la composition minéralogique de la roche, la signature géochimique des éléments en traces et l'association des pegmatites avec des types particuliers de granites. Elle permet de distinguer trois types de pegmatites : • les pegmatites de type LCT (Lithium-Césium-Tantale) ; les pegmatites de type NYF (Niobium-Yttrium-Fluor); • les pegmatites mixtes (combinaison des types LCT-NYF). Parmi ces différents types de pegmatite, seules les pegmatites de type LCT renferment des minéraux de lithium. Ce sont des pegmatites à albite-spodumène et béryl.

Elles sont caractérisées par un assemblage typique d'éléments alcalins comprenant le lithium (Li), le césium (Cs) et le rubidium (Rb) accompagnés de tantale (Ta), de béryllium (Be), d'étain (Sn), de gallium (Ga), de niobium (Nb), de bore (B), de phosphore (P) et de fluor (F). Les pegmatites de type LCT sont également riches en minéraux de phosphates. Ces pegmatites

## **Chapitre I : Lithium : définition caractéristiques et contexte géologique**

hyper alumineuses sont associées à des granites très hétérogènes synorogéniques à tardif-oroogéniques ou à des granites anoroogéniques (Cerny, 1991).

### **I.3 Caractéristiques :**

L'élément lithium est présent depuis le Big Bang et la naissance de l'Univers. Il fait partie, avec l'hélium et l'hydrogène, des trois seuls éléments engendrés à cet instant. En fait, le lithium est un élément unique en son genre. Il a trois "caractéristiques génétiques" qu'il est le seul à posséder en même temps.

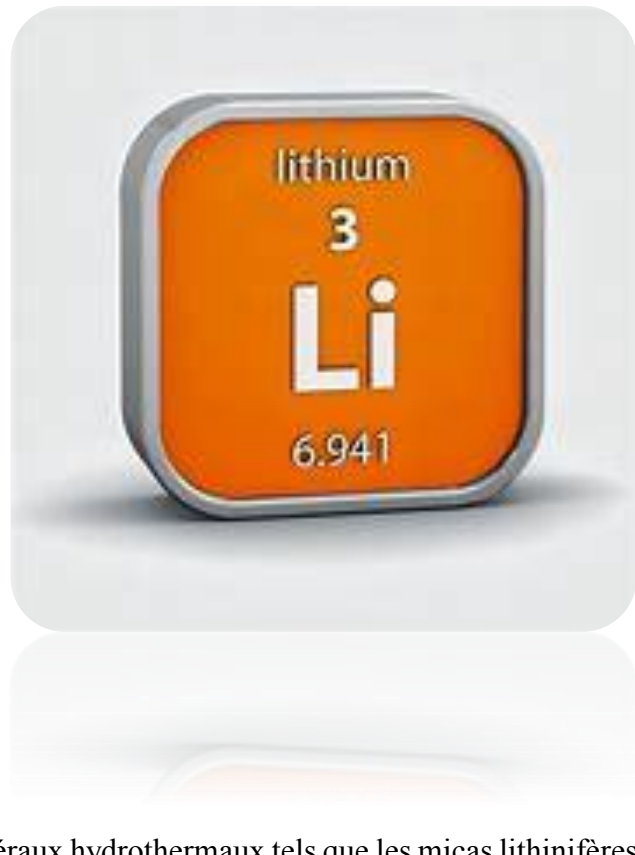
- 1- Il a été synthétisé lors du Big Bang avec l'hydrogène et l'hélium.  $1\text{H}$  et  $4\text{He}$  représentent 99% des isotopes formés,  $2\text{H}$  et  $3\text{He}$  représentent quasiment le 1 % restant, le  $7\text{Li}$  n'ayant été synthétisé qu'à l'état de trace (10<sup>-10</sup> des noyaux formés).
- 2- Ses deux isotopes ( $6\text{Li}$  et  $7\text{Li}$ ) ne sont pas synthétisés par les réactions de fusion nucléaire ayant lieu dans les étoiles ; au contraire, comme les deux éléments suivants sur la table périodique des éléments, le béryllium ( $9\text{Be}$ ) et le bore ( $10\text{B}$  et  $11\text{B}$ ), il est détruit dans les cœurs de ces étoiles où ont lieu ces réactions de fusion.
- 3- Une majorité du lithium (sauf le lithium issu du Big Bang) et la totalité du béryllium et du bord de l'univers sont obtenus par des réactions de spallation, réactions où des rayons cosmiques de très haute énergie cassent des noyaux de masse atomique 12 à 16 (carbone, azote, oxygène) en fragment plus petits.

Ces mécanismes de formation font que le lithium est un élément rare dans l'Univers (en nombre d'atomes, environ 10<sup>-10</sup> par rapport à l'hydrogène et 10<sup>-4</sup> par rapport au silicium, la référence pour les planètes telluriques), beaucoup plus rare que les autres métaux alcalins légers que sont le sodium (Na) et le potassium (K). Découvert sous forme de sel en 1817 par Johan August Arfwedson dans des minéraux de pétalite ( $\text{LiAlSi}_4\text{O}_{10}$ ), il a fallu attendre que les procédés électrochimiques soient bien maîtrisés pour qu'il soit isolé par William Thomas Brande et Humphry Davy l'année suivante. Il tire son nom du grec "lithos", la pierre, ayant été découverte dans des minéraux, à la différence des autres alcalins connus à l'époque, le potassium et le sodium, qui, eux, avaient été découverts dans des organismes végétaux, en particulier dans leurs cendres. Sa découverte et son isolement n'ont pas été rendus facile par sa haute réactivité avec l'oxygène et l'eau. Dans la nature, il n'est ainsi jamais présent dans sa forme native mais toujours sous forme de sels, ou d'oxydes, dans des minéraux.

## Chapitre I : Lithium : définition caractéristiques et contexte géologique

### I.4 La prospection du lithium :

En ce qui concerne les indicateurs géologiques, voici quelques-uns des éléments à prendre en compte lors de la prospection du lithium : Présence de minéraux indicateurs : Certains minéraux sont considérés comme des indicateurs de la présence de lithium. Les minéraux lithinifères tels que le spodumène, la lépidolite, la pétalite et la béryl peuvent être des indicateurs potentiels de la présence de lithium dans une région donnée. Altérations spécifiques : Les altérations géochimiques et minéralogiques spécifiques associées à la présence de lithium peuvent servir d'indicateurs. Par exemple, l'altération de la pegmatite peut entraîner la formation de minéraux hydrothermaux tels que les micas lithinifères et les phosphates lithinifères.



### I.5 Condition géologique de formation du Lithium :

Le lithium se forme principalement à travers des processus géologiques spécifiques. Les gisements de lithium se trouvent souvent dans des environnements géologiques particuliers, tels que les pegmatites, les roches ignées et métamorphiques, ainsi que les saumures salines. Voici une description générale de ces types de gisements : Pegmatites riches en lithium : Les pegmatites sont des intrusions magmatiques à grain très grossier. Elles se forment à des températures et pressions élevées, généralement associées à des roches granitiques. Les pegmatites riches en lithium contiennent des minéraux tels que le spodumène et le pétalite, qui sont des sources importantes de lithium. La formation de pegmatites nécessite des conditions géologiques spécifiques, telles que des magmas enrichis en lithium et des processus de cristallisation fractionnée. Roche ignée et métamorphique : Le lithium peut également être présent dans des roches ignées et métamorphiques, telles que les granites, les granodiorites et les migmatites. Le lithium est incorporé dans la structure cristalline des minéraux tels que la lépidolite, le spodumène et le feldspath. La libération du lithium de ces minéraux peut se produire en raison de l'érosion et de l'exposition prolongée à des conditions de surface.



## **Chapitre I : Lithium : définition caractéristiques et contexte géologique**

Saumures salines : Les saumures salines sont une autre source de lithium. Elles se forment dans des bassins sédimentaires où l'évaporation de l'eau a concentré les minéraux dissous, y compris le lithium. Ces bassins peuvent être situés dans des environnements continentaux ou marins. Les saumures salines riches en lithium sont souvent associées à des régions géologiques spécifiques où les conditions d'évaporation sont favorables à la concentration du lithium.

### **I.6 Exploration et évaluation des gisements de lithium :**

Les méthodes géophysiques, géochimiques et géologiques sont utilisées pour localiser les gisements de lithium. Les techniques de prospection comprennent la cartographie géologique détaillée, les études géochimiques des échantillons de sol et de roche, et les méthodes géophysiques pour détecter les anomalies. L'évaluation des ressources de lithium utilise des outils géologiques et des modèles d'estimation pour estimer les quantités de lithium présentes.

### **I.7 Contexte géologique régional :**

Différentes régions du monde abritent des gisements de lithium significatifs, comme le triangle du lithium en Amérique du Sud, la ceinture de pegmatites en Afrique et les gisements de pegmatites en Australie. Chaque région présente des caractéristiques géologiques spécifiques qui influencent la formation des gisements de lithium.

### **I.8 Les conditions géologiques favorables à la concentration du lithium :**

Les conditions géologiques favorables à la concentration du lithium dépendent de plusieurs facteurs.

#### **I.8.1 Présence de sources lithinifères :**

La présence de roches magmatiques riches en lithium, telles que les pegmatites et les granites, est un facteur déterminant. Ces roches peuvent servir de sources primaires de lithium et fournir les minéraux lithinifères nécessaires à la formation des gisements.

**I.8.2 Conditions de concentration :** Les conditions géochimiques et géologiques favorables à la concentration du lithium sont nécessaires pour que le lithium se sépare et s'accumule en concentrations économiquement exploitables. Cela peut inclure des processus tels que la cristallisation fractionnée, l'altération hydrothermale et la migration de solutions riches en lithium.

## **Chapitre I : Lithium : définition caractéristiques et contexte géologique**

### **I.8.3 Stabilité géologique :**

Les régions géologiques stables, où les processus géologiques ont été relativement inactifs pendant de longues périodes, peuvent favoriser la préservation et l'accumulation du lithium. Cela permet aux concentrations de lithium de se former et de se maintenir sans être perturbées par des événements géologiques majeurs.

### **I.8.4 Conditions hydrologiques :**

Dans le cas des dépôts alluviaux et des saumures salines, les conditions hydrologiques jouent un rôle crucial. Une hydrologie adéquate, avec des rivières, des lacs ou des lagunes, est nécessaire pour permettre le transport et la concentration des sédiments riches en lithium.

Il convient de noter que la présence de gisements de lithium dans certaines régions géologiques peut également être influencée par des facteurs tectoniques, climatiques et géographiques spécifiques à chaque région. La combinaison de ces différents facteurs géologiques et géochimie

### **I.9 Processus géologiques impliqués dans la formation des gisements de lithium :**

Les mécanismes de cristallisation fractionnée et d'accumulation des minéraux riches en lithium dans les pegmatites et les roches ignées. Les processus d'érosion, de transport et de concentration des minéraux porteurs de lithium dans les dépôts alluviaux et les saumures salines

Les processus géologiques impliqués dans la formation des gisements de lithium varient en fonction du type de gisement. Voici les principaux processus impliqués dans la formation des gisements de lithium dans les pegmatites et les roches ignées, ainsi que dans les dépôts alluviaux et les saumures salines :

#### **I.9.1 Formation des gisements de lithium dans les pegmatites et les roches ignées :**

- **Cristallisation fractionnée** : Pendant le processus de refroidissement et de solidification du magma, les minéraux se forment et se séparent en fonction de leur composition chimique. Le lithium a tendance à se concentrer dans les derniers stades de cristallisation, ce qui conduit à la formation de minéraux lithinifères tels que le spodumène, le lépidolite et la pétalite.
- **Diffusion et migration** : Une fois que les minéraux lithinifères se sont formés, des processus de diffusion et de migration peuvent se produire, entraînant une redistribution

## **Chapitre I : Lithium : définition caractéristiques et contexte géologique**

du lithium à l'intérieur de la pegmatite. Cela peut conduire à la formation de zones enrichies en lithium.

### **I.9.2 Formation des gisements de lithium dans les dépôts alluviaux :**

**-Érosion :** L'érosion des roches lithinifères expose le lithium à l'action des agents météoriques tels que les rivières, les glaciers et les vents.

**-Transport :** Les particules contenant du lithium sont transportées par les cours d'eau et les glaciers sur de longues distances, souvent jusqu'à des bassins sédimentaires ou des lacs.

**-Dépôt et concentration :** Lorsque les particules contenant du lithium sont déposées dans des environnements lacustres ou des plaines inondables, elles peuvent se concentrer par des processus de sédimentation et de décantation. Les minéraux lithinifères, tels que le spodumène et la pétalite, ainsi que les argiles riches en lithium, peuvent s'accumuler et former des dépôts alluviaux enrichis en lithium.

### **I.9.3 Formation des gisements de lithium dans les saumures salines :**

✚ **Source géologique :** Les saumures salines riches en lithium peuvent provenir de l'érosion et de la lixiviation des roches lithinifères. Le lithium est dissous dans les eaux souterraines et transporté vers des bassins sédimentaires.

✚ **Évaporation :** Les saumures salines contenant du lithium sont souvent piégées dans des bassins fermés ou des tous ces processus il est important de noter que des conditions géologiques favorables, telles que la présence de roches lithinifères, des mouvements tectoniques et des conditions hydrologiques appropriées, sont nécessaires pour la formation et la concentration des gisements de lithium

## **I.10 Propriétés minéralogique du lithium :**

### **I.10.1 Les minéraux porteurs de lithium et leur occurrence géologique :**

Le lithium se trouve principalement dans des minéraux spécifiques appelés minéraux lithinifères. Voici quelques-uns des minéraux porteurs de lithium les plus courants :

- **Spodumène :** Il s'agit du principal minéral porteur de lithium. Le spodumène est un silicate de lithium et d'aluminium. Il se présente sous forme de cristaux prismatiques et est souvent associé à des pegmatites.

## **Chapitre I : Lithium : définition caractéristiques et contexte géologique**

- **Pétalite:** La pétalite est un autre minéral lithinifère important. Il s'agit d'un silicate de lithium et d'aluminium, souvent trouvé dans les pegmatites et les granites.
- **Lépidolite :** Le lépidolite est un minéral lithinifère appartenant au groupe des micas. Il contient du lithium, de l'aluminium, du potassium et du fluor. Il est souvent associé à des pegmatites et à des dépôts alluviaux.
- **Amblygonite:** L'amblygonite est un phosphate de lithium et d'aluminium. Il se trouve généralement dans les pegmatites et les dépôts alluviaux.
- **Spodumène triphane :** Cette variété de spodumène contient également du lithium et est souvent utilisée comme pierre gemme.

Ces minéraux porteurs de lithium se forment généralement dans des environnements géologiques tels que les pegmatites (roches ignées différenciées), les granites, les dépôts alluviaux, les saumures salines et les zones d'altération hydrothermale. La présence de ces minéraux lithinifères est un indicateur important lors de la prospection et de l'évaluation des gisements de lithium.

### **I.11 Composition chimique et propriétés physiques du lithium :**

Le lithium est un élément chimique ayant le symbole Li et le numéro atomique 3. Il appartient à la famille des métaux alcalins et se situe dans le groupe 1 du tableau périodique. Sur le plan chimique, le lithium est très réactif et présente une faible densité. Il possède une structure cristalline cubique à faces centrées et est un bon conducteur d'électricité et de chaleur. Le lithium est également relativement mou et peut être facilement coupé avec un couteau.

### **I.12 Abondance et distribution géographique du lithium dans l'écorce terrestre :**

Le lithium est relativement abondant dans l'écorce terrestre, bien qu'il soit généralement présent en faibles concentrations. Sa concentration moyenne dans l'écorce terrestre est d'environ 20 parties par million (ppm). Cependant, sa distribution géographique est inégale, avec des gisements de lithium concentrés dans certaines régions spécifiques. Les principales sources de lithium proviennent de gisements de minéraux lithinifères et de saumures salines.

## **Chapitre I : Lithium : définition caractéristiques et contexte géologique**

### **I.13 Les conditions géologiques pour la concentration du lithium :**

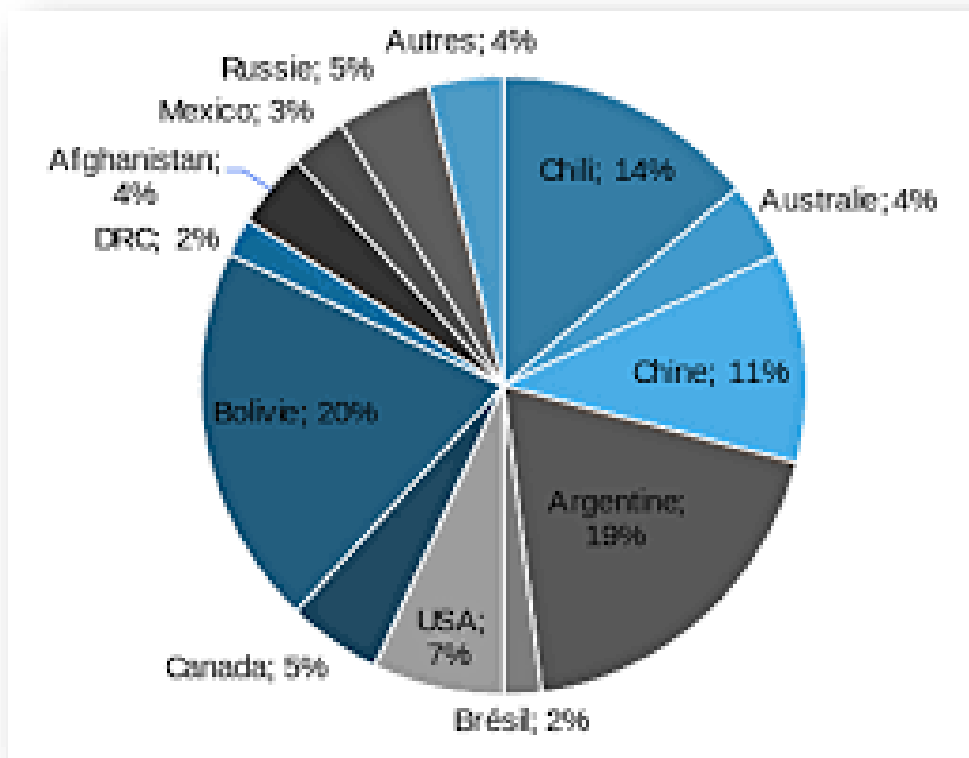
Les conditions géologiques favorables à la concentration du lithium dépendent de plusieurs facteurs. Voici quelques-uns des facteurs clés : Présence de sources lithinifères : La présence de roches magmatiques riches en lithium, telles que les pegmatites et les granites, est un facteur déterminant. Ces roches peuvent servir de sources primaires de lithium et fournir les minéraux lithinifères nécessaires à la formation des gisements. Conditions de concentration : Les conditions géochimiques et géologiques favorables à la concentration du lithium sont nécessaires pour que le lithium se sépare et s'accumule en concentrations économiquement exploitables. Cela peut inclure des processus tels que la cristallisation fractionnée, l'altération hydrothermale et la migration de solutions riches en lithium. Stabilité géologique : Les régions géologiques stables, où les processus géologiques ont été relativement inactifs pendant de longues périodes, peuvent favoriser la préservation et l'accumulation du lithium. Cela permet aux concentrations de lithium de se former et de se maintenir sans être perturbées par des événements géologiques majeurs. Conditions hydrologiques : Dans le cas des dépôts alluviaux et des saumures salines, les conditions hydrologiques jouent un rôle crucial. Une hydrologie adéquate, avec des rivières, des lacs ou des lagunes, est nécessaire pour permettre le transport et la concentration des sédiments riches en lithium. Il convient de noter que la présence de gisements de lithium dans certaines régions géologiques peut également être influencée par des facteurs tectoniques, climatiques et géographiques spécifiques à chaque région. La combinaison de ces différents facteurs géologiques et géochimie

### **I.14 Caractérisation des gisements de lithium :**

Plusieurs méthodes géologiques sont utilisées pour caractériser les gisements de lithium et évaluer leur potentiel. Voici quelques-unes de ces méthodes : Cartographie géologique : La cartographie géologique consiste à étudier et à cartographier les formations géologiques, les structures, les altérations et les minéraux présents dans la zone d'intérêt. Cela permet de comprendre la géologie régionale et de localiser les zones potentielles de dépôts de lithium. Analyse pétrographique : L'analyse pétrographique implique l'étude des sections minces de roches au microscope pour identifier les minéraux présents et évaluer leur composition et leur texture. Cela permet d'identifier les minéraux porteurs de lithium et d'évaluer leur teneur. Géochimie : L'analyse géochimique comprend des études sur la composition chimique des échantillons de roche, de sol, d'eau ou de végétation. Des techniques telles que la spectrométrie de fluorescence X (XRF) et l'analyse par activation neutronique (AAN) peuvent être utilisées

## Chapitre I : Lithium : définition caractéristiques et contexte géologique

pour déterminer les concentrations de lithium dans les échantillons. Géophysique : Les méthodes géophys



**Fig1.1:** Le lithium aspect géologique économique et industriel

### I.15 Types de gisements de lithium :

Les pegmatites riches en lithium contiennent des minéraux tels que le spodumène et le pétalite. Les roches ignées et métamorphiques peuvent contenir du lithium dans des minéraux tels que le lépidolite et le feldspath. Les saumures salines riches en lithium se trouvent dans des bassins évaporitiques.

## **Chapitre I : Lithium : définition caractéristiques et contexte géologique**

### **I.16.1 Quelques exemples des régions d'existence des dépôts de lithium dans le monde :**

- **Triangle du lithium en Amérique du Sud :** Le Triangle du lithium est situé en Amérique du Sud, principalement en Argentine, au Chili et en Bolivie. Cette région est la principale source de lithium dans le monde, avec d'importants gisements de lithium associés à des salars (lacs salés) riches en lithium. Les salars sont formés par l'évaporation de l'eau dans des bassins endoréiques (sans débouché) et l'accumulation de sels, y compris des composés de lithium. Les processus d'érosion, de transport et d'évaporation jouent un rôle clé dans la concentration des minéraux de lithium dans les salars.
- **Pegmatites en Australie occidentale :** L'Australie occidentale, en particulier la région de Green bushes, est reconnue pour ses importants gisements de lithium associés à des pegmatites. Les pegmatites sont des roches ignées différenciées riches en minéraux lithinifères, tels que le spodumène. Ces gisements de lithium sont formés par des processus de cristallisation fractionnée lors de l'évolution des magmas granitiques, qui entraînent la concentration du lithium et d'autres éléments dans les pegmatites.
- **Gisements de lithium en Chine :** La Chine est un important producteur de lithium, avec des gisements situés principalement dans les provinces de Sichuan et du Tibet. Ces gisements sont associés à des pegmatites et à des dépôts alluviaux. La géologie régionale est caractérisée par des zones tectoniques actives, telles que la ceinture de collision entre l'Inde et l'Eurasie, qui a favorisé la formation de pegmatites riches en lithium.
- **Gisements de lithium en Amérique du Nord :** Des gisements de lithium significatifs se trouvent également en Amérique du Nord. Par exemple, le Nevada aux États-Unis est réputé pour ses gisements de lithium associés à des pegmatites et à des saumures salines. Les régions géologiques comprennent des terrains volcaniques, des bassins endoréiques et des zones de tectonique active, qui jouent un rôle dans la concentration des minéraux de lithium.

## **Chapitre I : Lithium : définition caractéristiques et contexte géologique**

### **I.17 Les caractéristiques géologiques spécifiques de ces régions influencent la formation des gisements de lithium :**

Cela peut inclure des conditions géologiques favorables à la concentration du lithium, telles que des processus d'altération hydrothermale, des intrusions magmatiques, des roches riches en éléments lithinifères, des structures géologiques propices à l'accumulation de minéraux, ainsi que des facteurs géochimiques et géomorphologiques favorables à la formation et à la préservation des gisements de lithium. La compréhension de ces caractéristiques géologiques spécifiques est essentielle pour l'exploration et l'exploitation efficaces des gisements de lithium.

### **I.18 Cartographie géologique détaillée :**

La cartographie géologique est essentielle pour identifier les formations géologiques potentiellement favorables à la présence de gisements de lithium. Cela implique la collecte d'informations sur la lithologie, la structure géologique et la distribution des roches et des minéraux dans la région d'intérêt. L'analyse de la géométrie et de l'histoire géologique de la région peut aider à cibler les zones prospectives.

**I.18.1 Analyse pétrographique :** L'analyse pétrographique consiste à étudier les propriétés et les caractéristiques des minéraux dans les échantillons de roches prélevés sur le terrain. L'identification de minéraux indicateurs de lithium, tels que la spodumène, la lépidolite ou la pétalite, peut fournir des indications préliminaires sur la présence potentielle de minéralisation de lithium.

**I.18.2 Géochimie :** L'analyse géochimique des échantillons de roches, de sols ou de saumures peut être utilisée pour détecter les anomalies de lithium. Des techniques telles que la spectrométrie de masse, la fluorescence X et la spectroscopie d'absorption atomique permettent de mesurer la teneur en lithium et d'autres éléments chimiques. Les anomalies géochimiques peuvent indiquer la présence de minéralisation de lithium dans une région donnée.

**I.18.3 Techniques géophysiques :** Les méthodes géophysiques sont utilisées pour détecter les variations de propriétés physiques dans le sous-sol, ce qui peut être lié à la présence de minéralisation de lithium. Des techniques telles que la magnétométrie, la gravimétrie, l'électromagnétisme, la radiométrie et la sismique peuvent être appliquées pour identifier les structures géologiques, les altérations ou les corps minéralisés associés au lithium.



## **Chapitre I : Lithium : définition caractéristiques et contexte géologique**

**I.18.4 Indicateurs géologiques :** Certains indicateurs géologiques peuvent aider à la prospection du lithium. Cela peut inclure la présence de minéraux indicateurs de lithium mentionnés précédemment, ainsi que des altérations spécifiques telles que la pegmatitisation (formation de pegmatites riches en minéraux lithinifères), la greisenisation (altération associée à des dépôts de lithium), ou des altérations hydrothermales caractéristiques.

L'utilisation de ces méthodes et indicateurs géologiques permet aux géologues et aux experts en exploration de localiser et d'évaluer les gisements de lithium potentiels. Cependant, il convient de noter que l'exploration minière est un processus complexe et qu'il peut nécessiter une combinaison de techniques et d'approches pour obtenir une évaluation complète et précise

### **I.19 Cristallisation fractionnée dans les pegmatites et les roches ignées :**

Les pegmatites sont des intrusions magmatiques à grain très grossier qui se forment à des températures et pressions élevées. Lors de la cristallisation fractionnée, les minéraux riches en lithium, tels que la spodumène et le pétalite, se concentrent dans les parties les plus tardives du magma, créant ainsi des zones enrichies en lithium. Ce processus peut se produire dans des environnements géologiques favorables, tels que les zones de fusion partielle des roches granitiques.

### **I.20 Processus d'érosion et de transport :**

Au fil du temps, les roches contenant du lithium sont exposées à l'érosion due aux forces naturelles, comme l'action des cours d'eau, du vent et de la glace. Les fragments de roche contenant des minéraux riches en lithium sont ensuite transportés par les rivières et les glaciers, se déposant dans les lits de rivières, les deltas ou les plaines alluviales. Ce processus permet la concentration des minéraux porteurs de lithium dans des zones spécifiques.

### **I.21 Concentration dans les dépôts alluviaux et les saumures salines :**

Les dépôts alluviaux résultent de l'accumulation de matériaux transportés par les cours d'eau. Dans ces dépôts, les minéraux porteurs de lithium, tels que la spodumène et la lépidolite, peuvent être concentrés dans des zones spécifiques, souvent sous la forme de gisements de sédiments ou de placers.

Les saumures salines riches en lithium se forment par l'évaporation de l'eau dans des bassins sédimentaires. L'eau contenant des minéraux dissous, y compris le lithium, s'évapore plus

## **Chapitre I : Lithium : définition caractéristiques et contexte géologique**

---

rapidement que les autres composants, conduisant à la concentration des minéraux dans les saumures. Ce processus peut se produire dans des environnements continentaux ou marins.

Ces processus géologiques contribuent à la formation et à la concentration des gisements de lithium, créant ainsi des ressources exploitables pour l'industrie minière. Il est important de comprendre ces processus pour évaluer la viabilité économique des gisements de lithium et mettre en œuvre des méthodes d'exploration et d'exploitation appropriées.

# **Chapitre 2**

## **Les gisements de lithium**

**II.1 Historique :**

Le lithium fut découvert par le chimiste suédois Johan August Arfwedson en 1817 en analysant de la pétalite ( $\text{LiAlSi}_4\text{O}_{10}$ ). En 1800 lors d'un voyage en Europe, José Bonifácio de Andrada e Silva découvrit un nouveau minéral sur l'île de Utö dans la commune de Hanninge en Suède qu'il nomma pétalite<sup>16</sup>. C'est en analysant cette roche qu'Arfwedson, dans le laboratoire de Berzelius, identifie un nouvel élément jusque-là inconnu. Plus tard, il le détecte dans des minéraux de spodumène ( $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$ ) et de lépidolite ( $\text{K}(\text{Li}, \text{Al})_3(\text{Si}, \text{Al})_{40}\text{O}_{10}(\text{F}, \text{OH})_2$ ) eux aussi en provenance de l'île de Utö. C'est pour souligner son origine minérale, contrairement aux deux autres alcalins connus à l'époque le potassium et le sodium qui avaient été découverts dans le règne végétal, que Berzelius le nomme *lithion*.

En 1818, Christian Gmelin (1792-1860) note que les « sels de lithion » donnent une flamme rouge et brillante.

Les deux hommes cherchent à isoler l'élément de son sel mais n'y parviennent pas. L'élément sera isolé par électrolyse d'un oxyde de lithium par William Thomas Brande et Sir Humphry Davy.

La production commerciale de lithium commença en 1923 par la firme allemande Metallgesellschaft AG qui utilisa l'électrolyse d'un mélange de chlorure de lithium et de chlorure de potassium fondu.

Les différentes nations impliquées dans le développement de la bombe H à la fin des années 1940 et au début des années 1950 produisent du deutériure de lithium enrichi en lithium 6. Le lithium appauvri est introduit sur le marché des réactifs, augmentant significativement l'incertitude sur la masse atomique du lithium. En conséquence, la masse atomique d'échantillons de lithium (naturels et commerciaux) peut varier entre 6,938 7 et 6,995 9 u



**FigII.1:** Extraction de Lithium à partir de lépidolite

## II.2 Le lithium métallique :

Il ne peut être stocké que dans l'huile et sous atmosphère protectrice car il est trop réactif pour être stocké dans l'eau ou l'air. Il est si peu dense qu'il flotte dans l'huile. La croûte terrestre en contient environ 20 ppm ( $10^{-6}$ ), les océans environ 17 ppm. C'est le 33<sup>ème</sup> élément le plus abondant de la croûte. Des accumulations naturelles en Amérique du Sud contiennent jusqu'à 0,16 % Li (1600 ppm, soit 1,6 kg/tonne) ; et certaines en Australie jusqu'à 4 % (40 000 ppm, soit 40 kg/tonne).



Figure II.2 : Lithium métallique dans l'huile

Élément	Abondance atomique cosmique normalisée à Si = 106 atomes	Abondance atomique dans la croûte terrestre normalisée à Si = 106 atomes	Teneur massique dans la croûte (ppm)
Silicium (Si)	106	106	≈ 280000
Lithium (Li)	102	103	≈ 20
Sodium (Na)	3.104	105	≈ 23 000
Potassium (K)	5.103	5.104	≈ 20 000

Tableau 1. Abondance du lithium dans l'Univers et dans la croûte terrestre – Comparaison avec les autres alcalins légers.

L'abondance cosmique est supposée équivalente à l'abondance dans l'atmosphère solaire, les chondrites primitives et donc la Terre globale. On voit que le lithium (en masse) est environ 1000 fois moins abondant que le sodium et le potassium dans la croûte, mais 10 fois plus abondant dans la croûte que dans la Terre globale. La croûte montre déjà un enrichissement en lithium d'un facteur 10 par rapport à la Terre globale. Les minerais de lithium sont enrichis d'un facteur 100 par rapport aux roches "crustales" usuelles. Le lithium, comme les autres éléments alcalins sodium, potassium..., possède deux propriétés chimiques à l'origine de ses minerais : (1) il est très soluble dans l'eau sous forme de sels, d'hydroxydes..., (2) il est "incompatible", mot qui a plusieurs synonymes, dont hygromagmaphile ou hygromagmaphile, et qui renvoie à la propriété qu'ont certains éléments à être difficilement intégrés dans les silicates qui cristallisent à partir d'un magma silicaté et qui se concentrent donc dans la phase fluide résiduelle. Inversement, les éléments incompatibles sont les premiers à quitter le réseau cristallin des silicates pour gagner le magma lors d'une fusion partielle. Rien que cette deuxième propriété explique la surabondance des alcalins (dont le lithium) dans la croûte par rapport à la Terre globale. • Enfin, et pour commencer à répondre à la question de l'intérêt suscité par le lithium dans l'industrie, il est le plus léger des alcalins. Sa légèreté et son fort potentiel électrochimique en font un élément de choix dans les applications de stockage de l'électricité dans les batteries.

# **Chapitre 3**

## **Exploitation et impact sur l'environnement**



**III.1 Exploitation du lithium :**

Comme toutes les ressources, le lithium nécessite de l'énergie, de l'eau (beaucoup) et du travail humain.

Cela crée ainsi un cycle entre lithium et pollution de l'environnement et notamment des émissions de CO<sub>2</sub>.

L'extraction du lithium n'est donc pas plus polluante qu'une autre activité minière

Mais elle l'est tout autant.

Par contre l'extraction du lithium nécessite beaucoup d'eau douce ce qui pose des problèmes de pollution de l'environnement dans les zones désertiques. Il faut notamment puiser l'eau nécessaire au traitement du lithium dans des poches aquifères proches des sites d'extraction.

Bien qu'il n'existe pas de statistiques sur cette consommation d'eau par unité de lithium produit, les quantités utilisées sont énormes : de l'ordre de 2 millions de tonnes d'eau qui s'évapore pour une tonne de lithium.

De son côté, Orocobre exploite le salar de Olaroz, dans le Nord de l'Argentine.

Sa consommation d'eau est d'environ 41 m<sup>3</sup> d'eau par tonne de lithium produite (eau de traitement uniquement) ce qui engendre une pollution.

Pour l'exploitation du Salar de Atamaca au Chili (16 000 tonnes en 2019), l'extraction du lithium nécessite près de 65% de l'eau de cette région désertique afin de pomper les saumures des puits forés.

Le site est exploité par Albemarle et la SQM du Chili.

Ces exploitants pompent le réservoir souterrain naturel d'eau salée contenant les sels de lithium dissous.

Ils remontent ensuite cette eau au soleil pour récupérer le carbonate de lithium par évaporation.

Au final, c'est surtout l'utilisation de l'eau douce locale pour nettoyer les machines et les tuyaux qui met en péril l'environnement et l'écosystème.

Il faut aussi de grosses quantités d'eau douce pour la production de potasse.

Cette potasse sert à fabriquer de l'engrais..

**III.1.1 Dégâts pour l'environnement :**

Ce procédé pénalise également les agriculteurs locaux de quinoa et les éleveurs de lamas.

Ces derniers doivent s'expatrier de leurs terres pour poursuivre leurs activités ailleurs.

En effet les pompages assèchent les couches de roche poreuse sous le sol qui servent de réserves d'eau.

Les oiseaux disparaissent du site d'Atamaca alors que les animaux d'élevages ne peuvent plus boire.

De plus on assèche aussi les cultures de maïs.

**III.1.2 Lithium et pollution :**

Au delà de ce problème de l'utilisation, comme toute activité humaine, l'extraction du lithium pollue:

la saumure: on la pompe et on la traite avec des additifs chimiques pour enlever le bore présent dans le sel et le lithium

l'eau douce: on la pollue à cause des fuites chimiques provenant de la mine

la soude est ensuite ajoutée pour produire du carbonate de lithium ( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ) afin d'avoir un sel filtré, lavé et séché pour une pureté supérieure ou égale à 99%

le terrassement des bassins de décantation utilise des films en plastique (PVC).

le pompage des solutions salines utilise des pompes fonctionnant avec des moteurs diesel (également bruyants)

En 2021, la production mondiale de lithium fut d'environ 100 millions de tonnes (hors USA).

Au cours de l'année 2020 son prix a été multiplié par cinq en un an.

Ainsi en janvier 2021, le prix de la tonne de carbonate de lithium de 6 430 € grimpait au alentours de 43 000 €.

**III.1.3 Enjeux Industriels :**

Aujourd'hui, l'application majeure du lithium est désormais le stockage d'énergie.

Principalement sous la forme de batteries lithium-ion indispensables pour nos smartphones.

Après sa période médicament, le lithium connaît un débouché dont la croissance est la plus rapide.

Ainsi en 2025, 50 % de la demande de lithium servira à assurer la fabrication des batteries lithium-ion.

Et aussi pour approvisionner le marché des véhicules électriques.

Ces nouvelles orientations vont multiplier par 4 la demande en lithium du secteur des batteries

qui passera de 50 000 à 200 000 tonnes de lithium carbonate équivalent (LCE) par an.

De même on s'attend à un triplement de la demande mondiale d'ici 2030.

A ce sujet, il faut avoir à l'esprit qu'il existe un décalage sur le marché entre les stocks de lithium globaux de « qualité technique » et la demande spécifique de lithium de « qualité batterie ».

Sécuriser ses ressources en lithium devient stratégique pour tous les pays et la France dans la course à la transition énergétique

Mais d'autres métaux vont s'avérer aussi indispensables comme le cobalt et le nickel.

### **III.2 Impacts de l'extraction et du raffinage du lithium sur l'environnement :**

#### **III.2.1 Les méthodes traditionnelles :**

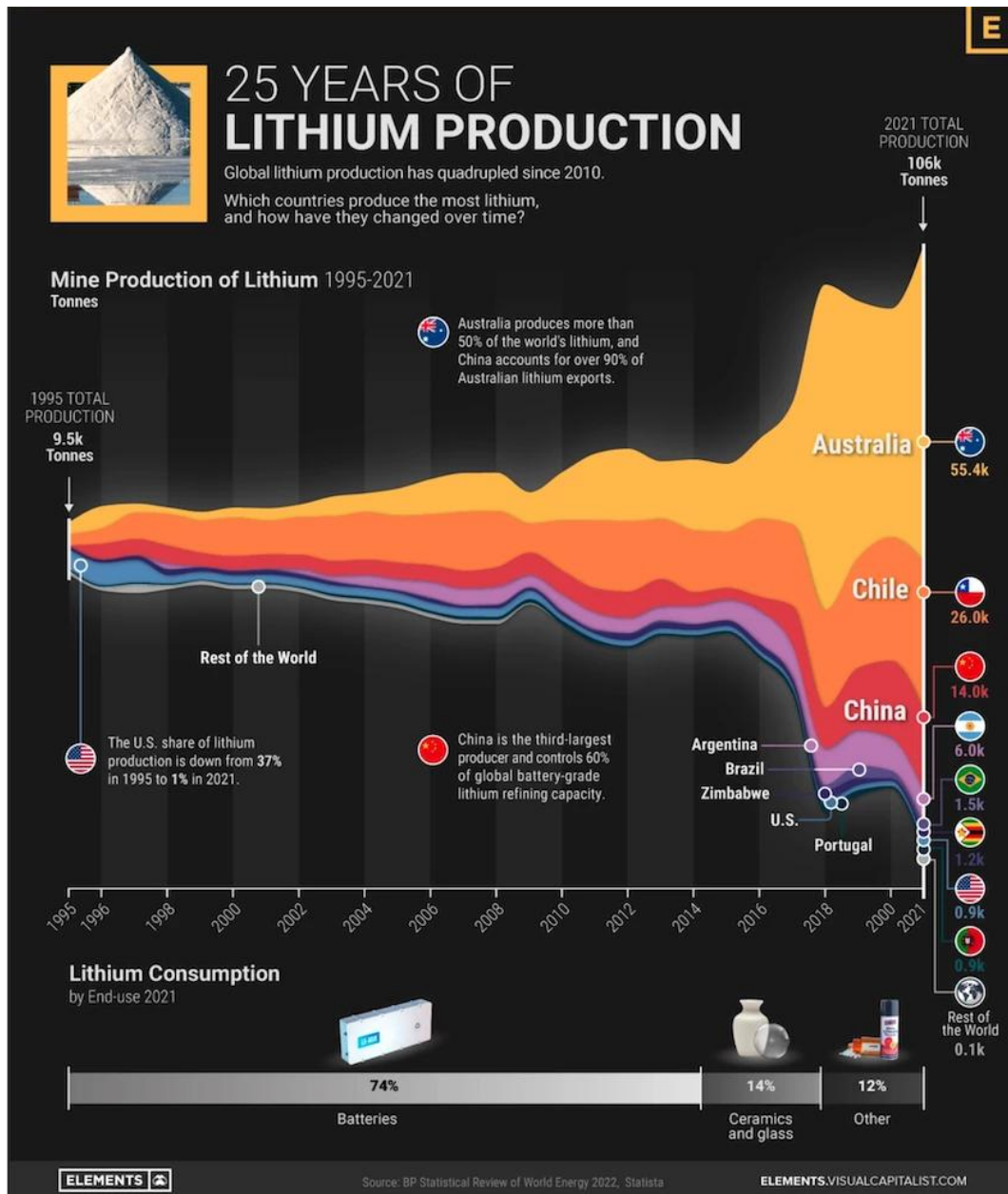
Nous avons vu dans notre dernier article qu'il y a des inquiétudes justifiées à court terme en ce qui concerne l'approvisionnement en lithium, en raison de la croissance exponentielle des véhicules électriques (VÉ). À moyen terme, en 2040, l'Agence Internationale de l'Énergie (IEA) prévoit que la demande en lithium va augmenter d'un facteur 40 par rapport à 2020 suivant le scénario de développement durable (voir le rapport de l'IEA intitulé *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*, 2021).

Depuis la sortie de ce rapport, CATL, le géant chinois des batteries, a annoncé la commercialisation des batteries sodium-ion (Na-ion), heureusement. Toutefois, la production de ces batteries Na-ion à grande échelle doit d'abord faire ses preuves, en incluant les chaînes d'approvisionnement. Sans compter qu'elles ne pourront remplacer les batteries Li-ion dans l'ensemble des applications, dû à leur faible densité d'énergie. En fait, le facteur 40 d'augmentation de la demande de lithium, avancé par l'IEA pour 2040, fait réaliser l'ampleur de la demande en minéraux devant nous, pas seulement pour le lithium, dans un laps de temps dont il ne reste que 17 ans!

Il y a donc urgence pour mettre en opération de nouvelles mines de lithium. Mais, ce ne sera pas facile rapidement, car il faut également tenir compte de l'impact sur l'environnement et obtenir les permis des gouvernements sur cette question épineuse, ce qui prend en général plusieurs années. Or, à cet égard, il faut savoir que les méthodes traditionnelles d'extraction du lithium, que nous examinerons dans cet article, suscitent de plus en plus de préoccupations environnementales déjà aujourd'hui.

Prenons le temps de regarder tout cela de plus près avant de foncer tête baissée. Il faut bien dire, toutefois, que de nouvelles technologies d'extraction du lithium, en développement présentement, sont prometteuses pour diminuer l'emprunte écologique de cette étape d'exploitation minière et de raffinage. Ces nouvelles technologies feront l'objet de notre prochain article.

L'extraction du lithium se fait essentiellement à partir de trois ressources différentes : les roches dures (minerais), les nappes d'eau salée souterraines (saumures) et les roches sédimentaires (argiles). Seules l'extraction du lithium des saumures et des minerais s'effectuent à grande échelle. L'extraction des argiles n'en est présentement qu'à des projets pilotes. Nous nous restreindrons donc aux saumures et aux minerais dans le présent article. L'extraction des minerais est concentrée en Australie (52,3% du lithium mondial), alors que l'extraction des saumures se retrouve essentiellement au Chili et en Chine (24,5% et 13,2% du lithium mondial respectivement). Ces données viennent du site Visual Capitalist qui a publié un graphique très explicite sur la production mondiale de lithium durant les 25 dernières années, en décembre 2022 (voir ci-dessous).



**Figure III.1:** Graphique illustrant l'évolution de la production (extraction du sol) mondiale de lithium depuis 1995, pour les principaux pays producteurs (source : Visual Capitalist).

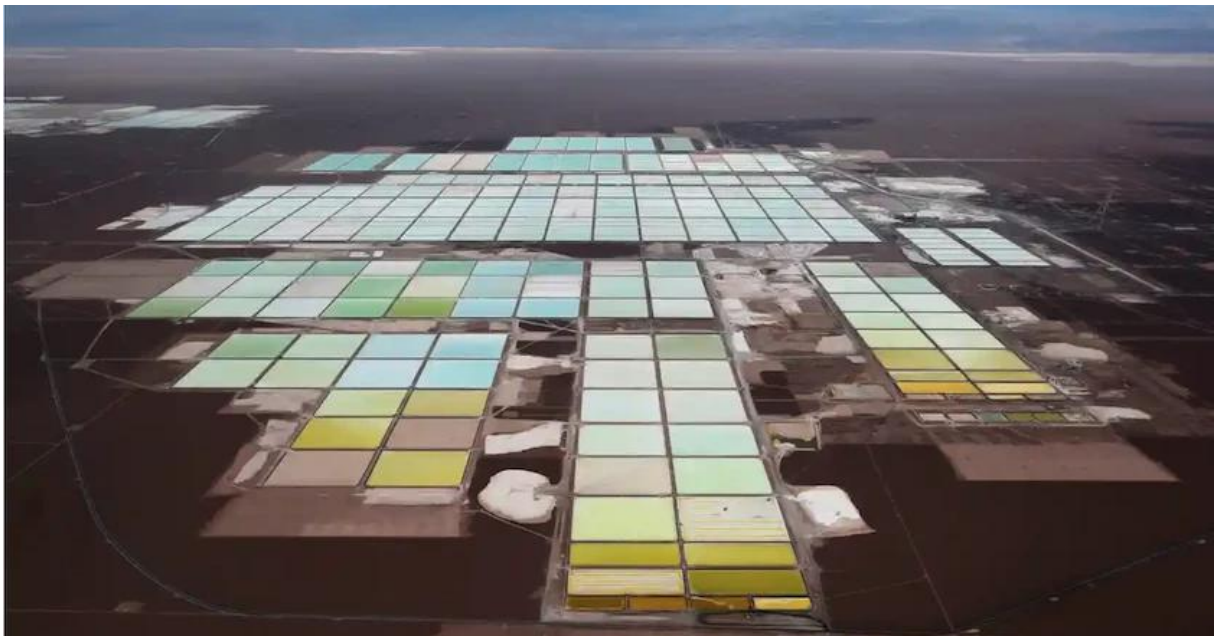
Chaque filière a ses avantages et des inconvénients concernant l'environnement. Voici ce qu'il en est.

### **III.3 L'extraction et le raffinage du lithium à partir des saumures :**

#### **III.3.1 Description de la technologie :**

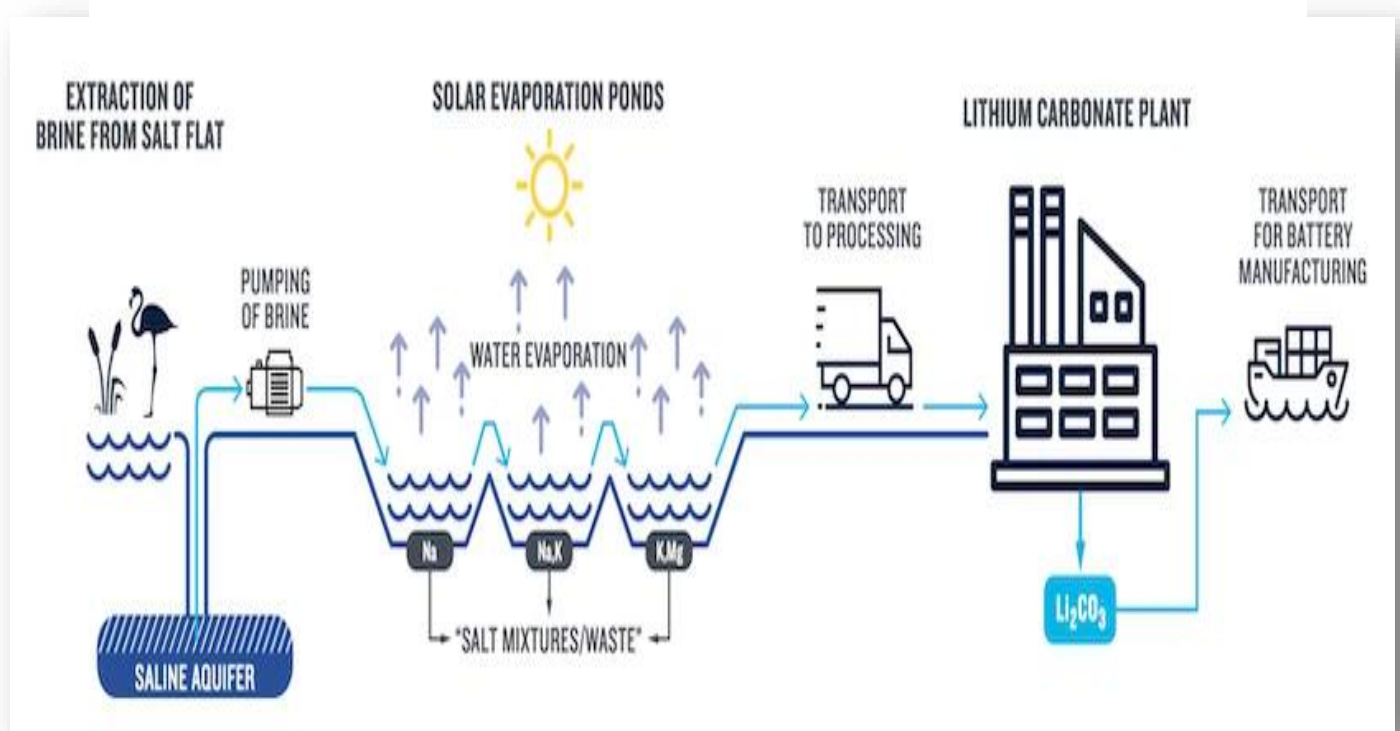
L'extraction du lithium des saumures se fait principalement en Amérique du sud, dans ce qu'on appelle le triangle du lithium, une région aride dans les Andes, où se rencontrent les frontières du Chili, de la Bolivie et de l'Argentine. Les saumures se retrouvent dans des aquifères sous d'anciens lacs salés asséchés appelés salars. Le sol y est plat.

La première étape de l'extraction consiste à forer un puit pour rejoindre un aquifère et pomper l'eau très salée dans des grands bassins artificiels peu profonds pour faire évaporer l'eau par le Soleil.



**Figure III.2 :**Extraction du lithium par évaporation de saumures dans des bassins artificiels  
(source : Reuters)

Les différents sels présents dans l'eau ont des solubilités différentes. Lorsque l'eau s'évapore, la concentration des sels augmente jusqu'à ce que le moins soluble, le chlorure de sodium (NaCl), précipite au fond du bassin. Après cette première précipitation, on transfère l'eau salée du dessus dans un deuxième bassin où va se précipiter, après plus d'évaporation, le chlorure de potassium (KCl). On transfère à nouveau l'eau salée restante dans un troisième bassin pour faire précipiter, cette fois, de l'hydroxyde de magnésium en ajoutant de la chaux à l'eau de ce bassin, le chlorure de magnésium ne pouvant précipiter par évaporation. On se retrouve alors avec une saumure riche en chlorure de lithium (environ 6% par poids) qui est acheminée vers une usine de séparation-purification par camions citernes ou pipeline. Le temps requis à partir du remplissage du premier bassin d'évaporation jusqu'à l'acheminement de la saumure de lithium à l'usine est typiquement de 18 à 24 mois au Chili.



**Figure III.3** : Schéma des principales étapes de l'extraction et du raffinage du lithium à partir des aquifères salins, riches en lithium (source : Natural Resources Defence Council, NRDC).



À l'usine, plusieurs procédés sont utilisés pour séparer et concentrer le lithium du reste de la saumure. On parle essentiellement de filtrations, de traitements chimiques utilisant des solvants et des réactifs, suivi de précipitations et de séchage, pour aboutir au carbonate de lithium ou à l'hydroxyde de lithium de grande pureté.

Pour de l'information complémentaire, vous pouvez consulter le blogue *Prime MoversLab*, où Carly Anderson a publié, le 4 janvier 2022, l'article « Lithium : From Rocks into Roadsters » qui traite de l'extraction et du raffinage du lithium. On peut également trouver d'autres informations intéressantes concernant l'extraction et le raffinage du lithium sur le site de la compagnie CondorchemEnvitech.

### **III.3.2 Préoccupations environnementales :**

#### **III.3.2.1 Gaz à effet de serre et pollution atmosphérique :**

Puisqu'une bonne partie de l'énergie requise pour la séparation du lithium est fournie par le Soleil (évaporation), ce procédé d'extraction est bien moins énergivore que celui de l'extraction à partir des minerais de lithium dans la roche dure. Il n'y a pas de transport par gros camions de la mine à l'usine de concentration, ni concassage et meulage de la roche, ni chauffage à 1050 °C. Il y a donc bien moins de carburants fossiles consommés d'où moins de gaz à effet de serre (GES). Selon le site de la compagnie Vulcan Energy, on aurait 5 tonnes de CO<sub>2</sub> émis pour chaque tonne d'hydroxyde de lithium produit avec l'extraction-raffinage par évaporation des saumures. C'est trois fois moins que l'extraction-raffinage à partir des minerais de lithium comme le spodumène, dans les mines à ciel ouvert.

#### **III.3.2.2 La consommation d'eau :**

Si l'extraction du lithium par évaporation des saumures gagne des points au niveau des GES, là où le bât blesse avec cette méthode c'est au niveau de la consommation d'eau dans un milieu quasi désertique comme les **salars** des Andes au Chili, d'où provenait le quart du lithium de la planète en 2021 (voir le graphique plus haut). Plusieurs études et articles ont été publiés pour dénoncer l'impact négatif de l'extraction du lithium dans les Andes sur la contamination et l'épuisement des ressources en eau douce pour la population locale, affectant sérieusement les conditions de vie des habitants de la région. Ceux-ci ne peuvent plus élever d'animaux ni cultiver comme le faisaient leurs parents et souvent dépendent de camions citernes pour les approvisionner en eau potable. C'est ce que nous rapporte, entre autres, l'étude du Natural Resources Defense Council (NRCC) intitulée *Exhausted : How we Can Stop Lithium Mining*



from Depleting Water Resources, Drain-ing Wetlands, and Harming Communities in South America, avril 2022.

Ce qu'il faut comprendre, c'est que 95% de l'eau sortie des aquifères salins est ensuite évaporée. Et c'est sans compter l'eau douce nécessaire pour les opérations de l'exploitation. Or, l'eau douce de surface n'est pas uniquement alimentée par la pluie et le ruissellement des montagnes avoisinantes, les précipitations ne sont que de quelques millimètres par année sur le salar d'Atacama, le plus exploité pour le lithium des saumures souterraines. Des chercheurs en géologie de l'Université du Massachusetts ont découvert, après dix années de recherche, qu'une bonne partie de l'eau douce de surface de cette région provient d'aquifères souterrains. Les chercheurs précisent que l'hydrologie est complexe et qu'on ne peut prendre comme acquis que les aquifères d'eau salée et ceux d'eau douce ne s'influencent pas, surtout en présence de perturbations importantes comme les forages et le prélèvement de grandes quantités de saumures. Imaginons maintenant qu'on multiplie par 10 l'exploitation des saumures... Et, n'oublions pas qu'on est dans un climat très aride où nécessairement le problème d'eau douce de bonne qualité est d'autant plus fragile.

**III.3.2.3 Les résidus.** Comme nous l'avons vu dans la description de la méthode d'extraction, de grandes quantités de sels de sodium, de potassium et de magnésium se retrouvent au fond des bassins d'évaporation, sans compter la chaux qu'on ajoute et possiblement d'autres réactifs. Ces résidus présentent un risque indéniable de contamination du sol et de la nappe phréatique d'eau douce, la rendant éventuellement impropre aux cultures et à la consommation.

**III.3.2.4 Taux de récupération du lithium.** Les réserves de lithium sur la planète correspondent au lithium qui peut être extrait à un prix acceptable. Le dernier relevé du US Geological Survey concernant les réserves mondiales de lithium les établie à 22 millions de tonnes métriques en 2021. La ressource, elle, est estimée à 89 million de tonnes à l'échelle mondiale. Mais, la quantité de lithium disponible dépend du taux de récupération du lithium avec un précédé donné. Selon la compagnie International BatteryMetals, le taux de récupération des méthodes traditionnelles de bassins d'évaporation des saumures, incluant le raffinage, se situe entre 20% et 40%. C'est donc dire que 60% à 80% du lithium est perdu! C'est une sérieuse préoccupation environnementale d'inefficacité! L'efficacité énergétique fait partie du développement durable.

**III.3.2 Comment diminuer l'empreinte écologique ?**

Tous les points de préoccupation que nous avons mentionné pour l'extraction du lithium à partir de saumures, concernant l'environnement, peuvent être grandement améliorés avec ce qu'on appelle l'extraction directe du lithium (technologies DLE dans la littérature anglophone).

Mais, disons qu'il s'agit de pomper la saumure et en extraire le lithium directement dans une usine, en quelques heures, avant de retourner la saumure restante dans l'aquifère salin. Les taux de récupération du lithium dépassent 80%, il n'y a peu près pas de résidus, la consommation d'eau est très faible, de même que les émissions de gaz à effet de serre. Plusieurs projets pilotes sont en opération présentement un peu partout, en particulier avec les saumures prélevées des centrales géothermiques. Ce n'est pas encore réellement commercial mais très prometteur.

**III.4 L'extraction et le raffinage du lithium à partir des minerais :****III.4.1 Description de la technologie :**

La courte vidéo YouTube *The lithium mine (FR)*, version française, publiée sur la chaîne du chimiste Marc Montangero, offre un exposé visuel concis du processus d'extraction du minerais de spodumene (le principal minerais contenant du lithium), à la mine de Greenbushes en Australie.

La mine est à ciel ouvert. On utilise des explosifs pour désagréger la roche qu'on transporte avec de gros camions, en remontant quelques centaines de mètres afin de sortir de l'énorme fosse qui constitue la mine (voir la photo ci-dessous), pour les apporter à l'usine de concentration du minerais. Les blocs de roche sont d'abord réduits en cailloux par des broyeurs mécaniques puissants et ensuite transformés en poudre fine dans des moulins à billes. Les particules de spodumene sont alors concentrées en éliminant les particules de la roche mère et les impuretés à l'aide de mécanismes de séparation physique comme la flottation (différence de densité), de séparation magnétique (grâce à des aimants) ou encore de séparation électrostatique.



**Figure III.4 :** Mine à ciel ouvert de Greenbushes en Australie (Source : Talison Lithium).

Le produit qui sort de la mine Greenbushes est une poudre fine de concentré de spodumène (contenant 63% à 94% de ce minerais) qui est acheminé vers les usines d'extraction et de raffinage du lithium, principalement en Chine. Ces raffineries produisent, à un haut degré de pureté, le carbonate de lithium et l'hydroxyde de lithium utilisés dans les batteries Li-ion.

Pour extraire le lithium de son minerais de spodumene, il faut d'abord le chauffer à plus de 1 050 °C, dans le but d'opérer un changement de sa structure cristalline. Le spodumene ainsi modifié va alors devenir attaquant par de l'acide sulfurique concentré, à environ 200 °C, pour produire du sulfate de lithium, soluble dans l'eau.

Ensuite, les techniques d'hydrométallurgie sont utilisées pour récupérer et purifier le sulfate de lithium et le transformer en carbonate de lithium désiré, grâce, notamment, à la filtration, à l'ajout de produits chimiques, à la précipitation et aux échanges ioniques. Un petit document de la compagnie SGS donne plus de détails.

**III.4.2 Préoccupations environnementales :**

**III.4.2.1 Les gaz à effet de serre et la pollution atmosphérique :** L'extraction du lithium à partir des minerais de ce métal consomme beaucoup d'énergie. Pensons d'abord au transport des roches hors de la fosse à l'usine de concentration et la transformation de ces roches en fine poudre par des machines mécaniques puissantes. Ensuite, il faut chauffer cette poudre à plus de 1050 °C.

L'énergie considérable consommée par ces étapes provient des carburants fossiles (transport et chauffage du minerai) et du réseau électrique (broyeurs, moulins mécaniques et machinerie de l'usine). Or, ce n'est pas partout dans le monde que l'électricité est aussi propre qu'au Québec (99 % d'énergie renouvelable). L'extraction du lithium à partir des roches dures émet donc beaucoup de gaz à effet de serre et d'émissions polluantes issues de la combustion des carburants fossiles. Sur le site de la compagnie Vulcan Energy, qui pilote un projet d'extraction de lithium dans des sources géothermales en Allemagne, on mentionne pour l'extraction du lithium à partir des roches dures des émissions de 15 tonnes de CO<sub>2</sub> par tonne d'hydroxyde de lithium produite.

**III.4.2.1 La poussière :**

Par ailleurs, il ne faudrait pas sous-estimer la quantité de poussières dues aux explosions pour désagréger la roche mère et aux machines mécaniques qui broient les roches. Ces poussières dans l'air peuvent être respirées par les animaux et les humains à proximité et se retrouvent au sol ultérieurement, avec possibilité de contamination par des matières qui étaient emprisonnées sous terre depuis des millions d'années.

**III.4.2.2 Les résidus et les produits chimiques et la contamination des sols et de l'eau :**

Dans tout le matériel qu'on arrache à la terre dans une mine de roches dures, les minerais de lithium ne représentent qu'un faible pourcentage, quelques pourcents tout au plus. Il y a donc d'immenses tas de résidus à gérer, qui vont être lessivés par la pluie très longtemps. Sans compter que ces résidus ont été en contact avec des produits chimiques dont des traces peuvent contaminer les terres et cours d'eau à la longue. Ajoutons à cela le fait que dans ces résidus, qui étaient emprisonnés sous terre depuis des millions d'années, il y a potentiellement des éléments chimiques toxiques qui subitement se retrouvent à l'air libre, posant une autre préoccupation pour l'environnement.

**III.4.2.3 La consommation d'eau :**

Certains procédés d'hydrométallurgie que nous avons mentionné, comme la flottation, impliquent une consommation d'eau importante que Vulcan Energy estime à 170 m<sup>3</sup> par tonne d'hydroxyde de lithium produite. Une bonne partie de cette eau se retrouve en contact avec les différents résidus ou produits chimiques ajoutés. Même si cette eau est traitée, encore une fois il reste très difficile d'éviter des traces de contamination qui peuvent se retrouver dans les nappes phréatiques.

**III.4.2.4 Taux de récupération du lithium :**

Les réserves mondiales de lithium pouvant être extrait à un prix acceptable par le marché sont de 22 millions de tonnes métriques, comme nous l'avons vu, selon le dernier relevé du US Geological Survey pour 2021. Mais, la quantité de lithium disponible dépend du taux de récupération du lithium avec un précédent donné. Selon la compagnie Critical Elements, qui a un projet d'extraction de lithium à la Baie James au Québec, leur nouveau procédé de purification et transformation du minerai de spodumène en hydroxyde de lithium qualité batterie atteint un taux de récupération du lithium de 80% en laboratoire alors que la moyenne de l'industrie se situerait à 65%. Voir à ce sujet l'article dans BatteryMetals / Investing News du 29 octobre 2018. Mais, il faut multiplier par le taux de récupération du minerai de spodumène à la mine à partir de la roche mère. On se retrouverait donc à un taux de récupération total du lithium, incluant l'extraction minière et le raffinage, autour de 50%. C'est donc dire que 50% du lithium serait perdu, possiblement plus! L'inefficacité de la récupération du lithium issu des minerais, selon la méthode traditionnelle, constitue donc une préoccupation environnementale qu'on ne peut négliger. Rappelons-le, l'efficacité énergétique fait partie du développement durable et le lithium est une ressource critique et finie.

**III.4.3 Comment diminuer l'impact environnementale ?**

La première chose à faire est d'éliminer le plus possible les carburants fossiles, en électrifiant les gros camions, les pelles mécaniques, les tracteurs à chenille et les machines de chargement, en plus d'utiliser de l'énergie renouvelable pour l'usine de concentration du minerai et l'usine de séparation-raffinage. Le chauffage à 1050 °C du minerai de spodumène reste à examiner de plus près pour voir s'il est possible d'utiliser un four électrique ou un four à hydrogène vert (issu de l'électrolyse de l'eau avec de l'énergie renouvelable), ou encore partiellement à l'hydrogène vert.

Il ne semble pas y avoir grand-chose à faire pour les montagnes de résidus et la poussière résultant de la réduction par étapes de la roche mère en fine poudre.

Pour ce qui est de diminuer la consommation d'eau, il faudrait la traiter et la réutiliser. Améliorer le taux de récupération du minerais sera difficile, car travailler avec une poudre non soluble pour séparer physiquement le spodumene (flottation et autres) est plus difficile qu'avec des sels solubles dans l'eau.

#### **III.4.3.1 Conclusion :**

Nous venons de voir que l'extraction du lithium avec les méthodes traditionnelles comme l'évaporation de saumures riches en lithium ou le dynamitage et concassage des minerais de lithium engendrent des conséquences environnementales importantes.

#### **III.4.3.2 L'extraction traditionnelle des saumures :**

par évaporation met en péril l'eau potable et les modes de vie des habitants locaux, en contribuant à rendre très difficile l'élevage et l'agriculture dans ces régions. Surtout que les sites riches en lithium dans les Andes subissent un climat très aride où l'eau douce est une denrée rare (quelques millimètres de pluie par année). À part les sels de lithium, les saumures contiennent plusieurs autres sels (de sodium, magnésium et potassium) qui demeurent des résidus, risquant fort de contaminer le sol et les aquifères d'eau douce. Enfin, le taux de récupération du lithium est seulement de 30% environ, ce qu'on peut difficilement qualifier de développement durable, compte tenu de l'inefficacité. N'oublions pas que les réserves sont finies.

#### **III.4.3.3 L'extraction à partir des minerais :**

Quant à elle, est très énergivore et génère beaucoup de gaz à effet de serre provenant de la combustion des carburants fossiles. Comme les minerais de lithium ne représentent que quelques pourcents de la roche mère excavée, il y a beaucoup de résidus. Or, ceux-ci ont été en contact avec les produits chimiques utilisés dans les procédés de séparation et raffinage, et peuvent contenir des éléments toxiques qui étaient emprisonnés sous terre depuis des millions d'années. Les énormes quantités de résidus seront lessivés par la pluie pendant longtemps, avec une possibilité de contaminer les sols.

Il n'y a pas beaucoup de possibilité de réduire l'empreinte écologique de l'extraction traditionnelle des saumures par évaporation. Mais il y a de nouvelles méthodes bien mieux pour l'environnement qui se mettent en place. On parle d'extraction directe du lithium des saumures en quelques heures (au lieu de 2 ans) et de renvoi du restant des saumures là d'où elles



proviennent (aquifères salins). Nous examinerons quelques projets pilotes dans notre prochain article.

Pour ce qui est de l'extraction des minerais de lithium à partir de la roche dure, on peut réduire considérablement les gaz à effet de serre en électrifiant les véhicules miniers et en utilisant de l'énergie renouvelable aux usines. Reste à voir si le chauffage des minerais à 1050 °C est possible avec l'électricité ou de l'hydrogène vert au lieu des carburants fossiles.

Il y a donc des solutions, mais elles ne seront pas opérationnelles à grande échelle avant plusieurs années. Dans une entrevue donnée par Eric Zaunserb, le président du Conseil d'administration de la compagnie Critical Elements (qui gère un projet de mine de lithium à la Baie James), ce dernier mentionne qu'il a fallu 5 ans avant d'obtenir les permis du gouvernement du Canada et du gouvernement de la province de Québec.

À la lueur de tout ce que nous avons vu dans cet article, on constate qu'il va être pratiquement impossible, pour des raisons environnementales, d'accélérer la production du lithium au même rythme que l'augmentation exponentielle anticipée des véhicules électriques. Il va falloir mettre beaucoup d'emphase sur les batteries sodium-ion, en espérant que cette filière fonctionne bien et que cela soit suffisant.

Le problème n'est pas un manque de lithium, c'est la rapidité à laquelle il faut augmenter sa production en respectant l'environnement.

**CONCLUSION**

**GENERALE**



### - Conclusion générale :

Le lithium, un élément très recherché, se forme principalement dans les roches ignées et les saumures souterraines. Les processus de chaleur intense et de pression contribuent à sa formation. On peut le trouver dans différentes régions du monde, avec des réserves notables situées dans le triangle du lithium en Amérique du Sud (Argentine, Chili et Bolivie), en Australie, au Canada, aux États-Unis et dans d'autres pays.

La signification du lithium réside dans son rôle crucial dans le développement des batteries rechargeables, en particulier pour les véhicules électriques, les appareils électroniques portables et le stockage de l'énergie renouvelable. Alors que le monde se tourne vers des sources d'énergie plus propres et plus durables, le lithium facilite l'avancement des technologies qui dépendent du stockage d'énergie efficace et favorise la transition vers un avenir plus respectueux de l'environnement.

Cependant, il est important de reconnaître que l'extraction du lithium peut avoir des implications environnementales. Les défis associés à son exploitation comprennent la consommation d'eau, les émissions de gaz à effet de serre, la dégradation des sols et la gestion appropriée des déchets miniers. Pour répondre à ces préoccupations, des pratiques minières durables doivent être mises en place, telles que la réduction de la consommation d'eau, l'adoption de technologies d'extraction plus propres et la promotion du recyclage du lithium afin de minimiser les impacts environnementaux.

De plus, il convient de noter que l'expansion de la production de lithium doit s'accompagner d'une gestion responsable des ressources et de la protection des écosystèmes. Des efforts de conservation, de remise en état des terres et de réglementations strictes sont nécessaires pour atténuer les conséquences écologiques potentielles de l'extraction du lithium. De plus, la recherche et le développement de technologies de batteries alternatives avec une dépendance réduite au lithium peuvent également contribuer à un avenir plus durable.

En conclusion, la formation du lithium dans les roches ignées et les saumures souterraines, ainsi que sa présence dans différentes régions du monde, en font une ressource précieuse pour les avancées technologiques. Son utilisation dans les batteries rechargeables, le stockage de l'énergie renouvelable et l'électrification des systèmes de transport démontre son importance

## **Conclusion Générale**

---

pour atteindre un avenir plus propre et plus durable. Cependant, une gestion soigneuse et responsable des ressources en lithium est essentielle pour minimiser les impacts environnementaux liés à son extraction et assurer le bien-être écologique à long terme de notre planète.

## Bibliographie

1. Albiniaak, T., & Winiarski, A. (2020). Lithium Resources and Production: Critical Assessment and Global Projections. *Minerals*, 10(6), 514. doi:10.3390/min10060514
2. Bhagat, R. (Ed.). (2019). *Lithium-Ion Batteries: Fundamentals and Applications*. Elsevier.
3. Bradshaw, A. M. (2020). Lithium, Lithium Minerals and Lithium Chemicals. In *Critical Minerals and the Energy Transition* (pp. 57-70). Springer.
4. International Energy Agency. (2020). *World Energy Outlook 2020*. Paris: IEA.
5. Laulainen, N. S. (2020). The Socio-Environmental Impacts of Lithium-Ion Batteries: Analyzing a Growing Industry. *Inquiries Journal*, 12(01). Retrieved from <https://www.inquiriesjournal.com/articles/1816/the-socio-environmental-impacts-of-lithium-ion-batteries-analyzing-a-growing-industry>
6. Mancini, F., & Reddy, B. V. (2021). Environmental Challenges and Sustainable Solutions for Lithium-Ion Batteries. *Sustainability*, 13(5), 2845. doi:10.3390/su13052845
7. Peck, D., & Sinding-Larsen, R. (2019). Lithium Mining and Environmental Impact Assessment. European Lithium Limited. Retrieved from <https://europeanlithium.com.au/wp-content/uploads/2019/03/Lithium-Mining-and-Environmental-Impact-Assessment-ELi-25-Mar-2019.pdf>
8. Robles-Castro, V., Barros, M. C., & González-García, S. (2021). Lithium Recovery Processes from Mineral Sources: A Comprehensive Review. *Minerals*, 11(2), 162. doi:10.3390/min11020162
9. UNEP. (2020). *The Lithium-Ion Battery Value Chain: Impacts of Electric Vehicles and Renewable Energy Storage*. Nairobi: UNEP.
10. United States Geological Survey. (2022). Lithium Statistics and Information. Retrieved from <https://www.usgs.gov/centers/nmic/lithium-statistics-and-information>