

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT
ET DE LA LUTTE CONTRE
LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

ÉVALUATION PRÉLIMINAIRE DU DANGER LIÉ À LA PRÉSENCE DE LITHIUM EN MILIEU TERRESTRE

REVUE DE LA LITTÉRATURE

Coordination et rédaction

Cette publication a été réalisée par le Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) dans le cadre du **Plan québécois pour la valorisation des minéraux critiques et stratégiques** (PQVMCS). Elle a été produite par la Direction des communications du MELCC.

Recherche et rédaction Kristin K. Mueller, Ph. D., écotoxicologue
Nathalie Paquet, M. Sc., écotoxicologue

Révision scientifique Claude Fortin, Institut national de la recherche scientifique – Centre Eau, Terre et Environnement

Gaëlle Triffault-Bouchet, Ph. D., chef de division, écotoxicologue

Le comité des professionnels du MELCC impliqués dans la mise en œuvre de l'action 1.2.2 (Élaborer des outils de gestion environnementale et sociale pour les projets de MCS) du Plan québécois pour la valorisation des minéraux critiques et stratégiques 2020-2025

Renseignements

Téléphone : 418 521-3830
1 800 561-1616 (sans frais)

Formulaire : www.environnement.gouv.qc.ca/formulaires/renseignements.asp
Internet : www.environnement.gouv.qc.ca

Pour obtenir un exemplaire du document :

Visitez notre site Web : www.environnement.gouv.qc.ca

Dépôt légal – 2022
Bibliothèque et Archives nationales du Québec
ISBN 978-2-550-91832-5 (PDF)

Tous droits réservés pour tous les pays.
© Gouvernement du Québec - 2022

Sommaire

Les énergies renouvelables, l'électrification des transports et les technologies de pointe sont des secteurs en croissance pour lesquels un approvisionnement en minéraux critiques et stratégiques (MCS) est indispensable. Le Québec disposant de ressources minérales très diversifiées, particulièrement en territoire nordique, le gouvernement du Québec a récemment mis en œuvre le Plan québécois pour la valorisation des minéraux critiques et stratégiques 2020-2025 (PQVMCS). Celui-ci présente des stratégies pour favoriser l'exploration minière, la mise en valeur et l'exploitation de ces minéraux, sans oublier leur recyclage et leur utilisation optimale. Le Québec entend également s'impliquer dans l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement des batteries lithium-ion, un des objectifs mis de l'avant dans le Plan pour une économie verte 2030.

À travers le monde et dans le PQVMCS plus particulièrement, le lithium est considéré comme un minéral stratégique. En effet, le lithium, avec sa haute réactivité, sa masse volumique très faible, sa chaleur spécifique élevée et sa conductivité thermique élevée, présente des caractéristiques recherchées pour la fabrication de batteries, de verres, de céramiques et de graisses lubrifiantes. Il entre ainsi dans la fabrication des batteries lithium-ion utilisées dans les véhicules à propulsion électrique, les téléphones cellulaires et les ordinateurs portables. Le Québec présente un grand potentiel géologique pour l'exploitation des minéraux de lithium, provenant de nombreux gîtes de pegmatite granitique à spodumène situés en Abitibi, au nord de Chibougamau et dans le secteur Eastmain-Nemiscau à la Baie-James.

Il apparaît donc indispensable d'acquérir des connaissances sur le devenir du lithium dans l'environnement, son potentiel de bioaccumulation et son potentiel toxique pour la faune et la flore terrestres. À cet effet, cette revue de la littérature a pour objectifs : 1) d'évaluer la présence et le devenir du lithium dans l'environnement; 2) d'inventorier les données de bioaccumulation et de toxicité disponibles sur le lithium pour la faune et la flore terrestres; 3) de proposer des valeurs toxicologiques de référence, soit des concentrations seuils d'effets pour les organismes terrestres exposés au lithium présent dans le sol; et, sur la base de ces données, 4) d'établir s'il existe un potentiel de danger associé à la présence de lithium dans l'environnement et si des études doivent être entreprises pour compléter les données disponibles. Ces connaissances seront nécessaires au processus d'évaluation des risques des projets d'exploration ou d'exploitation minière, permettront d'encadrer adéquatement cette activité et favoriseront son développement dans le respect des principes du développement durable, tout en assurant la protection et la conservation des écosystèmes terrestres et le maintien des services écologiques qu'ils rendent.

Le lithium se trouve naturellement au sein des environnements aquatiques et terrestres dans plus de 150 minéraux, dans les argiles, dans de nombreuses saumures continentales, dans les eaux géothermiques et dans l'eau de mer. En milieu terrestre, le lithium se présente principalement sous forme de carbonate de lithium (Li_2CO_3), de chlorure de lithium (LiCl) ou d'oxyde de lithium (Li_2O). Les concentrations de lithium peuvent varier de 65 mg/kg dans les roches ignées à 5 mg/kg dans les roches calcaires. Les concentrations mesurées dans les sols à proximité de gisements peuvent s'élever jusqu'à 1 600 mg/kg en Amérique du Sud et jusqu'à 40 000 mg/kg en Australie. À la suite des processus de séparation, de concentration et de purification, des produits de carbonates de lithium ou d'hydroxyde de lithium sont obtenus. Ceux-ci doivent présenter une pureté de plus de 99,5 % pour entrer dans la chaîne de production des batteries lithium-ion. Il convient de noter que, dans un futur proche, le recyclage de ces batteries pourrait jouer un rôle important dans l'approvisionnement du Li, ce qui devrait diminuer les impacts environnementaux provenant de la génération de déchets de batteries. Cette filière devra toutefois faire l'objet d'études pour que les impacts environnementaux associés à cette activité soient identifiés et encadrés.

Le lithium est considéré comme un élément très mobile dans l'environnement. Sa mobilité dans les sols est surtout contrôlée par sa chimie et les conditions prévalant dans le sol, telles que le pH et la composition du sol (ex. : proportion de matière organique par rapport à l'argile). Une fois solubilisés, les ions Li^+ peuvent être lessivés du sol par les pluies et rejoindre les eaux souterraines et le milieu aquatique. Une fois dans le milieu aquatique, le lithium se trouve principalement sous forme ionique. Les composés les plus communs, le LiCl et le sulfate de lithium (LiSO_4), sont les plus solubles et se dissocient en milieu aqueux.

Par conséquent, les concentrations de lithium sont généralement plus élevées dans les eaux de mer (environ 170 µg/l) que dans les eaux douces (entre 1 et 40 µg/l).

Malgré l'absence d'information sur le potentiel de bioaccumulation du lithium pour certains récepteurs, tels que les invertébrés terrestres et la faune aviaire, les études consultées démontrent que le lithium peut se concentrer dans les tissus des différents organismes terrestres exposés. L'accumulation est influencée par les paramètres physicochimiques du sol, comme la conductivité électrique, la présence d'autres cations et le pH. Puisque le lithium possède des propriétés physicochimiques semblables à celles des autres métaux alcalins, notamment le sodium et le potassium, il peut être absorbé par les mêmes processus d'absorption que ceux utilisés pour ces éléments. Chez les plantes, le lithium est habituellement absorbé par le système racinaire, avant d'être rapidement transporté dans l'ensemble des tissus. Les contenus en lithium sont en général plus élevés dans les tiges et les feuilles que dans les racines, alors que les accumulations dans les grains et les fruits sont peu significatives. Chez les mammifères, à la suite d'une ingestion par voie orale, le lithium peut être absorbé par le tractus gastro-intestinal et transporté à l'intérieur des cellules par diffusion passive à l'aide des canaux sodiques. L'excrétion du lithium se fait principalement par les reins, mais une quantité résiduelle est distribuée dans l'organisme, majoritairement dans les os, les glandes endocrines (thyroïde, hypophyse et surrénales), le cerveau et les muscles.

La toxicité du lithium a été étudiée chez différents organismes terrestres :

- Pour les microorganismes, les données disponibles indiquent une tolérance au lithium, en laboratoire ou *in situ*. Notons que le lithium retrouvé dans les saumures concentrées pourrait agir comme un agent stresser de la diversité microbienne, en sélectionnant les microorganismes tolérants au lithium. L'accumulation extracellulaire de lithium peut également être une stratégie adoptée par les microorganismes pour survivre dans ces conditions.
- Les études évaluant la toxicité du lithium chez les végétaux ont démontré qu'à faibles concentrations, le lithium peut stimuler la croissance et augmenter les rendements des plantes cultivées. Des effets néfastes sont observés principalement à concentrations élevées. Ces effets incluent l'apparition de nécroses, ainsi qu'une diminution du taux de germination, de la biomasse et de la croissance. De plus, le Li interfère avec l'absorption et la translocation d'autres éléments biologiquement importants, comme le magnésium, le sodium, le potassium et le calcium, ce qui peut occasionner des carences. La tolérance au lithium chez certaines espèces végétales serait d'ailleurs étroitement liée à leur tolérance au sodium. Par conséquent, les espèces connues pour être facilement affectées par de faibles quantités de sodium (ex. : arbres à feuilles caduques, agrumes, avocats, haricots rouges) sont plus sensibles aux effets du lithium, tandis que d'autres cultures tolérant le sodium seraient relativement tolérantes à ce métal.
- Peu d'études ont été réalisées sur les effets du Li sur les invertébrés terrestres. Les données disponibles montrent que l'exposition au Li peut entraîner une diminution de la croissance, de la maturation et de la reproduction des organismes exposés. La croissance et la maturation sont inhibées de manière significative à des concentrations de Li inférieures à celles engendrant une létalité.
- Quelques études ont déterminé le potentiel toxique du lithium chez différentes espèces d'oiseaux. Cependant, les formes et les voies d'exposition testées ne sont généralement pas représentatives de celles rencontrées naturellement dans l'environnement.
- Chez les mammifères, le principal organe cible du lithium est le système nerveux central. Par conséquent, les sels de lithium, en particulier le carbonate (Li_2CO_3) et l'acétate de lithium (LiCH_3COO), sont des molécules de choix depuis plus de 50 ans dans le traitement du trouble bipolaire. Les données disponibles pour ce métal ont donc été essentiellement acquises dans le cadre de la recherche médicale. Bien que des effets néfastes aient été rapportés en présence de certaines formes de lithium, ces composés n'engendrent une mortalité des mammifères qu'à de très fortes concentrations d'exposition. Des teneurs élevées peuvent également altérer les fonctions rénales et hépatiques, en plus d'affecter la reproduction, la prise de poids et la survie.

Selon les conditions environnementales, le lithium pourrait être disponible dans les sols et aurait alors tendance à s'accumuler dans les organismes. Toutefois, d'après les données disponibles, le potentiel

toxique du lithium apparaît relativement faible pour les récepteurs écologiques terrestres et n'est observé qu'à des concentrations élevées. La mise en place de mesures de mitigation au pourtour des mines et des industries produisant des batteries lithium-ion devrait limiter l'exposition des organismes terrestres à de fortes teneurs environnementales. Ces mesures permettraient d'assurer la protection et la conservation des écosystèmes et le maintien des services écologiques qu'ils rendent (ex. : cycle biogéochimique des nutriments, production primaire, approvisionnement en nourriture et en matériaux).

Des valeurs toxicologiques de référence (VTR) ont été développées pour les plantes et les mammifères exposés au lithium. La revue de littérature a mis en évidence un manque d'informations sur la toxicité du lithium pour les invertébrés terrestres et les oiseaux, surtout en ce qui concerne ses effets chroniques. Faute de VTR appropriées pour l'évaluation du risque écotoxicologique (ÉRE) relié au lithium dans les sols, des doses de référence pourront être calculées, pour chaque espèce d'oiseaux retenues dans les ÉRE pour des sols contaminés, à partir de celles disponibles pour les mammifères, selon la méthode suggérée par l'EPA (1993). En revanche, des données de toxicité complémentaires sont nécessaires pour établir des valeurs toxicologiques de référence pour le groupe de récepteurs écologiques des invertébrés terrestres. Une fois disponibles, ces valeurs de référence permettront d'estimer le risque relié à la présence de lithium pour la faune et la flore en milieu terrestre dans les projets de mise en valeur des minerais de lithium. Lorsque les données de toxicité du lithium pour les invertébrés terrestres seront disponibles, des critères écotoxicologiques de qualité des sols pourront être proposés.

Table des matières

Liste des tableaux	viii
Liste des figures	ix
Liste des annexes	ix
1. Introduction	1
2. Caractéristique du lithium dans l'environnement	3
2.1. Propriétés physicochimiques	3
2.2. Utilisation du lithium	3
2.3. Ressources en lithium	4
2.4. Extraction, transformation et recyclage	7
2.5. Présence dans l'environnement	8
3. Potentiel de bioaccumulation	16
3.1. Microorganismes	16
3.2. Plantes terrestres	18
3.3. Invertébrés terrestres	34
3.4. Amphibiens et reptiles	34
3.5. Oiseaux	34
3.6. Mammifères	34
4. Potentiel toxique	36
4.1. Microorganismes	36
4.2. Plantes terrestres	36
4.3. Invertébrés terrestres	41
4.4. Amphibiens et reptiles	41
4.5. Oiseaux	41
4.6. Mammifères	42
5. Détermination des valeurs toxicologiques de référence	61

6. Conclusions et perspectives	66
7. Références bibliographiques	68
Annexe 1 – Liste de minerais contenant du lithium	79

Liste des tableaux

Tableau 1 – Principales caractéristiques physicochimiques du lithium _____	3
Tableau 2 – Concentrations en lithium dans différents compartiments environnementaux _____	10
Tableau 3 – Accumulations en lithium dans différents types de microorganismes exposés une heure à pH = 6 _____	16
Tableau 4 – Accumulations en lithium, en mg/kg, chez trois espèces végétales exposées au LiCl seul ou en présence d'EDTA et d'EDDS _____	21
Tableau 5 – Concentrations en Li, telles que rapportées dans la littérature, chez des plantes poussant en milieu naturel _____	22
Tableau 6 – Concentrations en Li, telles que rapportées dans la littérature, dans certains tissus végétaux poussant en milieu naturel _____	26
Tableau 7 – Accumulations, en mg/kg, dans les tissus de plantes exposées à différentes teneurs en lithium _____	27
Tableau 8 – Distribution en Li dans différents tissus de mammifères _____	34
Tableau 9 – Toxicité de différents composés de lithium sur les plantes terrestres _____	45
Tableau 10 – Toxicité de différents composés de lithium sur les invertébrés terrestres _____	56
Tableau 11 – Toxicité de différents composés de lithium sur les oiseaux _____	57
Tableau 12 – Effets observés chez des mammifères à la suite de l'ingestion de différents composés de lithium _____	58
Tableau 13 – Valeurs toxicologiques de référence proposées pour les récepteurs terrestres exposés au lithium _____	63

Liste des figures

Figure 1 – Demande mondiale de batteries lithium-ion, en fonction des parts de marché relatives, entre 2005 et 2040	1
Figure 2 – Consommation mondiale de lithium par type d'utilisation, exprimée en pourcentage de tonnage d'équivalent carbonate de lithium.....	4
Figure 3 – Principaux indices et projets miniers de lithium au Québec	6
Figure 4 – Voie de signalisation de l'inositol, impliquée dans de nombreux processus cellulaires, dont le phénomène de neurotransmission.....	40
Figure 5 – Exemple de courbe concentration/réponse modélisée à partir de données de toxicité expérimentales et utilisée pour estimer les concentrations induisant 10, 20 et 40 % d'effets.....	62
Figure 6 – Distribution des données utilisées pour dériver les VTR pour chaque type d'utilisation de sols chez les plantes	64
Figure 7 – Distribution des données utilisées pour dériver les VTR pour chaque type d'utilisation de sols chez les mammifères, en tenant compte des facteurs de correction.....	65

Liste des annexes

Annexe 1	Liste de minerais contenant du lithium.....	79
-----------------	---	----

1. Introduction

Les activités de transport sont responsables d'une grande partie des émissions de gaz à effet de serre (GES). À titre d'exemple, au Québec, le secteur des transports représente 40 % des émissions de GES, dont la moitié provient des véhicules légers (MELCC, 2021). Ces émissions sont associées aux carburants automobiles, dont près de 90 % proviennent de combustibles fossiles (essence et diesel). L'une des voies les plus prometteuses pour réduire les émissions de GES est la transition des voitures à essence vers des véhicules utilisant des sources d'énergie renouvelables, telles que l'électricité et les biocarburants. La demande grandissante de véhicules à propulsion électrique est telle que la production de batteries lithium-ion a été multipliée par huit au cours des dix dernières années (Wanger, 2011; Agusdinata et collab., 2018). Des prédictions montrent que celle-ci devrait continuer d'augmenter dans les dix prochaines (figure 1), en lien avec la production des batteries lithium-ion ainsi que la production de téléphones cellulaires, d'ordinateurs portables et d'autres appareils numériques.

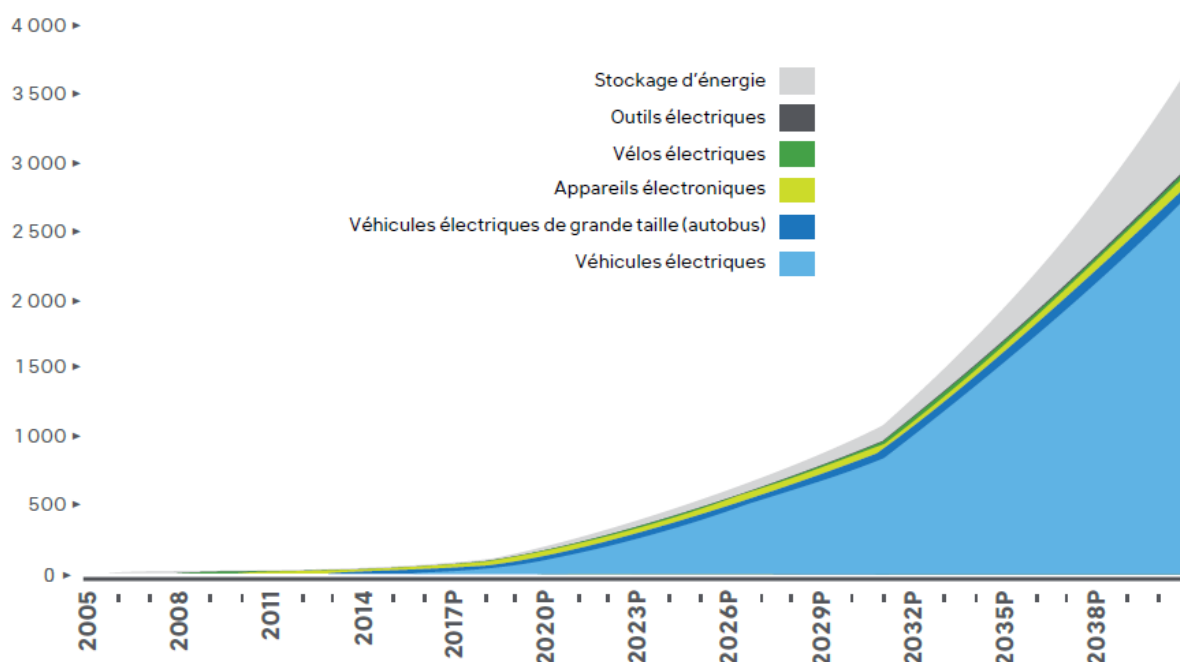


Figure 1 – Demande mondiale de batteries lithium-ion, en fonction des parts de marché relatives, entre 2005 et 2040. Tirée de Propulsion Québec (2019).

Pour répondre à la demande croissante de batteries lithium-ion, dont le marché global est passé de 20 % en 2008 à 65 % en 2020 (Ober, 2008; Jaskula, 2020), la production minière de lithium a augmenté rapidement au cours des 20 dernières années. En 2010, la production mondiale était de 28 100 tonnes, soit environ quatre fois plus qu'en 1995 (Ober, 1996; Jaskula, 2012). Entre 2016 et 2017, une augmentation de 82 % de la production mondiale a été observée (Jaskula, 2018, 2019). L'année suivante, celle-ci a augmenté de 38 %, passant de 69 000 tonnes en 2017 à 95 000 tonnes en 2018 (Jaskula, 2020). La capacité de production mondiale de lithium est actuellement estimée à 77 000 tonnes de lithium par an (Jaskula, 2020).

Puisque les énergies renouvelables, l'électrification des transports et les technologies de pointe sont des secteurs en croissance pour lesquels un approvisionnement en minéraux critiques et stratégiques (MCS) est indispensable, le gouvernement du Québec a récemment mis en œuvre le Plan québécois pour la valorisation des minéraux critiques et stratégiques 2020-2025 (PQVMCS). Ce plan présente des stratégies

qui doivent être mises de l'avant pour favoriser l'exploration minière, la mise en valeur et l'exploitation des minéraux indispensables à la transition énergétique et technologique, y compris le lithium, sans oublier leur recyclage et leur utilisation optimale. En réponse à ce plan, et pour répondre à la demande croissante pour le minerai et les batteries lithium-ion, le Québec souhaite prendre une place importante dans le développement de toute la chaîne d'approvisionnement, du minerai jusqu'à la cellule électrique, en passant par le recyclage des batteries en fin de vie pour en reconstruire de nouvelles. Le Québec entend également s'impliquer dans l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement des batteries lithium-ion, un des objectifs mis de l'avant dans le Plan pour une économie verte 2030 (action 2.1.1; MELCC, 2020). La province est bien placée pour y arriver. En effet, le territoire possède non seulement les ressources de Li minérales (estimées à 2 millions de tonnes, soit 4 % des réserves mondiales), mais aussi les compétences pour la transformation des minerais en précurseurs et matériaux actifs, la fabrication de composantes et de cellules pour les véhicules électriques, le développement et l'assemblage de véhicules électriques spécialisés (ex. : autobus et véhicules lourds) et le recyclage de batteries lithium-ion de toutes tailles (Propulsion Québec, 2019).

Ces développements devront se faire dans le respect des normes environnementales et des principes de développement durable. Les mesures de protection environnementales imposées aux industries minières et industrielles et mises en œuvre lors des travaux d'exploration et d'exploitation minières ont beaucoup évolué depuis les 25 dernières années. Des mesures d'atténuation sont de plus en plus appliquées, tant au chapitre des méthodes d'exploitation qu'à celui des techniques de traitement des effluents, qui permettent entre autres d'atteindre des teneurs qui se situent en dessous des seuils réglementaires. Néanmoins, les activités minières et industrielles peuvent entraîner la contamination des milieux environnants. Des concentrations résiduelles de lithium pourraient ainsi se retrouver dans l'environnement terrestre et aquatique, entre autres par le rejet par les effluents, les eaux de ruissellement et les poussières. Étant donné le potentiel du territoire québécois à s'impliquer dans l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement des batteries lithium-ion, il apparaît donc indispensable d'acquérir des connaissances sur le devenir du lithium dans l'environnement, son potentiel de bioaccumulation et son potentiel toxique pour la faune et la flore terrestres.

Cette revue de la littérature a pour objectifs : 1) d'établir la présence et le devenir du lithium dans l'environnement; 2) d'inventorier les données de bioaccumulation et de toxicité disponibles sur le lithium pour la faune et la flore terrestres; 3) de proposer des valeurs toxicologiques de référence, soit des concentrations seuils d'effets pour les organismes terrestres exposés au lithium présent dans le sol; et, sur la base de ces données, 4) d'établir s'il existe un potentiel de danger associé à la présence de lithium dans l'environnement et si des études doivent être entreprises pour compléter les données disponibles. Ces connaissances seront nécessaires au processus d'évaluation des risques des projets d'exploration ou d'exploitation minière, permettront d'encadrer adéquatement cette activité et favoriseront son développement dans le respect des principes du développement durable, tout en assurant la protection et la conservation des écosystèmes terrestres et le maintien des services écologiques qu'ils rendent (ex. : cycle biogéochimique des nutriments, production primaire, approvisionnement en nourriture et en matériaux).

2. Caractéristiques du lithium dans l'environnement

2.1. Propriétés physicochimiques

Le lithium est le troisième élément dans le tableau périodique, avec une masse atomique de 6,94 g/mol. C'est le premier des éléments alcalins. Il s'agit d'un métal mou, de couleur gris argenté, qui se ternit et s'oxyde très rapidement au contact de l'air et de l'eau.

Le lithium a une faible électronégativité et possède un électron de valence unique dans sa couche électronique extérieure qui est librement abandonné pour former un cation de petite taille, avec une haute densité de charge, formant principalement des liaisons ioniques. Étant donné sa forte réactivité, il n'est pas présent dans l'environnement à l'état pur (Kszos et Stewart, 2003), mais sous forme de composé ionique. Dans la nature, il se trouve donc associé aux minéraux et aux sels (Shahzad et collab., 2017; Kavanagh et collab., 2018).

Ce métal possède une masse volumique très faible ($0,534 \text{ g/cm}^3$), faisant de lui le moins dense de tous les éléments solides à température ambiante. Il est suivi par le potassium, qui a une densité 60 % plus élevée ($0,862 \text{ g/cm}^3$). Ainsi, avec le sodium et le potassium, il s'agit d'un des rares métaux pouvant flotter sur l'eau. Il peut également flotter sur les huiles d'hydrocarbures les plus légères. Les phosphates ($\text{Li}_3\text{PO}_4 = 0,039 \text{ g/100 ml}$ à 20°C), les fluorures ($\text{LiF} = 0,127 \text{ g/100 ml}$ à 20°C) et les carbonates ($\text{Li}_2\text{CO}_3 = 1,33 \text{ g/100 ml}$ à 20°C) de lithium sont insolubles dans l'eau, l'hydroxyde de lithium ($\text{LiOH} = 12,8 \text{ g/100 ml}$ à 20°C) est faiblement soluble, tandis que les nitrates ($\text{LiNO}_3 = 70,1 \text{ g/100 ml}$ à 20°C) et les chlorures ($\text{LiCl} = 83,5 \text{ g/100 ml}$ à 20°C) de lithium sont hautement solubles dans l'eau.

Son point de fusion est également faible ($180,5^\circ\text{C}$), ce qui le rend aussi réactif. Parmi ses autres propriétés les plus significatives se trouvent une chaleur spécifique élevée (capacité calorifique), une conductivité thermique élevée et une basse viscosité, des caractéristiques recherchées pour les applications électroniques. Le tableau 1 résume les principales caractéristiques physiques du lithium.

Tableau 1 – Principales caractéristiques physicochimiques du lithium

Masse molaire (g/mol)	Densité (g/cm^3)	Rayon atomique (pm)	État d'oxydation	1 ^{re} énergie d'ionisation (KJ/mol)	Point de fusion ($^\circ\text{C}$)	Point d'ébullition ($^\circ\text{C}$)	Pression de vapeur (Pa)
6,941	0,534	157	1	520,2	180,5	1 342	1,63E-08

2.2. Utilisation du lithium

En plus d'être utilisé dans la fabrication de batteries, le lithium entre dans la confection de différents types de verres, de céramiques, de graisses lubrifiantes, de caoutchouc, d'émaux et d'aluminium de première fusion (figure 2; Flexer et collab., 2018). Il est également utilisé dans l'industrie chimique, ainsi que dans la fabrication de produits pharmaceutiques et de certains alliages. Ces différentes utilisations n'appellent pas forcément les mêmes produits finis du lithium.

Parmi les principaux produits finis du lithium, le carbonate de lithium est le plus répandu dans l'industrie, suivi par l'hydroxyde de lithium :

- Le carbonate de lithium (Li_2CO_3) est utilisé dans l'industrie du verre, dans les céramiques, le raffinage de l'aluminium et la construction;
- L'hydroxyde de lithium (LiOH) est utilisé dans les lubrifiants ou dans les colorants. Il est également utilisé dans la production de batteries de deux formes, carbonate et hydroxyde de lithium;

- Le lithium métallique est utilisé dans certaines industries chimiques très spécialisées (ex. : nucléaire militaire avec la bombe H), ainsi qu'en médecine pour le traitement du trouble bipolaire. Dans ce dernier cas, étant un cation univalent, il est toujours administré par voie orale avec un anion, soit sous forme de capsule contenant du carbonate de lithium, soit sous forme de préparation liquide contenant du citrate de lithium (Shahzad et collab., 2017);
- Les autres formes de produits finis, telles que le chlorure de lithium (LiCl), notamment utilisé pour obtenir la couleur rouge des feux d'artifice et des fumigènes ou encore dans la préparation de nanotubes de carbone, et le butyl-lithium (C₄H₉Li), utilisé dans l'industrie chimique des polymères, sont assez peu significatives.

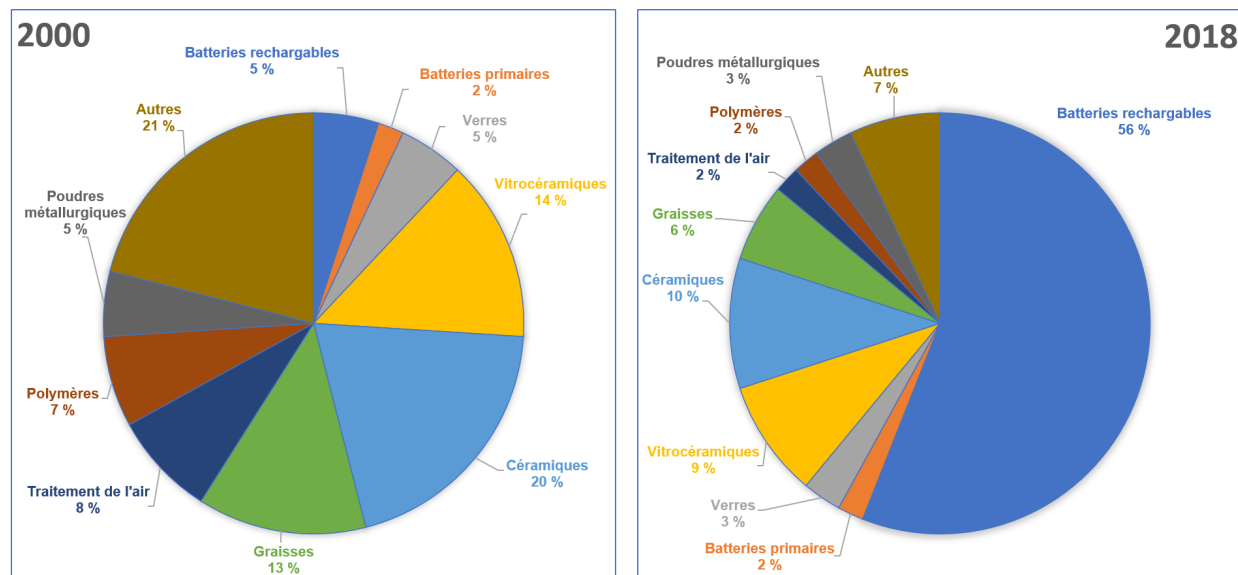


Figure 2 – Consommation mondiale de lithium par type d'utilisation, exprimée en pourcentage de tonnage d'équivalent carbonate de lithium. La figure de gauche présente la consommation pour l'année 2000. La figure de droite illustre la consommation pour l'année 2018. Adaptée de Bibienne et ses collaborateurs (2020).

2.3. Ressources en lithium

Le lithium est présent dans la croûte terrestre à de relativement faibles concentrations (de 20 à 70 mg/kg). Il est principalement associé avec les pegmatites, qui sont des roches ignées intrusives provenant de la cristallisation séquentielle des fluides postmagmatiques (Bradley et collab., 2017; Kavanagh et collab., 2018). Le lithium, identifié comme un élément lithophile¹ et incompatible², est soluble dans ces fluides (Chen, 1998; Stosch, 1998). Jusqu'à la fin du refroidissement séquentiel des fluides magmatiques, le lithium demeure ainsi en solution et se concentre dans la croûte terrestre, particulièrement dans les roches pegmatites riches en minéraux aluminosilicates. Celles-ci comprennent le spodumène [LiAl(Si₂O₆)], la pétalite (LiAlSi₄O₁₀), la lépidolite [K(Li,Al)₃(Si,Al)₄O₁₀(F,OH)₂], la zabuyélite (Li₂CO₃), l'amblygonite [(Li,Na)Al(PO₄)(F,OH)] et la zinnwaldite [K(Li,Al,Fe)₃(Al,Si)₄O₁₀(F,OH)₂]. Une liste d'environ 145 minerais contenant du lithium est présentée à l'annexe 1. Près de 73 % de ces minéraux sont des silicates, 19 % des phosphates et 8 % sont des carbonates, fluorides, oxydes et hydroxydes, borates ou arsénites (Grew,

¹ Élément chimique qui se rencontre fréquemment en association avec des oxydes minéraux en raison d'une affinité particulière pour l'oxygène.

² Élément dont la taille ou la charge ne conviennent pas aux sites cationiques des minéraux dont il fait partie. Il est défini par un coefficient de partage entre les minéraux rocheux et la fonte beaucoup plus petit que 1.

2020). Environ 60 % de la production globale de lithium provient de la pegmatite (Bowell et collab., 2020). L'Australie, qui est le principal producteur de lithium au monde, a augmenté sa production de concentré de spodumène de 40 % en 2018, et sa production de Li a été estimée à 42 000 tonnes en 2019 (Jaskula, 2019, 2020). Les autres producteurs majeurs de Li d'origine minérale sont la Chine, le Canada et le Zimbabwe (Jaskula, 2020). Le Québec présente un grand potentiel géologique pour l'exploitation des minéraux de lithium, puisqu'il possède de nombreux gîtes de pegmatite granitique à spodumène contenant jusqu'à 8 % d'oxyde de lithium (Li_2O). Les principaux projets miniers sont situés en Abitibi, au nord de Chibougamau et dans le secteur Eastmain-Nemiscou à la Baie-James (figure 3).

Outre les dépôts de pegmatites, les ressources principales de lithium sont les dépôts d'argile volcanique et les dépôts dans les lacs salés, aussi appelés saumures. Ainsi, le lithium se trouve naturellement dans les saumures en raison de la solubilité élevée du chlorure de lithium dans l'eau (Agusdinata et collab., 2018; Flexer et collab., 2018; Kavanagh et collab., 2018). Les ressources de lithium trouvées dans les saumures représentent environ 87 % des ressources mondiales estimées (Jaskula, 2019), alors que la production globale de lithium provenant des saumures est estimée à moins de 40 % (Bowell et collab., 2020). Le lithium récupéré à partir des saumures provient principalement du triangle du lithium sud-américain, situé aux frontières communes de la Bolivie (salar d'Uyuni), du Chili (salar d'Atacama) et de l'Argentine (salar del Hombre Muerto). Certaines exploitations sont également présentes en Chine et aux États-Unis (Kesler et collab., 2012; Jaskula, 2020).

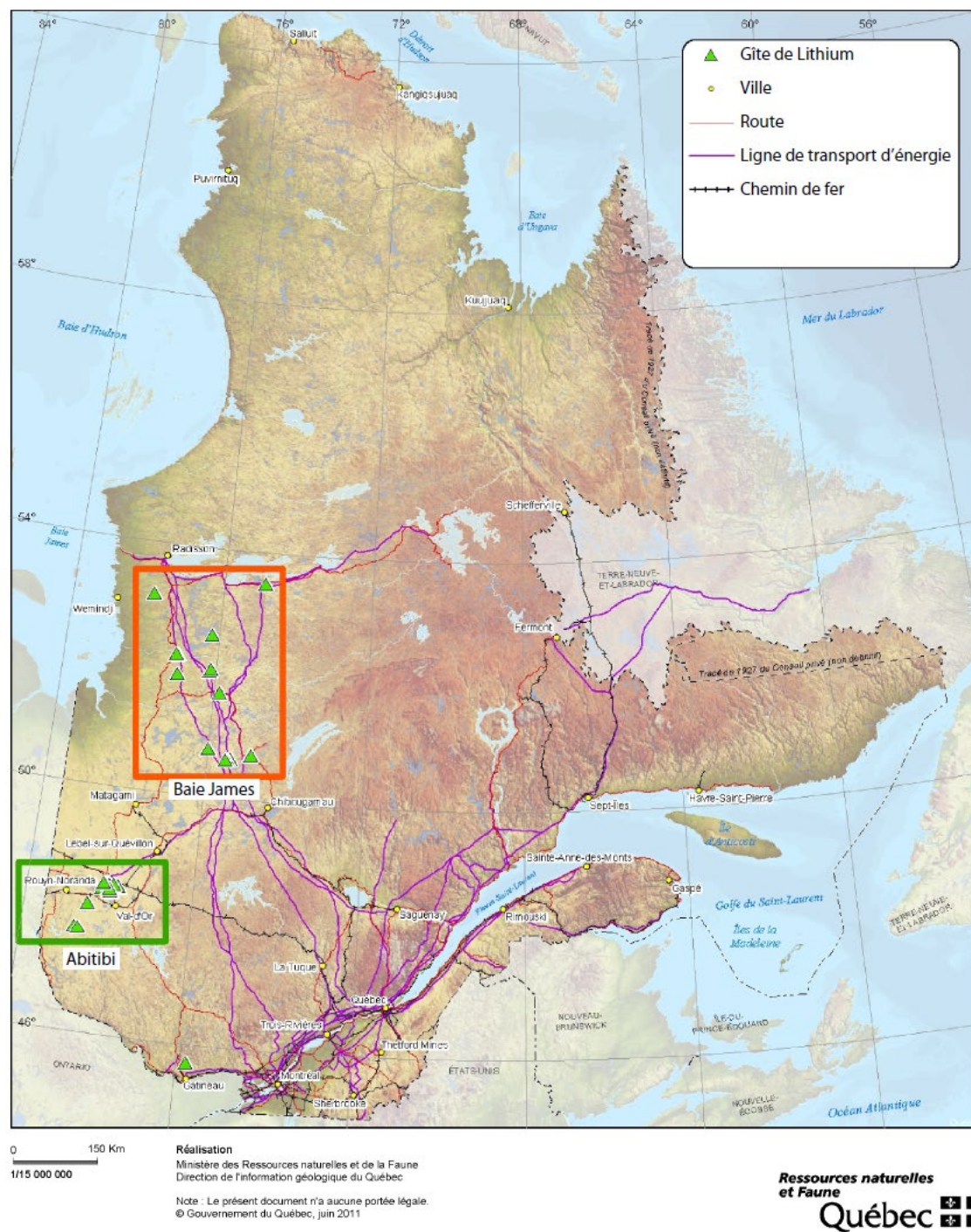


Figure 3 – Principaux indices et projets miniers de lithium au Québec. Tirée de MERN (2011).

2.4. Extraction, transformation et recyclage

Le lithium trouvé dans les saumures est produit sous la forme de carbonates ou de chlorures de Li. Il est extrait par évaporation solaire, suivie d'un simple raffinage. Les saumures présentent un grand potentiel de ressources en Li, et les coûts de production sont faibles. Toutefois, le procédé d'extraction est sensible aux changements climatiques, et le produit final contient des impuretés (Mg et Fe), dissoutes avec le Li, ce qui diminue la pureté du produit final (Bowell et collab., 2020).

La production de Li à partir des pegmatites implique une transformation plus traditionnelle (Bibienne et collab., 2020). À la suite de la séparation et de la concentration du minerai contenant le Li, tel que le spodumène, le concentré est utilisé directement pour la fabrication de verres et de vitrocéramiques ou subit des étapes de grillage et de lixiviation acide pour extraire le Li. L'acide contenant le Li soluble est ensuite purifié et cristallisé sous forme de carbonate de lithium (Li_2CO_3) ou d'hydroxyde de lithium monohydrate ($\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$). Ces produits finaux contiennent très peu d'impuretés et peuvent donc être utilisés dans la production des batteries lithium-ion, qui requiert une pureté du lithium de plus de 99,5 %. Plus de la moitié du lithium produit aujourd'hui est destiné à la production de ces batteries (figure 2; Bibienne et collab., 2020).

L'impact environnemental de la production d'un kilogramme de lithium, de l'extraction à partir des saumures jusqu'à la production du Li_2CO_3 , provient principalement de l'étape de purification (Nuss et Eckelman, 2014). Pour le Li métallique, les impacts sont associés à la purification et au raffinage (Nuss et Eckelman, 2014). Pour la production du LiOH par l'hydratation de Li_2CO_3 , les impacts environnementaux seraient associés aux effluents liquides, jusqu'à 5 % du Li_2CO_3 pouvant se retrouver dans ces derniers (Althaus et collab., 2007). À titre d'exemple, pour la production du Li_2CO_3 , dans une usine en Chine, à partir d'un concentré de spodumène provenant de l'Australie, les effets potentiellement toxiques pour l'écosystème étaient principalement associés à l'étape de lixiviation (Jiang et collab., 2020). Ainsi, d'après les résultats de cette étude, la production du Li à partir du spodumène présenterait un potentiel toxique 9,3 fois plus élevé que la production à partir des saumures. Cela peut s'expliquer par les nombreuses étapes nécessaires pour la transformation du spodumène en produits du Li (calcination, grillage, lixiviation, purification et séchage). En comparaison, peu d'énergie et de produits chimiques sont nécessaires pour transformer les saumures de Li par les étapes d'évaporation et de purification. Mentionnons que ces conclusions, obtenues à la suite d'analyses de cycle de vie, présentent une grande incertitude, si l'on considère les données limitées sur le comportement du lithium dans les résidus miniers à la suite de leur disposition, ainsi que sur leur toxicité pour les organismes terrestres, ce qui limite d'autant l'interprétation des résultats.

En raison du besoin croissant de batteries Li-ion, la demande mondiale de Li devrait passer de 162 752 tonnes en 2017 à 1 099 014 tonnes en 2028, une augmentation de 575 % (Propulsion Québec, 2019). Pour répondre à cette hausse, le recyclage des batteries pourrait jouer un rôle important dans l'approvisionnement en matériaux de batteries (Propulsion Québec, 2019). La pyrométallurgie est la méthode traditionnellement utilisée pour recycler les batteries Li-ion. Les diverses composantes des batteries sont fondues à haute température pour produire une poudre fine contenant du Co, du Cu, du Ni et du Fe. D'autres étapes de traitement sont nécessaires pour extraire ces métaux d'intérêt. Le Li ne se trouve pas dans cette fraction et n'est donc pas valorisé avec les procédés pyrométallurgiques. Des procédés hydrométallurgiques sont nécessaires pour récupérer le Li. Après une étape de prétraitement physique (c.-à-d. déchiquetage et broyage), le solide résultant subit une lixiviation acide pour dissoudre les métaux d'intérêt, y compris le Li. Des étapes de purification et de séparation suivent pour récupérer les métaux, souvent accompagnées du recyclage des réactifs et des eaux usées. Pour le Li, une cristallisation sous forme de Li_2CO_3 est généralement réalisée. Le nombre de batteries en fin de vie au Québec pourrait atteindre entre 58 000 et 88 000 en 2030, ce qui entraînerait le recyclage de 17 500 à 264 000 tonnes de matériaux (Propulsion Québec, 2019). Actuellement, la seule usine de recyclage des batteries Li-ion, Retrie Technologies (anciennement Toxco), se trouve en Colombie-Britannique. Cependant, une usine de recyclage de batteries Li-ion, Recyclage Lithion, est en phase de construction au Québec. Celle-ci traitera 2 000 tonnes de batteries Li-ion par année à partir de 2023 (Recyclage Lithion, 2021).

L'enfouissement des batteries utilisées présente le plus grand impact négatif sur l'environnement avec la lixiviation de plusieurs métaux potentiellement toxiques (ex. : Li, Ni et Co) et des composés organiques qui servent d'électrolytes (ex. : diméthoxyéthane et carbonates de propylène, éthylène et diéthyl; Boyden et collab., 2016; Yang et collab., 2021). Le recyclage des batteries usées peut donc diminuer les impacts environnementaux provenant de la génération de déchets de batteries et de l'extraction des ressources primaires. Cependant, les principaux impacts environnementaux reliés au processus de recyclage des batteries ne sont pas bien connus à ce jour (Yang et collab., 2021). Par conséquent, l'absence de données sur les impacts environnementaux des étapes de recyclage limite la capacité des modèles d'analyses de cycle de vie à identifier de tels impacts de la chaîne de valeur du Li.

2.5. Présence dans l'environnement

Le lithium est présent naturellement au sein des environnements aquatique et terrestre dans plus de 150 minéraux, dans les argiles, dans de nombreuses saumures continentales, dans les eaux géothermales et dans l'eau de mer (Aral et Vecchio-Sadus, 2008; Flexer et collab., 2018).

En milieu terrestre, le lithium se trouve principalement sous forme de carbonate de lithium (Li_2CO_3), de chlorure de lithium (LiCl) ou d'oxyde de lithium (Li_2O). Par exemple, le spodumène contient jusqu'à 8,0 % en poids de Li_2O et ce lithium est étroitement lié à la structure cristalline (Aral et Vecchio-Sadus, 2008). Avec des teneurs naturelles variant entre 20 et 70 mg/kg, le lithium est le 25^e élément le plus abondant dans la croûte terrestre (Flexer et collab., 2018; Wedepohl, 1995; Steinkoenig, 1915). Avec des concentrations moyennes entre 200 et 500 mg/kg, les argiles authigènes, c'est-à-dire qui sont présentes à l'endroit où elles se sont formées, sont généralement enrichies en lithium par rapport aux autres types de roches (Schrauzer, 2002; Aral et Vecchio-Sadus, 2008). Les concentrations moyennes dans les roches ignées varient de 22 à 65 mg/kg (Cannon et collab., 1975). Le lithium y est concentré dans les silicates et les aluminosilicates, où il remplace le magnésium, le fer ferreux et l'aluminium. Les argiles détritiques, les grès, les schistes et les roches calcaires contiennent des concentrations moyennes de lithium de 70, 15, 46 et 5,2 mg/kg, respectivement (Cannon et collab., 1975). Les concentrations mesurées dans les sols à proximité de gisements peuvent s'élever jusqu'à 1 600 mg/kg en Amérique du Sud et jusqu'à 40 000 mg/kg en Australie.

La disponibilité du Li dans les sols est davantage contrôlée par les conditions prévalant dans le sol que par sa teneur initiale dans les roches mères (Ammari et collab., 2011). Étant chargé positivement (Li^+), le lithium est attiré par les particules du sol chargées négativement, comme l'argile et les particules de matière organique (Elektorowicz et Keropian, 2015) et présente peu d'affinités pour les sols sableux (Lund et Young, 2005). Le Li^+ ayant la chimie de sorption la plus faible de tous les métaux alcalins, son affinité avec les argiles est considérée comme étant due à la substitution isomorphe de Mg^{2+} par Al^{3+} dans la couche octaédrique, laissant une place libre pour accueillir le Li^+ (Aral et Vecchio-Sadus, 2011; Araoka et collab., 2014). Le lithium est d'ailleurs fortement corrélé à l'aluminium, au magnésium et au calcium dans la fraction argileuse des sols, alors qu'il est négativement corrélé avec le sodium (Kavanagh et collab., 2018; Robinson et collab., 2018). En présence de matière organique contenant des particules chargées négativement qui attirent l'ion positif Li^+ , la capacité de sorption des sols ayant une faible capacité d'échange cationique en raison de leur composante minérale augmente considérablement. Par conséquent, dans les matériaux grossiers contenant peu de matière organique, il y a peu de sites d'échange de cations pour la sorption du Li^+ , ce qui rend les cations très mobiles. Le lithium présente également une certaine affinité pour les oxydes de Mn et les roches phosphatées (Ammari et collab., 2011). La mobilité du lithium dans un sol dépend aussi fortement du pH, le lithium étant plus mobile en milieu acide qu'en milieu basique (Elektorowicz et Keropian, 2015). Par conséquent, la faible présence de matière organique, d'oxydes de Mn et de roches phosphatées diminue la sorption du Li^+ dans les sols, laissant les ions libres en solution, ce qui augmente leur mobilité. Le lithium est ainsi considéré comme un élément géochimiquement très mobile (Agusdinata et collab., 2018).

En raison de la dissolution des minéraux contenant du lithium, les ions Li^+ sont lessivés du sol par les pluies et peuvent pénétrer dans les eaux souterraines et le milieu aquatique (Anderson, 1990; McNeely et collab., 1979). Le Li est plus facilement libéré des minéraux primaires en milieu oxydant et acide (Ammari et collab.,

2011). Les minéraux de lithium finement broyés, en particulier les minerais de phosphate contenant du lithium, sont plus sensibles à la lixiviation par l'eau et les acides dilués que les minerais non broyés. La lixiviation du lithium des roches dépend également de la température (Araoka et collab., 2014).

Une fois dans le milieu aquatique, le lithium se trouve principalement sous forme ionique. Les composés les plus retrouvés, le LiCl et le sulfate de lithium (LiSO_4), se dissocient en milieu aqueux. Ces composés étant très solubles dans l'eau, le lithium est donc plus présent en solution. Sa teneur est positivement corrélée avec la dureté, la présence de magnésium, de sulfates et de chlorures, et négativement corrélée avec l'aluminium. Par conséquent, les concentrations de lithium sont généralement plus élevées dans les eaux chlorées et sulfatées que dans les eaux bicarbonatées (National Research Council, 1974).

Les concentrations naturelles de lithium dans les eaux douces se situent habituellement entre 1 et 40 $\mu\text{g/l}$, comparativement à environ 170 $\mu\text{g/l}$ dans l'eau de mer (Aral et Vecchio-Sadus, 2008; Ammari et collab., 2011). Les teneurs en lithium dissous mesurées dans les eaux de surface de différents fleuves et rivières du monde entier varient de 0,010 à 23 $\mu\text{g/l}$, avec une moyenne pondérée selon le débit de 1,8 $\mu\text{g/l}$ (Kszos et Stewart, 2003; Misra, 2012). La majeure partie du lithium dissous dans l'eau des rivières (> 90 %) provient de roches siliceuses (Kisakürek et collab., 2005; Millot et collab., 2010). Ces concentrations sont généralement plus élevées dans les régions où sont trouvés des saumures et des minéraux riches en lithium. Ainsi, la teneur en lithium varie de 13,7 mg/l dans la mer Morte à 1 500 mg/l dans les saumures du salar d'Atacama, au Chili (Lui-Heung et Edmond, 1988; Aral et Vecchio-Sadus, 2008). Dans les rivières des régions riches en lithium du nord du Chili, la teneur dans les eaux de surface peut atteindre 5,2 mg/l. Les eaux riches en chlorure et en sulfates contiennent généralement des concentrations de lithium plus élevées que les eaux riches en bicarbonate (Araoka et collab., 2014). De façon générale, les concentrations de lithium dans les eaux souterraines peuvent atteindre 500 $\mu\text{g/l}$ (Schrauzer, 2002; Aral et Vecchio-Sadus, 2008), tandis que dans les eaux souterraines salines, qui sont courantes dans les régions arides et semi-arides, les teneurs varient de 10 à 16 000 $\mu\text{g/l}$ (Tomascak, 2004). Dans les dépôts, le Li montre une nette tendance à la déplétion dans les eaux résiduelles, après évaporation, puisque le carbonate de lithium précipite (Tan et collab., 2018).

Dans les sédiments, une étude de l'adsorption du lithium suggère que seulement 10 % de lithium, ce qui représente 1 mg/kg, est adsorbé sur les argiles et les sédiments des rivières (Chan et collab., 1997). Dans cette matrice, les concentrations de lithium sont en général proportionnelles à celles du magnésium, mais ne sont que faiblement corrélées avec la silice et le potassium. Cela est cohérent avec la tendance du lithium à être retenu dans les argiles secondaires dans les sols, se substituant au Mg^{2+} ou occupant la place vacante générée par la substitution de Mg^{2+} par Al^{3+} . Il reste que, pour le compartiment sédimentaire, peu de données sont disponibles. Il apparaît que les concentrations moyennes mesurées sont de 17 mg/kg dans les grès, de 46 mg/kg dans les schistes et de 26 mg/kg dans les calcaires (National Research Council, 1974).

Finalement, le tableau 2 présente des concentrations en lithium dans différents compartiments environnementaux, y compris les concentrations rapportées à proximité de gisements ou de sols naturellement enrichis en lithium. Précisons qu'il ne s'agit pas d'une liste exhaustive, mais elle permet néanmoins de déterminer l'étendue de la présence du lithium dans l'environnement, notamment à proximité de mines en exploitation.

Tableau 2 – Concentrations en lithium dans différents compartiments environnementaux

Lieu de prélèvement	Teneurs en lithium	Références
Sols (mg/kg)		
Australie	6 – 28	Davey et Wheeler, 1980
Danemark	0,5 – 3,2	Kabata-Pendias, 2004
Espagne	24 – 135	Roca-Perez et collab., 2010
États-Unis	3,7 – 33,3	Anderson et collab., 1988
États-Unis, Missouri	15 – 32	Feder, 1972
États-Unis, Nevada	8 – 400	Cannon et collab., 1975
Grande-Bretagne	25	Kabata-Pendias, 2004
Irlande	20 – 30	Fay et collab., 2007
Jordanie	0,95 – 2,7	Ammari et collab., 2011
Kujawy, Pologne	9 – 19	Dabkowska-Naskret et Malczyk, 1999
Nouvelle-Zélande	0,01 – 130	Kabata-Pendias, 2004
	0,08 – 92	Yalamanchali, 2012
Papouasie-Nouvelle-Guinée	0,3 – 118,3	Davey et Wheeler, 1980
Pologne	0,01 – 38	Kabata-Pendias, 2004
Russie	17 – 60	Kabata-Pendias, 2004
Sédiments (mg/kg)		
Rivière Poxim-Açu, Brésil	1,8 – 7,9	Garcia et collab., 2009
Rivière Poxim-Mirim, Brésil	5,9 – 22,7	Garcia et collab., 2009
Rivière Poxim, Brésil	6,5 – 9,9	Garcia et collab., 2009
Rivière Pitanga, Brésil	4,2 – 10,5	Garcia et collab., 2009

Lieu de prélèvement	Teneurs en lithium	Références
Sédiments (mg/kg)		
Rivières du bassin du Qaidam, Chine	1,8 – 62,0	Tan et collab., 2012
Bassin de rétention, Danemark	15,5 – 16,3	Kjølholt et collab., 2003
Nevada, États-Unis	20 – 1 500	Cannon et collab., 1975
Clayton Valley, Nevada, États-Unis	350 – 1 171	Kunasz 1974, cité dans Araoka et collab., 2014
Baie de Chabahar, Makran, mer d'Oman	10 – 45	Agah, 2018
Eau de surface (µg/l)		
Eaux de surface canadiennes	1 – 190	NAQUADAT, 1985
Lac Tanganyika, Afrique	15	Lui-Heung et Edmond, 1988
Vallées sèches de McMurdo, Antarctique	0,63 – 2,50	Witherow et collab., 2010
Lac Hoare, vallées sèches de McMurdo, Antarctique	3 – 17	Witherow et collab., 2010
Lac Fryxell, vallées sèches de McMurdo, Antarctique	46 – 95	Witherow et collab., 2010
Lac Bonney Ouest, vallées sèches de McMurdo, Antarctique	22 – 4 400	Witherow et collab., 2010
Lac Bonney Est, vallées sèches de McMurdo, Antarctique	29 – 8 290	Witherow et collab., 2010
Lac Vanda, vallées sèches de McMurdo, Antarctique	0,11 – 22 000	Witherow et collab., 2010
Lac Don Juan, vallées sèches de McMurdo, Antarctique	265 000	Witherow et collab., 2010
Puna de Atacama, Argentine	29 000	Peralta Arnold et collab., 2017
Salar del Rincón, Argentine	400 000 – 1 500 000	Munk et collab., 2016
Salar de Olaroz, Argentine	282 000 – 1 207 000	Munk et collab., 2016
Salar de Cauchari, Argentine	200 000 – 2 150 000	Munk et collab., 2016
Salar de Llullaillaco, Argentine	250 000 – 650 000	Munk et collab., 2016
Salar del Hombre Muerto, Argentine	3 200 – 900 000	Munk et collab., 2016

Lieu de prélèvement	Teneurs en lithium	Références
Eau de surface (µg/l)		
Salar d'Uyuni, Bolivie	80 000 – 1 150 000	Munk et collab., 2016
Salar de Coipasa, Bolivie	243 000	Munk et collab., 2016
Lagune Pastos Grandes, Bolivie	5 200 – 1 787 000	Munk et collab., 2016
Rivières du bassin du Qaidam, Chine	37 – 821	Tan et collab., 2012
Lacs salés du bassin du Qaidam, Chine	88 400 – 256 000	Tan et collab., 2012
Lac Taijanier, Qaidam, Chine	290 000	Munk et collab., 2016
Belén, Chili	22 – 30	Figuerola et collab., 2012
Camar, Chili	700	Figuerola et collab., 2012
Canal Lauca, Chili	80 – 157	Figuerola et collab., 2012
Chapiquiña, Chili	33 – 39	Figuerola et collab., 2012
Lupica, Chili	20 – 22	Figuerola et collab., 2012
Murmuntani, Chili	70,7	Figuerola et collab., 2012
Peine, Chili	500	Figuerola et collab., 2012
Río Lauca, Chili	96 – 148	Figuerola et collab., 2012
Salar d'Atacama, Chili	40 000 – 7 000 000	Munk et collab., 2016
Salar de Maricunga, Chili	920 000	Munk et collab., 2016
Salar de Surire, Chili	8 300 – 340 000	Munk et collab., 2016
	500 – 120 000	Figuerola et collab., 2012
Salar de Tara, Chili	400 – 120 400	Figuerola et collab., 2012
Salar de Aguas Calientes, Chili	3 020 – 125 000	Figuerola et collab., 2012
Salar de Laco, Chili	140 – 13 200	Figuerola et collab., 2012

Lieu de prélèvement	Teneurs en lithium	Références
Eau de surface (µg/l)		
San Pedro de Atacama, Chili	293 – 2 700	Figuerola et collab., 2012
Saxamar, Chili	19 – 48	Figuerola et collab., 2012
Socaire, Chili	250 – 300	Figuerola et collab., 2012
Tignamar, Chili	22	Figuerola et collab., 2012
Toconao, Chili	100	Figuerola et collab., 2012
Vallée de Lluta, Chili	4,6 – 207 000	Figuerola et collab., 2012
Vallée d’Azapa, Chili	80 – 1 240	Figuerola et collab., 2012
Vallée de Camarones, Chili	269 – 24 880	Figuerola et collab., 2012
Vallée de Codpa, Chili	0 – 223,4	Figuerola et collab., 2012
Californie, États-Unis	50 – 3 460	Bradford, 1963
Lac Mono, Californie, États-Unis	11 000	Tomascak et collab., 2003
Lac Searles, Californie, États-Unis	10 000 – 80 000	Munk et collab., 2016
Mer de Salton, Californie, États-Unis	5 000 – 400 000	Munk et collab., 2016
Nevada, États-Unis	13 – 300	Cannon et collab., 1975
Clayton Valley, Nevada, États-Unis	40 000 – 300 000	Munk et collab., 2016
Big Soda Lake, Nevada, États-Unis	625	Tomascak et collab., 2003
Lac Walker, Nevada, États-Unis	1 070	Tomascak et collab., 2003
Lac Pyramide, Nevada, États-Unis	720	Tomascak et collab., 2003
Grand Lac Salé, Utah, États-Unis	15 100	Tomascak et collab., 2003
	1 800 – 64 000	Munk et collab., 2016
Comté de Carlow, Irlande	20 ± 20	Kavanagh et collab., 2017

Lieu de prélèvement	Teneurs en lithium	Références
Eau de surface (µg/l)		
Baie de Chabahar, Makran, mer d'Oman	176 – 214	Agah, 2018
Mer Caspienne	286	Lui-Heung et Edmond, 1988
Mer Morte	13 700	Lui-Heung et Edmond, 1988
	10 000	Munk et collab., 2016
Río Conchos, Chihuahua, Mexique	Maximum : 707	Rubio-Arias et collab., 2007
	14,3 – 119,9	Gutiérrez et Borrego, 1999
Lac Baïkal, Russie	2 000	Huh et collab., 1998
Kawu, Tibet	23 300	Tan et collab., 2018
Chongqu, Tibet	602	Tan et collab., 2018
Yangbajing, Tibet	25 000	Guo et collab., 2007
Fleuve Yangzi, Tibet	4	Youngsook et collab., 1998
Lac Zabuye, Tibet	500 000 – 1 000 000	Munk et collab., 2016
Lac Dangxiongcuo, Tibet	430 000	Munk et collab., 2016
Eau souterraine (µg/l)		
Manitoba, Canada	260 – 7 320	Nicolas, 2017
Winnipeg, Canada	0,01 – 190	Ferguson et collab., 2005
Salar d'Atacama, Chili	5 000 – 100 000	Munk et collab., 2016
Comté de Carlow, Irlande	23 ± 20	Kavanagh et collab., 2017
Clayton Valley, Nevada, États-Unis	407 000	Munk et collab., 2016

Lieu de prélèvement	Teneurs en lithium	Références
Glace (µg/l)		
Vallées sèches de McMurdo, Antarctique	0,10 – 0,25	Witherow et collab., 2010
Compost (mg/kg)		
Danemark	4,64 – 4,69	Kjølholt et collab., 2003
Eau de lixiviation de décharge municipale (µg/l)		
Danemark	0,2 – 367	Kjølholt et collab., 2003
Effluents municipaux (µg/l)		
Danemark	11,4 – 21,2	Kjølholt et collab., 2003
Boues d'épuration (mg/kg)		
Danemark	5,02 – 6,06	Kjølholt et collab., 2003
Cheminées d'incinérateurs municipaux (µg/m³)		
Danemark	1 – ≤ 9,1	Kjølholt et collab., 2003

3. Potentiel de bioaccumulation

3.1. Microorganismes

Parmi la littérature consultée, une seule étude a porté sur la bioaccumulation du lithium chez les microorganismes. Tsuruta (2005) a mesuré les teneurs accumulées dans 70 souches de 63 différentes espèces (20 bactéries, 18 actinomycètes, 18 champignons et 14 levures). Les microorganismes sélectionnés étaient mis en suspension, pendant une heure, dans une solution (pH 6) contenant 3 g/l de lithium sous forme de LiCl. Les bactéries gram-positives *Arthrobacter nicotianae* (1,0 mg/g) et *Brevibacterium helvovolum* (0,7 mg/g) ont démontré l'accumulation la plus élevée, en raison de la présence d'acides teichoïques dans leur paroi cellulaire. L'accumulation par les bactéries gram-positives était d'ailleurs supérieure à celle des actinomycètes, bactéries gram-négatives, champignons et levures (tableau 3). Un suivi cinétique a montré que la quantité de lithium accumulée par *A. nicotianae* augmentait rapidement pendant les cinq premières minutes suivant l'apport en métal. L'accumulation était influencée par le pH, celle-ci étant maximale à pH = 6 et diminuant lorsque l'acidité augmentait en dessous de pH = 5.

Tableau 3 – Accumulations en lithium dans différents types de microorganismes exposés une heure à pH = 6

Type de microorganismes	Espèce	Accumulation en Li	
		µmol/g	mg/g
Bactérie Gram -	<i>Acinetobacter calcoaceticus</i>	52,3	0,42
	<i>Enterobacter aerogenes</i>	48,7	0,39
	<i>Erwinia herbicola</i>	29,5	0,23
	<i>Escherichia coli</i>	2,9 – 16	0,02 – 0,13
	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	10,2	0,08
	<i>Pseudomonas aureofaciens</i>	24,3	0,19
	<i>Pseudomonas fluorescens</i>	11,8	0,09
	<i>Pseudomonas maltophilia</i>	26,1	0,21
	<i>Pseudomonas putida</i>	26,1	0,21
	<i>Pseudomonas saccharophila</i>	25,1	0,20
	<i>Pseudomonas vesicularis</i>	17,6	0,14
	<i>Serratia marcescens</i>	9,1	0,07
Bactérie Gram +	<i>Arthrobacter nicotianae</i>	125,8	1,00
	<i>Bacillus licheniformis</i>	56,5	0,45
	<i>Bacillus megaterium</i>	82,7	0,66
	<i>Bacillus subtilis</i>	65,8 – 74,6	0,52 – 0,59
	<i>Brevibacterium helovolum</i>	98,1	0,78

Type de microorganismes	Espèce	Accumulation en Li	
		µmol/g	mg/g
Actinomycètes	<i>Streptomyces albus</i>	55,6	0,44
	<i>Streptomyces aurantiocogriceus</i>	15,6	0,12
	<i>Streptomyces cinereoruber</i>	28,0	0,22
	<i>Streptomyces cinnamonensis</i>	15,4	0,12
	<i>Streptomyces diastaticus</i>	12,6	0,10
	<i>Streptomyces echinatus</i>	45,9	0,36
	<i>Streptomyces fradiae</i>	17,6	0,14
	<i>Streptomyces griseoflavus</i>	40,8	0,32
	<i>Streptomyces griseolus</i>	18,7	0,15
	<i>Streptomyces hiroshimensis</i>	27,8	0,22
	<i>Streptomyces levoris</i>	43,8	0,35
	<i>Streptomyces lilacinofulvus</i>	18,3	0,15
	<i>Streptomyces olivaceus</i>	73,9	0,59
	<i>Streptomyces phaeochromogenes</i>	5,7	0,05
	<i>Streptomyces salmonicida</i>	23,4	0,19
	<i>Streptomyces scabies</i>	22,0	0,17
	<i>Streptomyces viridochromogenes</i>	9,8 – 25,1	0,08 – 0,2
Champignons	<i>Aspergillus niger</i>	0 – 0,7	0 – 0,006
	<i>Aspergillus oryzae</i>	4,5	0,04
	<i>Chaetomium globosum</i>	0,4 – 4,6	0,003 – 0,4
	<i>Fusarium oxysporum</i>	5,9	0,05
	<i>Giberella fujikuroi</i>	0,1	0,00
	<i>Mucor hiemalis</i>	1,9	0,02
	<i>Mucor javanicus</i>	3,1	0,02
	<i>Neurospora sitophila</i>	3,9	0,03
	<i>Penicillium chrysogenum</i>	7,1	0,06
	<i>Penicillium janthinellum</i>	3,4	0,03
	<i>Penicillium lilacinum</i>	0,1	0,00
	<i>Rhizopus arrhizus</i>	0	0,00
	<i>Rhizopus japonicus</i>	0,7	0,01

Type de microorganismes	Espèce	Accumulation en Li	
		µmol/g	mg/g
Champignons	<i>Rhizopus oryzae</i>	0,9	0,01
	<i>Trichoderma viride</i>	3,6	0,03
Levures	<i>Candida krusei</i>	9,9	0,08
	<i>Candida robusta</i>	11,9	0,09
	<i>Candida utilis</i>	0,3	0,00
	<i>Cryptococcus albidus</i>	8,5	0,07
	<i>Cryptococcus laurentii</i>	0,6	0,00
	<i>Debaryomyces hansenii</i>	4,6	0,04
	<i>Endomycopsis fibuligera</i>	5,7	0,05
	<i>Hansenula anomala</i>	0,2	0,00
	<i>Hansenula saturnus</i>	5,3	0,04
	<i>Kluyveromyces marxianus</i>	3,9	0,03
	<i>Pichia farinosa</i>	10,4	0,08
	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	2,5	0,02
	<i>Saccharomyces uvarumia</i>	15,6	0,12
	<i>Torulopsis aeria</i>	0,9	0,01

Source : Tsuruta, 2005.

3.2. Plantes terrestres

Plusieurs études ont documenté la bioaccumulation du lithium chez les plantes terrestres. Elles sont présentées dans les paragraphes suivants.

Puisque le lithium possède des propriétés physicochimiques semblables à celles des autres métaux alcalins, notamment le Na et le K, il peut être absorbé par les mêmes processus d'absorption que ceux utilisés pour ces éléments (Shahzad et collab., 2016). Ces processus d'absorption et de transport sont essentiellement passifs, mais des transports actifs peuvent avoir lieu d'un compartiment cellulaire à l'autre ou d'un organe à un autre. Ceux-ci incluent le passage à travers la membrane plasmique interne, où le lithium est activement pompé par de nombreuses pompes à protéines vers le xylème (voie apoplastique; Elektorowicz et Keropian, 2015). La mobilité dans le phloème (voie symplastique) est limitée. Ainsi, le lithium est habituellement absorbé par le système racinaire des plantes exposées, avant d'être rapidement transporté dans l'ensemble des tissus (Rehab et Wallace, 1978; Franzaring et collab., 2016).

Une fois dans les cellules végétales, le lithium est distribué dans trois principaux compartiments : la paroi cellulaire, le cytoplasme et la vacuole (Badot, 1993). Qiao et ses collaborateurs (2018), qui ont réalisé une étude évaluant la distribution cellulaire du Li chez l'espèce *Apocynum venetum* cultivée dans une solution nutritive (pH = 6,0) pendant 28 jours, ont montré que de 45,5 à 72,7 % du Li était situé dans la vacuole, alors qu'un pourcentage variant de 14,8 à 29,0 % se retrouvait dans la paroi cellulaire. Les accumulations

étaient moindres dans le plaste (4,5 – 12,5 %), le noyau (4,2 – 9,6 %) et la mitochondrie (1,7 – 4,5 %). Ces résultats montrent que les pompes ioniques présentes dans la membrane plasmique et dans le tonoplaste³ tendent à faire sortir cet élément du cytoplasme en direction de l'apoplaste⁴ et de la vacuole. Ce mécanisme de défense permettrait ainsi de protéger la fraction cellulaire de la toxicité de ce métal.

Lorsqu'aucun apport exogène de lithium n'est effectué, les plantes présentent des teneurs relativement faibles en cet élément (tableaux 5 et 6). Par exemple, aucune trace de lithium n'a été détectée dans les tissus de haricots (*Phaseolus vulgaris*) cultivés dans une solution nutritive dépourvue de cet élément (Wallace et collab., 1977). Borovik-Romanova (1965), qui a analysé 138 plantes poussant dans huit types de sol, a constaté que les plantes ont généralement une teneur en lithium moyenne de 0,15 à 0,3 mg/kg.

En présence de lithium, l'accumulation dans les tissus végétaux varie en fonction des espèces (tableau 7). Les concentrations de lithium rapportées dans les produits de consommation varient de 0,01 mg/kg dans les bananes à 55 mg/kg dans l'avoine (Saeidnia et Abdollahi, 2013). Les teneurs en Li des plantes de la famille des Solanacées sont comprises entre 0,01 et 31 mg/kg (Kabata-Pendias et Pendias, 1992). L'analyse de 680 plantes de 68 familles démontre qu'en moyenne, les teneurs accumulées dans les dicotylédones (1,3 mg/kg) sont supérieures à celles dans les monocotylédones (0,85 mg/kg; Bertrand, 1952, 1959). Les plantes halophytes, à savoir celles adaptées aux milieux salés, peuvent accumuler de trois à six fois plus de Li que les autres plantes (Schrauzer, 2002). L'analyse de plantes indigènes des bassins arides de l'ouest des États-Unis démontre que celles-ci absorbent beaucoup plus de lithium que les plantes indigènes des zones humides (Cannon et collab., 1975). Cela peut représenter des teneurs variant entre 99,6 et 226,4 mg/kg chez le cirse des champs (*Cirsium arvense*) et le scirpe-jonc (*Holoschoenus vulgaris*). Par conséquent, l'accumulation dans les végétaux est étroitement liée à la tolérance de chaque espèce au sodium.

La teneur en lithium des plantes indigènes est également dépendante de celles retrouvées dans les sols dans lesquels elles sont enracinées, que le lithium soit présent directement dans les sols ou ajouté par l'eau d'irrigation. L'accumulation dans des radis (*Raphanus sativus*), du cresson officinal (*Nasturtium officinale*) et de la laitue (*Lactuca sativa*) exposés à environ 140 mg/l de LiNO₃ dans une solution nutritive Hoagland à pH = 5 pendant 30 jours était plus de 50 fois supérieure à celle en présence de 7 mg/l (Magalhães et collab., 1990). Des niveaux de 3 292 et de 695 mg/kg, respectivement, ont été mesurés dans des pousses de tournesol (*Helianthus annuus*) et de maïs (*Zea mays*) exposées dans une solution nutritive de Hoagland (pH = 6) contenant 50 mg/l sous forme de LiCl pendant 14 jours (Hawrylak-Nowak et collab., 2012). Chez ces deux mêmes espèces, les accumulations étaient de 423 et 79 mg/kg en présence de 5 mg/l, et de 432 et 438 mg/kg en présence de 25 mg/l. Dans les parties aériennes de plants de laitues pommées (*Lactuca sativa* var. *capitata*), cultivés dans une solution nutritive pendant 21 jours, des teneurs de 1 607 et de 1 544 mg/kg ont été mesurées après une exposition à 50 mg/l sous forme de LiCl et de LiOH, respectivement (Kalinowska et collab., 2013). Les différences d'accumulation du Li n'étaient pas statistiquement significatives, ce qui indique que ce métal est disponible pour les plantes, qu'importe sa forme chimique. Cette conclusion est corroborée par l'étude menée par da Silva et ses collaborateurs (2019), où les auteurs n'ont observé aucune différence significative dans l'accumulation chez de la laitue exposée autant au Li₂SO₄ qu'au LiOH.

Les contenus en lithium sont en général plus élevés dans les tiges et les feuilles que dans les racines, alors que les accumulations dans les grains et les fruits sont peu significatives (Bradford, 1966; Kabata-Pendias et Pendias, 1992). Par exemple, chez le maïs, les parties aériennes absorbent de 0,4 à 15,6 fois plus de lithium que les racines, les accumulations étant plus importantes dans les tiges (Antonkiewicz et collab., 2017). Chez des plantules de haricots, cultivées 16 jours dans une solution nutritive contenant environ 20 mg/l de lithium sous forme de LiCl, les accumulations mesurées dans les feuilles étaient de 10 mg/kg et de 48 mg/kg dans les tiges (Wallace et collab., 1977). Tout comme l'accumulation, l'efficacité de la

³ Membrane qui sépare la vacuole du cytoplasme dans les cellules végétales.

⁴ Continuum extracellulaire formé par les parois pectocellulosiques et les espaces vides entre les cellules végétales.

translocation du lithium des racines aux parties aériennes est proportionnelle aux niveaux de Li retrouvés dans le milieu (Kalinowska et collab., 2013; Jiang et collab., 2014).

Les accumulations dans les tissus sont également influencées par l'âge de ceux-ci (Kent, 1941). Ainsi, dans les pousses de betteraves sauvages (*Beta vulgaris*), cultivées en serre pendant 55 jours dans une solution nutritive contenant de 1,75 à 56 mg/l, la concentration de Li augmentait avec l'âge des feuilles, les limbes étant plus concentrés en Li que les pétioles correspondants (Elsheikh et collab., 1971). Une accumulation supérieure dans les feuilles matures et plus âgées a également été observée chez le maïs, cultivé en solution nutritive pendant quatre semaines (Antonkiewicz et collab., 2017).

La prise en charge du lithium dépend de la profondeur des racines et du profil de distribution du lithium dans le sol. Les teneurs en lithium accumulées dans les feuilles de différentes espèces d'agrumes et de légumes poussant dans la vallée du Jourdain, en Palestine, variaient de 2 à 27 mg/kg, avec des concentrations de Li soluble de 0,95 à 1,04 mg/l mesurées dans la couche arable (0 – 20 cm) et de 1,06 à 2,68 mg/l dans le sous-sol (20 – 40 cm; Ammari et collab., 2011). Une étude réalisée chez l'orge commune (*Hordeum sativum*) et chez *Vicia faba* montre que l'absorption du Li par les racines des deux espèces était plus importante lorsque le Li était retrouvé à une profondeur de 0 à 10 cm (Martin et collab., 1982). Celle-ci diminuait avec la profondeur, de sorte qu'à 63 cm, l'absorption ne représentait que 1 % de celle de 0 à 10 cm.

Les paramètres physicochimiques du sol influencent également la biodisponibilité, l'absorption et l'accumulation de Li dans les plantes.

- Le Li soluble dans le sol étant facilement disponible pour les plantes, le taux d'absorption de ce métal est régulé respectivement par la fraction soluble et extractible et par l'humidité du sol. L'augmentation de la conductivité électrique du sol (EC) et de la présence de chlorures limite la capacité de la plante à absorber le Li retrouvé en solution dans le sol.
- Il semble y avoir une plus grande absorption du lithium par les plantes poussant dans des sols acides (Anderson, 1990; Schrauzer, 2002; Elektorowicz et Keropian, 2015). Par exemple, dans des études réalisées en serre, Aldrich et ses collaborateurs (1951) ont mesuré des concentrations croissantes de Li dans des feuilles de citron avec une diminution du pH du sol. Cela pourrait s'expliquer par le fait que :
 - Le sodium et le potassium jouent un rôle important dans l'absorption du lithium par les organismes vivants. Dans la mesure où ces éléments conditionnent le pH, les changements qui concernent ce paramètre modifieront l'équilibre Na-K, et donc l'absorption du lithium par les plantes (Figuroa et collab., 2012);
 - À pH plus faible, il y a une charge de surface négative réduite, ce qui entraîne une diminution des sites de liaison disponibles pour les cations;
 - L'acidité du sol augmente la solubilité des éléments métalliques plus lourds tels que le fer, le nickel, le cobalt, le manganèse et le cuivre et, dans une certaine mesure, l'aluminium, le plomb et le cadmium. Deux études ayant démontré que les concentrations de lithium dans les plantes sont significativement corrélées avec les concentrations de ces éléments (Aral et Vecchio-Sadus 2008; Robinson et collab., 2018), l'augmentation de leur solubilité a pour conséquence d'augmenter la prise en charge du lithium par les plantes.
- Le lithium a une capacité élevée à remplacer d'autres cations (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} et Ca^{2+}) dans les organismes vivants, en raison de son rayon ionique faible et de sa force de polarisation élevée (Shahzad et collab., 2017). La présence de calcium provoque une diminution de l'absorption du lithium par le système racinaire (Kabata-Pendias et Pendias, 1992). Cela pourrait s'expliquer par le fait que le lithium présente une affinité semblable à celle du calcium pour les sites impliqués dans les transports actifs d'ions (Badot, 1993). Dans le cas du potassium, le lithium n'est pas facilement absorbé lorsque celui-ci est absent de la solution nutritive (Elsheikh et collab., 1971; Hara et collab., 1977). Cela peut s'expliquer par le fait que ces deux éléments utiliseraient les mêmes transporteurs (Kabata-Pendias et Mukherjee, 2007).

- L'ajout de certains acides, représentatifs de ceux potentiellement utilisés par l'industrie minière, peut également influencer la prise en charge du lithium chez les plantes. Après 40 jours d'exposition, Kavanagh et ses collaborateurs (2018b) ont démontré que l'accumulation de lithium, amendé dans un sol sous forme de LiCl jusqu'à 1 000 mg/kg, était plus élevée chez trois espèces (*Brassica napus*, *Brassica oleracea* et *Helianthus annuus*) en présence d'EDTA (acide éthylènediaminetétraacétique) et d'EDDS (acide éthylènediamine-N, N'-disuccinique; tableau 4).

Tableau 4 – Accumulations en lithium, en mg/kg, chez trois espèces végétales exposées au LiCl seul ou en présence d'EDTA et d'EDDS

Espèce	Traitement	Concentration moyenne accumulée	Concentration maximale
<i>Brassica napus</i>	Lithium seul	11,3 ± 3,9	17,5
	Lithium + EDTA	1 849 ± 914	3 577
	Lithium + EDDS	1 461 ± 301	2 590
Chou commun (<i>Brassica oleracea</i>)	Lithium seul	1 496 ± 691	1 456
	Lithium + EDTA	1 830 ± 625	1 830
	Lithium + EDDS	1 739 ± 878	3 091
Tournesol (<i>Helianthus annuus</i>)	Lithium seul	601 ± 354	1 875
	Lithium + EDTA	1 081 ± 609	1 926
	Lithium + EDDS	889 ± 554	773

Source : Kavanagh et collab., 2018b.

Tableau 5 – Concentrations en Li, telles que rapportées dans la littérature, chez des plantes poussant en milieu naturel

Nom latin	Nom commun	Lieu de prélèvement	Concentration en lithium (mg/kg)	Référence
<i>Allenrolfea occidentalis</i>	-	Hongrie	3 000	Tölgyesi, 1983
<i>Allium cepa</i>	Oignon	Vallée d'Azapa, Chili	3,8 – 4,0	Figuerola et collab., 2013
		États-Unis	0,2	Robinson et collab., 1971
		Communauté indienne Pima, Mexique	4,6	National Research Council, 1974
<i>Allium cepa</i> var. <i>aggregatum</i>	Oignon vert	Vallée du Jourdain, Palestine	1,8	Ammari et collab., 2011
		Vallée d'Azapa, Chili	1,9 – 2,3	Figuerola et collab., 2013
<i>Allium sativum</i>	Ail	Vallée de Camarones, Chili	3,3 – 4,5	Figuerola et collab., 2013
<i>Achnatherum splendens</i>	-	Fukang, Chine	0,18 ± 0,11	Jiang et collab., 2014
		Fuhai, Chine	0,17 ± 0,06	
<i>Apocynum venetum</i>	-	Wushihe, Chine	12,9 ± 1,3	Jiang et collab., 2014
		Jimunai, Chine	33,7 ± 5,7	
		Buerjin, Chine	11,4 ± 1,3	
		Fuhai, Chine	10,0 ± 0,7	
		Fukang, Chine	17,3 ± 2,0	
<i>Artemisia songarica</i>	-	Fuhai, Chine	0,15 ± 0,04	Jiang et collab., 2014
<i>Beta vulgaris</i>	Betterave	Vallée d'Azapa, Chili	1,6 – 1,7	Figuerola et collab., 2013
		États-Unis	0,02	Robinson et collab., 1971
<i>Beta vulgaris</i> subsp. <i>vulgaris</i>	Bette à carde	Vallée de Camarones, Chili	8,3 – 201,4	Figuerola et collab., 2013
		Vallée d'Azapa, Chili	35,3 – 38,1	

Nom latin	Nom commun	Lieu de prélèvement	Concentration en lithium (mg/kg)	Référence
<i>Brassica oleracea var. capitata</i>	Chou	Vallée du Jourdain, Palestine	1,2	Ammari et collab., 2011
		Vallée de Camarones, Chili	3,5 – 3,8	Figueroa et collab., 2013
		Vallée d'Azapa, Chili	3,2 – 3,8	Figueroa et collab., 2013
		États-Unis	0,093	Robinson et collab., 1971
		Communauté indienne Pima, Mexique	1,4	National Research Council, 1974
<i>Camellia sinensis</i>	Thé	Union soviétique	1,2	Borovik-Romanova, 1965
<i>Capparis</i> sp.	Câpre	Union soviétique	3,6	Borovik-Romanova, 1965
<i>Capsicum annum</i>	Poivron	Vallée d'Azapa, Chili	2 – 2,2	Figueroa et collab., 2013
<i>Centaurea jacea</i>	Centaurée jacée	Allemagne	0,37	Franzaring et collab., 2016
<i>Cirsium arvense</i>	Cirse des champs	Allemagne	0,09	Franzaring et collab., 2016
<i>Cucumis sativus</i>	Concombre	Vallée d'Azapa, Chili	5,1 – 5,4	Figueroa et collab., 2013
<i>Cucurbita pepo</i>	Zucchini	Vallée d'Azapa, Chili	7,1	Figueroa et collab., 2013
<i>Daucus carota subsp. sativus</i>	Carotte	États-Unis	0,01	Robinson et collab., 1971
<i>Deyeuxia</i> sp.	-	Altiplano, Bolivie	6 – 29	Figueroa et collab., 2013
<i>Distichlis spicata</i>	-	Hongrie	1 000	Tölgyesi, 1983
<i>Echium vulgare</i>	Vipérine commune	Allemagne	0,23	Franzaring et collab., 2016
<i>Glycyrrhiza inflata</i>	-	Jimunai, Chine	1,0 ± 0,2	Jiang et collab., 2014
		Buerjin, Chine	0,5 ± 0,2	
<i>Gossypium hirsutum</i>	Coton	États-Unis	0,23	Robinson et collab., 1971
		Union soviétique	2,3	Borovik-Romanova, 1965
<i>Hypericum perforatum</i>	Millepertuis perforé	Allemagne	0,3	Franzaring et collab., 2016

Nom latin	Nom commun	Lieu de prélèvement	Concentration en lithium (mg/kg)	Référence
<i>Ipomoea batatas</i>	Patate douce	Vallée d'Azapa, Chili	20,2	Figuerola et collab., 2013
<i>Juncus cooperi</i>	-	Hongrie	3 000	Tölgyesi, 1983
<i>Kalidium foliatum</i>	-	Wushihe, Chine	0,2 ± 0,1	Jiang et collab., 2014
<i>Karelinia caspica</i>	-	Wushihe, Chine	1,1 ± 0,2	Jiang et collab., 2014
		Jimunai, Chine	3,5 ± 0,1	
		Buerjin, Chine	0,9 ± 0,1	
		Fukang, Chine	1,2 ± 0,2	
<i>Lactuca sativa</i>	Laitue	Vallée du Jourdain, Palestine	0,3 – 0,6	Ammari et collab., 2011
		Vallée de Camarones, Chili	3,2 – 68,6	Figuerola et collab., 2013
		Vallée d'Azapa, Chili	4,7 – 6,0	Figuerola et collab., 2013
		Brésil	4,2	Magalhães et collab., 1990
<i>Lycium barbarum</i>	Baie de Goji	Communauté indienne Pima, Mexique	160	National Research Council, 1974
		Hongrie	1 120	Tölgyesi, 1983
<i>Malus sp.</i>	Pomme	États-Unis	0,02	Robinson et collab., 1971
<i>Medicago sativa</i>	Luzerne cultivée	Vallée de Camarones, Chili	32,3 – 62,8	Figuerola et collab., 2013
		Vallée d'Azapa, Chili	10,8 – 10,9	Figuerola et collab., 2013
		États-Unis	0,014 – 0,14	Robinson et collab., 1971
<i>Nasturtium officinale</i>	Cresson officinal	Brésil	6,6	Magalhães et collab., 1990
<i>Nicotiana tabacum</i>	Tabac commun	États-Unis	0,4	Robinson et collab., 1971
		Communauté indienne Pima, Mexique	31	National Research Council, 1974
<i>Oxichloe aff. Bisexualis sp.</i>	-	Altiplano, Bolivie	17 – 46	Figuerola et collab., 2013

Nom latin	Nom commun	Lieu de prélèvement	Concentration en lithium (mg/kg)	Référence
<i>Patosia clandestine</i> sp.	-	Altiplano, Bolivie	15 – 36	Figueroa et collab., 2013
<i>Petroselinum crispum</i>	Persil	Vallée de Camarones, Chili	5,2 – 76,7	Figueroa et collab., 2013
		Vallée d'Azapa, Chili	11,7 – 13,2	Figueroa et collab., 2013
<i>Phleum pratense</i>	Fléole des prés	États-Unis	0,07 – 0,28	Robinson et collab., 1971
<i>Phragmites australis</i>	Roseau commun	Jimunai, Chine	0,2 ± 0,1	Jiang et collab., 2014
		Fukang, Chine	0,07 ± 0,02	
<i>Plantago lanceolata</i>	Plantain lancéolé	Allemagne	1,1	Franzaring et collab., 2016
<i>Ranunculus sardous</i>	Herbe de Sardaigne	Allemagne	2,2	Franzaring et collab., 2016
<i>Raphanus sativus</i>	Radis	Communauté indienne Pima, Mexique	2,7	National Research Council, 1974
		Brésil	4,7	Magalhães et collab., 1990
<i>Rumex acetosa</i>	Oseille commune	Allemagne	0,2	Franzaring et collab., 2016
<i>Rumex obtusifolius</i>	Patience à feuilles obtuses	Allemagne	0,5	Franzaring et collab., 2016
<i>Saccharum</i> sp.	Canne à sucre	Union soviétique	4,4	Borovik-Romanova, 1965
<i>Solanum lycopersicum</i>	Tomate	Vallée d'Azapa, Chili	6,9 – 12,0	Figueroa et collab., 2013
		Union soviétique	0,4	Borovik-Romanova, 1965
<i>Solanum tuberosum</i>	Pomme de terre	États-Unis	0,01	Robinson et collab., 1971
<i>Solidago canadensis</i>	Verge d'or du Canada	Allemagne	0,2	Franzaring et collab., 2016
<i>Sorghum bicolor</i>	Sorgo commun	Communauté indienne Pima, Mexique	≤ 1,2 – 2,2	National Research Council, 1974
<i>Spinacea oleracea</i>	Épinard	Vallée du Jourdain, Palestine	4,6	Ammari et collab., 2011
<i>Tanacetum vulgare</i>	Tanaisie commune	Allemagne	1,1	Franzaring et collab., 2016

Nom latin	Nom commun	Lieu de prélèvement	Concentration en lithium (mg/kg)	Référence
<i>Teucrium scorodonia</i>	Germandrée scorodoine	Allemagne	0,2	Franzaring et collab., 2016
<i>Trifolium</i> sp.	Trèfle	États-Unis	0,02 – 0,23	Robinson et collab., 1971
<i>Triticum</i> sp.	Blé	Communauté indienne Pima, Mexique	≤ 0,4	National Research Council, 1974
<i>Urtica dioica</i>	Grande ortie	Allemagne	1,0	Franzaring et collab., 2016
<i>Vitis vinifera</i>	Vigne	Allemagne	0,05	Franzaring et collab., 2016
<i>Zea mays</i>	Maïs	Vallée de Lluta, Chili	1,0 – 19,3	Figuroa et collab., 2013
		Communauté indienne Pima, Mexique	1,5	National Research Council, 1974

Tableau 6 – Concentrations en Li, telles que rapportées dans la littérature, dans certains tissus végétaux poussant en milieu naturel

Nom latin	Nom commun	Lieu de prélèvement	Partie échantillonnée	Teneurs en Li (mg/kg)	Référence
<i>Chenopodium quinoa</i>	Quinoa	Altiplano, Bolivie	Grains	60 – 90	Figuroa et collab., 2013
			Feuilles	50 – 80	
			Tiges	10 – 30	
			Coque des grains	20 – 70	
<i>Phaseolus vulgaris</i>	Haricot	États-Unis	Fruits	0,1	Robinson et collab., 1971
		Communauté indienne Pima, Mexique		0,6 – 3,1	National Research Council, 1974
<i>Pinus densiflora</i>	Pin rouge du Japon	Arboretum Lisičine, Croatie	Aiguilles	≤ 0,03	Cindric et collab., 2019
<i>Pinus nigra</i>	Pin noir			0,4 ± 0,2	
<i>Pinus sylvestris</i>	Pin sylvestre			3,6 ± 1,9	

Nom latin	Nom commun	Lieu de prélèvement	Partie échantillonnée	Teneurs en Li (mg/kg)	Référence
<i>Pinus thunbergiana</i>	Pin noir du Japon	Arboretum Lisičine, Croatie	Aiguilles	0,2 ± 0,1	Cindric et collab., 2019
<i>Pisum sativum</i>	Pois cultivé	États-Unis	Fruits	0,2	Robinson et collab., 1971

Tableau 7 – Accumulations, en mg/kg, dans les tissus de plantes exposées à différentes teneurs en lithium

Milieu d'exposition	Feuilles	Tiges	Racines	Fruits	Référence
Apocynum venetum					
50	900	300	-	-	Jiang et collab., 2014
200	1 800	950			
15	15,6	28,5	37,2	-	Jiang et collab., 2019
25	30,82	62,76	73,98		
Brassica napus					
0	6,2	-	-	-	Kavanagh et collab., 2018b
20	7,8				
50	7,7				
100	10,5				
150	11,6				
200	15,9				
300	8,5				
400	13,6				
500	14,1				
1 000	17,5				

Milieu d'exposition	Feuilles	Tiges	Racines	Fruits	Référence
Cardamine hirsute (<i>Cardamine hirsuta</i>)					
0	27	-	-	-	Kavanagh et collab., 2018b
20	819				
50	1 066				
100	1 229				
150	1 831				
200	2 216				
300	3 340				
400	3 500				
500	3 559				
1 000	4 221				
Chou commun (<i>Brassica oleracea</i>)					
0	181	-	-	-	Kavanagh et collab., 2018b
20	1 42				
50	971				
100	1 184				
150	1 416				
200	1 372				
300	1 161				
400	1 252				
500	1 456				
1 000	1 496				

Milieu d'exposition	Feuilles	Tiges	Racines	Fruits	Référence
Coton mexicain (<i>Gossypium hirsutum</i>)					
0	1	0	-	-	Wallace et collab., 1977
25	587	65			
50	1 120	184			
100	2 385	1 634			
100 + ajout de CaCO ₃	1 498	781			
25	373,5	50	-	-	Rehab et Wallace, 1978
50	432	390,8			
100	1 947	1 627			
Cotonnier créole (<i>Gossypium barbadense</i>)					
25	369,5	98,7	-	-	Rehab et Wallace, 1978
50	720	223,8			
100	1 847	2 525			
Cresson officinal (<i>Nasturtium officinale</i>)					
7	37	-	-	-	Magalhães et collab., 1990
70	775				
140	1 216				
Haricot (<i>Phaseolus vulgaris</i>)					
0	0	0	0	-	Wallace et collab., 1977
35	19	48	24		
70	49	117	50		
140	112	170	57		

Milieu d'exposition	Feuilles	Tiges	Racines	Fruits	Référence
Haricot (<i>Phaseolus vulgaris</i>)					
140 + ajout de CaCO ₃	78	150	65	-	Wallace et collab., 1977
350	295	516	126		
350 + ajout de CaCO ₃	247	479	113		
0	1,3	-	-	-	Bingham et collab., 1964
5	72				
10	166				
20	510				
Laitue (<i>Lactuca sativa</i>)					
7	11	-	-	-	Magalhães et collab., 1990
70	277				
140	508				
Maïs (<i>Zea mays</i>),					
0	0	0	0	0	Antonkiewicz et collab., 2017
1	5,56	7,85	92,7	0	
2	12,5	20,1	178	0	
4	27,2	40,6	402	0	
8	55	99,1	730	3,98	

Milieu d'exposition	Feuilles	Tiges	Racines	Fruits	Référence
Maïs (<i>Zea mays</i>),					
16	111	114	1 211	3,44	Antonkiewicz et collab., 2017
32	408	356	1 733	30,8	
64	870	939	1 979	99,8	
128	1 769	2 099	2 201	-	
256	2 019	2 963	2 534	-	
Moutarde brune (<i>Brassica juncea</i>)					
988 ± 328	319 ± 44	84 ± 5	5 ± 1	-	Elektorowicz et Keropian, 2015
Orange amère (<i>Citrus × aurantium</i>)					
0	1,5	-	-	-	Bingham et collab., 1964
2	10				
4	245				
6	300				
Radis (<i>Raphanus sativus</i>)					
7	17	-	-	-	Magalhães et collab., 1990
70	840				
140	1 008				
Ray-grass anglais (<i>Lolium perenne</i>)					
48,8 ± 11,1	1,4 ± 0,6	-	-	-	Robinson et collab., 2018
24,9 ± 4,3	1,2 ± 0,2				
24,3 ± 4,4	1,8 ± 0,7				
21,6 ± 2,7	1,8 ± 0,6				

Milieu d'exposition	Feuilles	Tiges	Racines	Fruits	Référence
Ray-grass anglais (<i>Lolium perenne</i>)					
11,7 ± 2,6	1,7 ± 0,6	-	-	-	Robinson et collab., 2018
10,9 ± 3,2	0,9 ± 0,6				
Tomate (<i>Solanum lycopersicum</i>)					
0	5	-	-	-	Bingham et collab., 1964
5	219				
10	316				
20	1 692				
0	2,1	-	-	-	Kavanagh et collab., 2018b
20	11,3				
50	16,9				
100	21,3				
150	28,9				
200	31,8				
300	32,6				
400	35,2				
500	29				
1 000	64,5				

Milieu d'exposition	Feuilles	Tiges	Racines	Fruits	Référence
Tournesol (<i>Helianthus annuus</i>)					
0	22	-	-	-	Kavanagh et collab., 2018b
20	400				
50	388				
100	428				
150	551				
200	773				
300	732				
400	604				
500	733				
1 000	1 385				

3.3. Invertébrés terrestres

Il n'existe pas, à notre connaissance, d'information sur le potentiel de bioaccumulation du lithium dans les invertébrés terrestres.

3.4. Amphibiens et reptiles

Aucune étude portant sur le potentiel de bioaccumulation du lithium sur les amphibiens et les reptiles n'a été répertoriée dans la littérature.

3.5. Oiseaux

La littérature consultée ne rapporte aucune étude évaluant le potentiel de bioaccumulation du lithium chez la faune aviaire.

3.6. Mammifères

À la suite de son ingestion par voie orale, le lithium peut être absorbé par le tractus gastro-intestinal (Aral et Vecchio-Sadus, 2008). Des études *in vitro* sur l'absorption du lithium par la muqueuse intestinale suggèrent que le transport de ce métal est un processus de diffusion passive via l'épithélium de l'intestin grêle (Davie, 1991). De par sa perméabilité presque égale à celle du sodium, le lithium pénètre à l'intérieur des cellules à travers les canaux sodiques (Szkłarska et Rzymiski, 2019). L'excrétion du lithium se fait principalement par les reins, environ 80 % du lithium étant absorbé par le tubule rénal proximal et 20 % excrété dans l'urine. La quantité résiduelle est distribuée dans l'organisme, majoritairement dans les os, les glandes endocrines (thyroïde, hypophyse et surrénales) et le cerveau (Birch et Philips, 1992). Les concentrations de lithium dans le cerveau sont généralement semblables à celles mesurées dans le plasma. Les concentrations dans le sang sont maximales environ 30 minutes suivant l'ingestion orale, et cela est suivi d'un plateau de 12 à 24 heures (Morrison et collab., 1971).

Deux études, dont une réalisée en milieu naturel au Chili, ont démontré que ce métal peut également se retrouver dans les muscles (tableau 8). Les accumulations en lithium dans les cochons d'Inde et les bovins étaient supérieures (99,3 et 86,8 mg/kg) à celles mesurées chez l'alpaga et le lama (10,2 et 14,4 mg/kg). Aucune détection n'a cependant été mesurée chez l'agneau d'Esquina (Figuerola et collab., 2013).

Tableau 8 – Distribution en Li dans différents tissus de mammifères

Nom latin	Nom commun	Tissus	Type d'exposition	Concentration en Li (mg/kg)	Référence
<i>Vicugna pacos</i>	Alpaga	Muscles	Exposition naturelle au Chili	10,2	Figuerola et collab., 2013
<i>Cavia porcellus</i>	Cochon d'Inde			99,3	
<i>Lama glama</i>	Lama			14,4	
<i>Ovis aries</i>	Agneau			nd	

Nom latin	Nom commun	Tissus	Type d'exposition	Concentration en Li (mg/kg)	Référence
<i>Bos taurus</i>	Bovin	Muscles	Exposition expérimentale par voie orale à 700 mg/kg de LiCl	86,8	Johnson et collab., 1980
		Cœur		79,3	
		Foie		68,7	
		Reins		67,1	
		Cerveau		51,8	

4. Potentiel toxique

4.1. Microorganismes

Les études disponibles, réalisées en laboratoire, laissent présager que les microorganismes sont tolérants au lithium. Par exemple, il a été démontré que *Micrococcus varians* ssp. *halophilus*, une bactérie halophile modérée, peut croître à des concentrations allant jusqu'à 63,6 g/kg de LiCl pendant cinq jours (Kamekura et Onishi, 1982). Cette tolérance est également observée dans la nature d'après deux études qui ont évalué la diversité des microorganismes peuplant les saumures concentrées en lithium en Amérique du Sud. Haferburg et ses collaborateurs (2017) ont examiné la diversité microbienne des saumures naturellement riches en lithium du salar d'Uyuni, en Bolivie (salinité ≤ 356 g/l), signalant la présence d'une communauté d'archées comprenant 26 genres halobactériens, dont *Halapricum*, *Halorubellus* et *Salinarchaeum*. Cubillos et ses collaborateurs (2018) ont étudié la diversité et la composition des archées et des bactéries présentes dans les saumures naturelles (salinité de 34,7 %) et celles concentrées (salinité de 55,6 %, dominée par le chlorure de lithium), du salar d'Atacama, au Chili. La richesse bactérienne était trois fois plus élevée dans les saumures concentrées que dans les saumures naturelles, mais la diversité bactérienne était similaire dans les deux saumures. Les auteurs suggèrent que les concentrations élevées de lithium dans les saumures concentrées pourraient grandement moduler la diversité microbienne et donner un aperçu de la biologie adaptative des microorganismes nécessaires pour faire face à des concentrations extrêmement élevées de sels. Le lithium trouvé dans les saumures concentrées pourrait agir comme un agent stressant de la diversité microbienne, en sélectionnant les microorganismes tolérants au lithium. L'accumulation extracellulaire de lithium peut également être une stratégie adoptée par les microorganismes pour survivre dans ces conditions. Cette hypothèse est corroborée par l'étude de Tsuruta (2005), qui a montré que les bactéries gram-positives sont capables d'accumuler des quantités plus élevées de lithium que les bactéries gram-négatives, les champignons et les levures.

Sous forme de nanoparticules, Avila-Arias et ses collaborateurs (2019) ont démontré que les oxydes de lithium (nanoLi_2O) affectent autant la fonction que la structure des communautés microbiennes du sol. Ainsi, sur une période de 60 jours, un sol naturel ($18,7 \pm 4,2$ % de sable, $47,3 \pm 4,6$ % de limon, $34,0 \pm 3,5$ % d'argile, $[\text{MO}] = 4,1 \pm 0,5$ %, $\text{pH} = 6,2 \pm 0,3$) exposé à une concentration de $474 \mu\text{g/g}$ d'oxyde de lithium libérait significativement plus de CO_2 , de N_2O et de CH_4 qu'un sol témoin. À cette même concentration, l'activité de la β -glucosidase était diminuée, tandis que l'activité de l'uréase avait augmenté. Ces variations pourraient s'expliquer par des modifications dans la structure des communautés microbiennes du sol (archéennes, bactériennes et eucaryotes), où des hausses significatives de la diversité ont été observées aux trois concentrations testées (4, 52 et $478 \mu\text{g/g}$), sauf pour les bactéries et les archées exposées respectivement à la plus faible concentration et à la concentration moyenne de nanoLi_2O , où aucun changement n'a été mesuré. Les effets des nanoparticules de Li_2O étaient indépendants de la taille des particules (particules de $41,4 \pm 10,2$ nm, $45,0 \pm 10,1$ nm et $63,9 \pm 16,9$ nm).

D'après les études consultées, les composés du lithium ne seraient ni clastogènes (c.-à-d., capables de provoquer la rupture des chromosomes) ni mutagènes (c.-à-d., capables de provoquer des mutations). En effet, des résultats négatifs ont été obtenus lors du test d'Ames, avec et sans activation métabolique, réalisé sur *Escherichia coli* et *Salmonella typhimurium*, en présence de carbonate de lithium (Rim et Kim, 2014). Aucun effet mutagène n'a été observé à une concentration de $2,12$ g/kg de LiCl chez la bactérie *Bacillus aluminium* (Nishioka, 1975). Il en est de même chez *Bacillus subtilis* exposé jusqu'à une concentration de 424 g/kg de LiCl (Kanematsu et collab., 1980), chez *Herpetomonas samuelpeessoai* en présence jusqu'à $8,5$ g/kg de LiCl (Oliveira et collab., 1997), ainsi que chez *Salmonella typhimurium* ($7,1$ mg/kg par plaque) et *Escherichia coli* ($2,1$ mg/kg par plaque) exposés à du citrate de trilithium ($\text{C}_6\text{H}_5\text{Li}_3\text{O}_7$; King et collab., 1979).

4.2. Plantes terrestres

Les études évaluant la toxicité du lithium chez les végétaux ont démontré que ce métal interfère avec de nombreux processus physiologiques. Parmi ceux affectés figurent la morphogenèse, le géotropisme, le

rythme circadien et les mouvements foliaires et stomatiques. Le lithium exerce aussi des effets à l'échelle cellulaire, où il interfère, entre autres, avec la mitose, le vieillissement cellulaire et la synthèse protéique (Badot, 1993; Hawrylak-Nowak et collab., 2012; Shahzad et collab., 2017). Une modification de ces paramètres pourrait entraîner des conséquences importantes sur la plante, en altérant sa germination, sa biomasse et sa croissance. Les principales études évaluant ces effets chez les végétaux sont résumées dans les paragraphes suivants, ainsi que dans le tableau 9.

Bien que le lithium ne soit pas un élément essentiel pour les organismes vivants, sa présence peut stimuler la croissance chez les plantes (Schrauzer, 2002; Aral et Vecchio-Sadus, 2008; Shahzad et collab., 2016). En effet, de faibles teneurs en lithium stimuleraient la croissance et augmenteraient les rendements des plantes cultivées, alors qu'à des concentrations plus élevées, le lithium peut exercer un effet toxique chez celles-ci (Badot, 1993). Par exemple, une stimulation de la croissance a été observée chez l'avoine (*Avena sativa*) exposé entre 42 et 420 mg/kg de LiCl, alors qu'une inhibition est rencontrée à des concentrations de l'ordre de 4 à 42 g/kg (Thimann et Schneider, 1938). Des résultats similaires ont été obtenus chez le concombre (*Cucumis sativus*; Purves, 1966) et le haricot (*Phaseolus vulgaris*; McStay et collab., 1980). La biomasse des pousses de tournesol (*Helianthus annuus*) et de maïs (*Zea mays*), exposées à 5 mg/l sous forme de LiCl dans une solution nutritive de Hoagland (pH = 6) pendant 14 jours, était augmentée de 15 et de 32 % respectivement, alors qu'à une concentration plus élevée, à savoir 50 mg/l, la biomasse des pousses pour les deux espèces était réduite de 27 et 32 % (Hawrylak-Nowak et collab., 2012). L'application foliaire jusqu'à 22 mg/l de deux formes chimiques de lithium chez la laitue (*Lactuca sativa*) a pour sa part engendré une augmentation du poids sec des racines de 31 % pour le LiOH et de 16,8 % pour le Li₂SO₄ (da Silva et collab., 2019). La surface spécifique des feuilles a également augmenté (18 % en présence de LiOH et 13 % en présence de Li₂SO₄), tout comme le diamètre des tiges (6 % chez les plantes exposées au Li₂SO₄). Tous ces paramètres ont montré une baisse significative à une exposition plus élevée de 40 mg/l.

D'autres études ont démontré une diminution du rendement des espèces végétales à la suite d'une exposition au lithium, et ce, qu'importe la forme initialement ajoutée. Voelcker (1912) a constaté que tout sel de lithium était stimulant pour le blé en quantités inférieures à 20 mg/kg, mais qu'il était toxique en quantités supérieures à 30 mg/kg dans le sol. Les pourcentages de germination des graines d'*Apocynum venetum* exposées dans une solution nutritive à 8,5 g/l de LiCl pendant 15 jours étaient plus élevés (53 %) que les graines exposées à 11,1 g/l de Li₂CO₃ (97 %; Jiang et collab., 2018a). Une perte de masse de 40 % par rapport aux plantes témoins (CE₄₀) a été rapportée chez la betterave (*Beta vulgaris*) exposée dans une solution nutritive à 1,75 mg/l de LiSO₄ pendant 55 jours (Elsheikh et collab., 1971). À des concentrations de 128 et 256 mg/l sous forme de LiCl, des plants de maïs exposés pendant quatre semaines dans une solution nutritive étaient plus petits et avaient des tiges plus minces et plus courtes que les plants témoins (Antonkiewicz et collab., 2017). Les plants exposés à de faibles concentrations en solution (1 - 64 mg/l) étaient bien développés et disposaient de tiges épaisses. À la plus forte concentration d'exposition (256 mg/l), le rendement des tiges était d'environ 10 % comparativement à celui du témoin, celui des feuilles de 29 % et celui des racines d'environ 33 %. Des effets encore plus marqués ont été observés dans les inflorescences, où à des concentrations de 128 et 256 mg/l, le maïs n'a pas développé ces organes. Une baisse significative du rendement des inflorescences était observée dès une concentration en solution de 4 mg/l de LiCl. Les effets se traduisaient généralement par un dessèchement des feuilles. Ces résultats démontrent également que les plantes seraient plus sensibles à l'apport d'eau contaminée par du lithium qu'au lithium retrouvé directement dans le sol.

La toxicité du lithium chez les plantes varie en fonction de la sensibilité des espèces (Schrauzer, 2002). Bingham et ses collaborateurs (1964) ont démontré que, parmi 11 espèces cultivées, l'avocat, l'orange amère et le soja sont les moins tolérants, leur croissance étant réduite de plus de 25 % (CE₂₅) par des concentrations en lithium dans le sol inférieures à 10 mg/kg. Le même effet est observé à une teneur de 10 mg/kg pour le raisin, la tomate et le haricot rouge, alors que le maïs, les graminées, la betterave et le coton sont plus tolérants, des concentrations supérieures à 20 mg/kg étant nécessaires pour obtenir la même réduction de croissance. Les classes de tolérance rapportées par Bingham et ses collaborateurs (1964) correspondent étroitement à la tolérance des plantes au sodium. Par conséquent, les plantes connues pour être facilement affectées par de faibles quantités de sodium (ex. : arbres à feuilles caduques, agrumes, avocats, haricots rouges) sont plus sensibles au lithium, tandis que les betteraves, le

coton, le maïs, la luzerne, l'orge, le riz et d'autres cultures tolérant le sodium seraient relativement tolérants à ce métal.

Des accumulations élevées de Li peuvent entraîner des réductions significatives du rendement des plantes exposées. Hara et ses collaborateurs (1977) rapportent une décroissance de 50 % de la masse sèche de feuilles de chou lorsqu'elles contiennent 700 mg/kg de lithium. Aldrich et ses collaborateurs (1951) ont observé l'apparition de chloroses sur les feuilles d'espèces poussant dans un verger d'agrumes à des concentrations de 1 à 4 mg/kg de tissus frais. Des concentrations d'environ 200 mg/kg dans les feuilles ont entraîné une réduction significative du poids des haricots (*Phaseolus vulgaris*), tandis que le coton (*Gossypium hirsutum*) a toléré une concentration foliaire de 587 mg/kg (Wallace et collab., 1977). Ces résultats suggèrent que la toxicité du Li chez les plantes est liée à une forte accumulation de cet élément dans les tissus des racines et des pousses.

Dans une étude en serre exposant du radis à 140 mg/l de LiNO_3 dans une solution nutritive Hoagland (pH = 5) pendant 30 jours, la teneur en potassium dans les parties aériennes et les racines a statistiquement diminué, tout comme les niveaux de Ca (Magalhães et collab., 1990). Ce résultat peut s'expliquer par le fait qu'à l'intérieur de la cellule, le lithium accumulé dans les plantes interagit avec les ions sodium et potassium, ainsi qu'avec les enzymes nécessitant du magnésium. En effet, comme les ions de tous les métaux alcalins, y compris le lithium, sont échangés plus de 1 000 fois plus rapidement que le Mg^{2+} (la constante de cinétique de perte d'une molécule d'eau, k_w , est de l'ordre de $10^5/\text{s}$ pour le Mg^{2+} et de $10^8/\text{s}$ pour le Li^+ ; Helm et Merbach, 1999), cela pourrait expliquer pourquoi le lithium affecte préférentiellement l'activité des enzymes contenant le Mg^{2+} (Birch, 1976).

Des études ont également démontré que le lithium entraîne des conditions d'oxydation et de peroxydation des lipides dans les plantes, en raison d'une production plus élevée d'espèces réactives de l'oxygène (DRO) :

- Les niveaux de peroxydation lipidique des membranes cellulaires des feuilles de tournesol et des racines de maïs ont augmenté de manière significative de 68 et de 32 % en présence de 50 mg/l de lithium, sous forme de LiCl, dans une solution nutritive de Hoagland (pH = 6), pendant 14 jours (Hawrylak-Nowak et collab., 2012). Ce résultat, médié par la production de mélanaldéhyde (MDA), suggère des perturbations de l'intégrité de la membrane des organes affectés, ainsi que des propriétés pro-oxydantes de l'ion Li^+ .
- L' α -amylase est un indicateur de l'efficacité catalytique de l'hydrolyse de l'amidon en sucre. Des concentrations de 1 000 mg/l sous forme de LiCl ou de 740 mg/l sous forme de Li_2CO_3 n'ont pas affecté l'activité de l' α -amylase pendant la germination d'*Apocynum venetum* exposé pendant 15 jours (Jiang et collab., 2018a). Par contre, des concentrations plus élevées ont affecté son activité, ainsi que les teneurs en MDA, en sucre soluble et en proline, en particulier pendant les stades moyen et tardif de la germination. Les graines exposées pendant la germination ont accumulé des concentrations élevées de sucre soluble et de proline, ce qui met en évidence une acclimatation de l'espèce par rapport au lithium. Cela augmente l'accumulation des solutés organiques sous forme osmotique, ce qui permet de diminuer la toxicité induite par le Li.
- L'acide L-ascorbique, ou vitamine C, forme un autre système de défense antioxydant non enzymatique en mesure de piéger les DRO. Cependant, bien qu'une tendance à la baisse de 10 à 13 % de la teneur en acide L-ascorbique ait été observée dans les feuilles de la laitue pommée (*Lactuca sativa* var. *capitata*), à la suite d'une exposition de 21 jours à 100 mg Li/l, sous forme de LiCl ou de LiOH, cette différence n'était pas significativement différente du témoin (Kalinowska et collab., 2013). Ces auteurs concluent donc que la toxicité du Li chez les plantes n'est pas liée aux perturbations de l'accumulation de l'acide L-ascorbique dans les tissus foliaires, comme cela peut être le cas chez d'autres espèces.

Le stress oxydatif induit par le lithium peut endommager les pigments photosynthétiques des plantes exposées et, ainsi, réduire leur activité photosynthétique. L'effet phytotoxique du lithium peut alors être mis en évidence sur les feuilles (signes de chloroses, nécroses, brunissement) et les racines (épaississement et raccourcissement de la racine principale, changement de couleur). À titre d'exemples :

- Des diminutions significatives par rapport au témoin des teneurs en chlorophylle *a* (30 et 78 %), en chlorophylle *b* (24 et 77 %) et en caroténoïdes (32 et 77 %) ont été observées chez *Apocynum pictum* lorsque cultivé dans un sol (pH = 8,47; MO = 0,92 %) contenant 200 et 400 mg/kg de LiCl (Jiang et collab., 2018b). Les teneurs en ces pigments photosynthétiques n'étaient pas altérées en présence de 50 mg/kg.
- Après deux semaines de croissance en présence de 630 mg/kg de lithium sous forme de LiCl, l'Arabette des dames (*Arabidopsis thaliana*) a présenté des altérations visibles, et ce, dès le début de l'exposition. Celles-ci allaient d'un léger jaunissement (chlorose) à l'extrémité des feuilles à la première semaine à une nécrose importante à la troisième semaine (Martinez et collab., 2018).
- Les plants de la même espèce exposés à 6,94 mg/kg de LiCl pendant sept jours ont présenté une chlorose et un rabougrissement, qui étaient plus évidents dans les feuilles les plus âgées (Duff et collab., 2014). Cette réponse au lithium était associée à une expression élevée des gènes de réponse au stress, qui pourrait conduire à la consommation de réserves d'énergie métaboliques et transcriptionnelles et à l'affectation de plus de ressources au développement cellulaire.
- Naranjo et ses collaborateurs (2003) ont aussi observé la formation de lésions nécrotiques et d'enroulements des feuilles chez des plants de tabac exposés à 345 mg/kg de LiCl. Ces altérations, qui étaient plus évidentes chez les feuilles plus âgées, résultaient d'une accumulation préférentielle de Li⁺ dans ces feuilles.
- L'ajout de lithium jusqu'à une concentration de 50 mg/l sous forme de LiCl dans une solution nutritive de Hoagland (pH = 6) n'avait pas d'influence après 14 jours sur les teneurs en chlorophylle *a* et *b* dans le tournesol, alors que les teneurs en caroténoïdes étaient réduites de 16 % à une concentration de 25 mg/l (Hawrylak-Nowak et collab., 2012). Le maïs a montré une réduction des teneurs en chlorophylle *a* et *b* d'environ 45 % et des teneurs en caroténoïdes de 67 % à concentration de 50 mg/l (Hawrylak-Nowak et collab., 2012). Ces diminutions étaient accompagnées de l'apparition de nécroses chez les feuilles des plants exposés.
- L'exposition de semis de chou éthiopien (*Brassica carinata*), dans une solution nutritive à pH 5,7 pendant 10 jours à des concentrations supérieures à 200 mg/l de LiCl, s'est traduite par une réduction de la teneur en chlorophylle, ainsi qu'en la régulation à la hausse des gènes impliqués dans le métabolisme (primaire, secondaire et lipidique), le cytochrome P450, le glutathion S-transférase (GST) et le transport (Li et collab., 2009). Ces profils d'expression génique sont liés à la détoxification et au transport des métaux.
- Chez des plants d'agrumes cultivés en champ, des nécroses foliaires et des défoliations ont été observées sous l'effet du lithium retrouvé dans l'eau d'irrigation (Haas, 1929). Des symptômes identiques ont été observés en serre sur des plantules soumises pendant 6 mois à l'addition de LiSO₄ dans le sol atteignant des teneurs de 2 à 5 ppm (Aldrich et collab., 1951). L'intensité de la défoliation était proportionnelle à la concentration du lithium dans le milieu. Le développement des régions nécrotiques pourrait être lié à la dégradation de la teneur en chlorophylle des feuilles.

Le lithium agit également sur les mouvements des stomates. Une concentration de plus de 4 mg/kg de lithium, sous forme de LiNO₃, a entraîné la fermeture des stomates du haricot (*Phaseolus vulgaris*) exposé sur une période de 12 jours (McStay et collab., 1980). Chez le géranium (*Pelargonium x hortorum*), à des concentrations équivalentes, le lithium provoque aussi une importante réduction du degré d'ouverture des stomates (Louguet et Thellier, 1976). Les résultats de ces études laissent présager que le lithium peut interférer avec la gestion du contenu en eau de la plante. Cette hypothèse est appuyée par l'étude de Magalhães et ses collaborateurs (1990), où une réduction du poids sec des racines et des feuilles de radis et de cresson officinal sous l'effet du Li s'est traduite par une réduction de la rétention d'eau dans les tissus.

Le modèle le plus scientifiquement accepté pour expliquer l'action du lithium chez les organismes vivants, y compris les plantes, est l'hypothèse d'épuisement de l'inositol (Bueso et collab., 2007; Naranjo et collab., 2003; Martinez et collab., 2018). Cette hypothèse, illustrée à la figure 4, est basée sur l'inhibition des monophosphatases de l'inositol par les ions Li⁺, entraînant un épuisement des niveaux d'inositol cellulaire, ainsi qu'une inhibition du cycle de l'inositol et des voies de signalisation dépendantes du calcium (Hawrylak-

Nowak et collab., 2012; Shahzad et collab., 2016; Naranjo et collab., 2003). Ces effets néfastes peuvent être contrés par l'ajout de CaCO_3 dans un sol, le calcium étant reconnu pour prévenir la toxicité et l'absorption de minéraux plus légers, tels que le lithium (Wallace et collab., 1977; Schrauzer, 2002; Ammari et collab., 2011). L'hypothèse de l'épuisement de l'inositol chez les plantes est renforcée par les observations de Bueso et ses collaborateurs (2007). Ceux-ci proposent que la toxicité du Li^+ chez les végétaux, notamment l'arabette des dames, soit due à une production accrue d'éthylène. Le mécanisme d'induction de la biosynthèse de l'éthylène par le lithium reste en grande partie inconnu, mais l'inhibition de l'inositol monophosphatase et la diminution concomitante de l'inositol et du calcium cellulaires ont été proposées comme signaux déclenchant l'induction des gènes de l'acide 1-aminocyclopropane-1-carboxylique (ACC), responsable de l'augmentation de la production d'éthylène. La tolérance au lithium pourrait donc résulter à la fois d'une insensibilité à l'éthylène inhibiteur induit par ce cation et d'une capacité réduite de production d'éthylène. L'insensibilité à l'éthylène peut engendrer un nombre réduit de racines secondaires, car un facteur de transcription favorisant le développement des racines latérales est activé par l'éthylène.

En plus des plantes, l'effet de la présence du lithium a été étudié chez les champignons. La présence de lithium jusqu'à 500 mg/kg sous forme de LiCl dans le milieu de culture du pleurote en huître (*Pleurotus ostreatus*) n'a pas affecté sa croissance mycélienne sur une période de 60 jours (de Assunção et collab., 2012). La croissance, la biomasse, l'apparence et la composition de la pholiote du peuplier (*Agrocybe cylindracea*) et de l'hydne hérisson (*Hericium erinaceus*), cultivés sur des substrats contenant 40 mg/l de Li sous forme de chlorure ou 65 mg/l sous forme d'acétate, n'ont pas été affectées (Rzymiski et collab., 2017). Le fait que la croissance n'a pas été réduite par la présence de différentes concentrations de LiCl, de LiNO₃ ou de C₂H₃LiO₂ peut indiquer : (a) une résistance ou une tolérance des champignons au lithium; ou (b) que la quantité de lithium ajoutée au substrat n'était pas suffisante pour provoquer une inhibition ou un effet toxique pour le champignon.

4.3. Invertébrés terrestres

Quelques études ont cherché à évaluer la toxicité du lithium sur les invertébrés terrestres. Celles-ci sont résumées dans le tableau 10 et dans les paragraphes suivants.

Une mortalité a été observée chez le ver de terre *Eisenia fetida* exposé sept semaines à 70 mg/kg de LiCl (Aral et Vecchio-Sadus, 2008). L'exposition au LiCl et au Li₂CO₃ du nématode *Caenorhabditis elegans* a entraîné une diminution de la croissance, de la maturation et de la reproduction (Inokuchi et collab., 2015). Les concentrations minimales avec effet observé (CMEO) pour la croissance, la maturation et la reproduction étaient respectivement de 53, 13,3 et 424 mg/l pour le LiCl et de 55,4, 55,4 et 221,7 mg/l pour le Li₂CO₃. La croissance et la maturation ont été inhibées de manière significative à des concentrations de Li inférieures à celles engendrant une létalité. Une approche écotoxicogénomique, utilisant l'analyse de puces à ADN, a également été mise en place pour étudier les impacts de ces deux sels de lithium sur les fonctions physiologiques chez *C. elegans*. Les gènes examinés n'ont pas été régulés à la hausse. En revanche, l'exposition à 3,3 mg/l de LiCl a régulé à la baisse l'expression de 36 gènes du cytochrome P450, 16 du transporteur ABC, 10 de la glutathion S-transférase, 16 du métabolisme des lipides et 2 de la vitellogénine. L'exposition à 27,7 mg/l de Li₂CO₃ a régulé à la baisse l'expression de 11 gènes du cytochrome P450, 13 du transporteur ABC, 13 du métabolisme lipidique et 1 de la vitellogénine. Les gènes régulés à la baisse sont principalement impliqués dans la détoxification des contaminants et le transport de composés cytotoxiques.

Finalement, aucun effet mutagène n'a été observé chez la drosophile *Drosophila melanogaster* exposée pendant 72 heures à 140 mg/l de LiCl (King et collab., 1979).

4.4. Amphibiens et reptiles

Aucune étude évaluant la survie, la croissance et la reproduction des reptiles en présence de lithium n'a été répertoriée dans la littérature consultée. Seule une étude portant sur la clairance rénale, soit la mesure physiologique évaluant l'excrétion d'une ou de plusieurs substances filtrées, réabsorbées, voire excrétées par le rein, a été réalisée chez quatre espèces de lézards (*Eremias multiocellata*, *Lacerta vivipara*, *Trapelus sanguinolentus* et *Teratoscincus scincus*; Fleishman et collab., 1997). Celle-ci a montré que chez les organismes bien hydratés, le lithium est facilement excrété par les reins. Une partie du lithium peut cependant être absorbée en cas de déshydratation.

Chez les amphibiens, les études sur la toxicité du Li ont principalement porté sur ses effets au stade du développement embryonnaire (Backstrom, 1954; Hall, 1942; Bustuoabad et collab., 1977; Busa et Gimlich, 1989). Une microcéphalie induite a été observée chez des embryons de grenouilles (*Rana pipiens*, *Rana catesbeiana*, *Rana sylvatica* et *Rana clamitans*) et de salamandres (*Ambystoma tigrinum* et *Ambystoma punctatum*), exposés à un mélange de différents sels de lithium en solution (Hall, 1942). La toxicité variait avec l'addition de CaCl₂ et de K₃PO₄, ainsi qu'avec le remplacement du LiCl par du Li₂SO₄ dans le mélange. Des effets délétères sur le développement ont également été rapportés chez des embryons de *Xenopus laevis* exposés au LiCl (Pekmezekmek et collab., 2020; Boga et collab., 2000; Hedgepeth et collab., 1997; Breckenridge et collab., 1987). C'est notamment le cas en présence de 0,02 g/l pendant 96 heures, où les malformations ont mené à la mort de 75 % des embryons exposés (Pekmezekmek et collab., 2020). L'ajout d'inositol empêche le développement de ces malformations (Drummond, 1987). Lazou et Beis (1993) ont démontré que le Li affecte les protéines membranaires des embryons de la grenouille rieuse (*Rana ridibunda*), à la suite d'une exposition de huit minutes à une concentration de 12 g/l de LiCl. Or, les altérations des protéines de la membrane plasmique peuvent affecter les interactions cellule-cellule et, ainsi, perturber les mouvements morphogénétiques qui se produisent pendant la gastrulation, soit la seconde phase de développement embryonnaire.

4.5. Oiseaux

Quelques recherches ont cherché à déterminer le potentiel toxique du lithium chez différentes espèces aviaires. Deux études ont évalué la toxicité aiguë du LiCl chez des poussins. Comparativement au groupe

témoin, un poids corporel inférieur et des pattes plus courtes ont été observés chez des embryons de poulet exposés à 6 mg de LiCl (Szeleszczuk et collab., 2004). L'administration de 30 mg a provoqué la mort des embryons dans les 72 à 168 heures suivant l'injection, alors que la même dose a engendré la mort de poussins âgés d'une journée après 12 à 24 heures (Szeleszczuk et collab., 2004). Dans une étude similaire, une dose de 32 g/l de LiCl provoquait un ralentissement de la croissance et un taux de survie plus faible chez les embryons de poulet exposés (Ikonomova et collab., 2000). Les autres études répertoriées ont été réalisées avec des composés qui ne sont pas représentatifs des formes présentes naturellement dans l'environnement, l'hypochlorite de lithium étant utilisé comme agent désinfectant et le lithium perfluorooctane sulfonate comme pesticide. Les données répertoriées sont néanmoins résumées dans le tableau 11, à titre indicatif.

4.6. Mammifères

Chez les mammifères, le principal organe cible du lithium est le système nerveux central (Aral et Vecchio-Sadus, 2008). Par conséquent, les sels de lithium, en particulier le carbonate (Li_2CO_3) et l'acétate de lithium (LiCH_3COO), sont des molécules de choix depuis plus de 50 ans dans le traitement du trouble bipolaire. Ils gagnent également en popularité comme option pharmacologique dans le traitement d'autres troubles psychiatriques. Les données qui sont par conséquent disponibles pour ce métal ont été essentiellement acquises dans le cadre de la recherche médicale.

Bien que largement étudiés, les mécanismes par lesquels le lithium peut provoquer des changements d'humeur chez l'humain sont encore mal compris. Il est reconnu que ce métal joue un rôle dans de nombreux processus biochimiques, tels que l'activité enzymatique et hormonale, l'activité des canaux et la production d'énergie dans l'organisme vivant (Phiel et Klein, 2001; Jiang et collab., 2019). Il est possible que l'action du Li dans les cellules soit basée sur la compétition avec les ions Na^+ et Mg^{2+} , du fait de la similarité de leur rayon atomique (Szkłarska et Rzymiski, 2019). Le lithium interfère avec les échanges sodiques transmembranaires dans les cellules nerveuses en affectant l'adénosine triphosphatase (Na^+ , K^+ -ATPase) stimulée par le sodium et le potassium. Il modifie la libération de neurotransmetteurs, ce qui affecte les concentrations d'adénosine monophosphate cyclique (cAMP) et bloque le métabolisme de l'inositol. Cela entraîne un appauvrissement de l'inositol cellulaire, une inhibition de la transduction du signal médiée par la phospholipase C et, par conséquent, une inhibition de l'excitation neuronale, ce qui pourrait expliquer les effets bénéfiques du lithium en tant que stabilisateur de l'humeur (Kerr et collab., 2018). Il est également postulé que la clé de l'effet thérapeutique du Li réside dans l'inhibition des enzymes qui régulent les processus intracellulaires de ces mêmes ions (Na^+ et Mg^{2+}) et participent à des voies de transmission nerveuses spécifiques, résultant en la synthèse et la libération de neurotransmetteurs, tels que la noradrénaline, la sérotonine et la dopamine, dans la membrane et l'ensemble du métabolisme cellulaire (Balter et Vigier, 2014). L'action du Li sur l'humeur peut aussi être liée à l'augmentation de l'activité de la monoamine oxydase (MOA), qui est déprimée en cas de carence en Li, ainsi qu'à l'augmentation du transport du folate et de la vitamine B12 dans les cellules en présence de ce métal (Schrauzer, 2002). Puisque la vitamine B12 et le folate affectent également les paramètres associés à l'humeur, la stimulation du transport de ces vitamines dans les cellules du cerveau peut être citée comme un autre mécanisme provoquant des actions antidépressives à la suite de l'ingestion de Li. Finalement, il est suggéré que le Li peut affecter les facteurs transcriptionnels et post-transcriptionnels via la protéine kinase (Manji et Lenox, 1994).

Chez l'humain, un apport quotidien recommandé de 14,3 mg/kg de lithium pour un adulte a été suggéré pour les patients atteints de trouble bipolaire. À des concentrations moindres, telles que celles retrouvées dans l'environnement, un certain nombre d'observations suggèrent que le lithium peut exercer des effets bénéfiques sur la santé, en entraînant notamment une diminution du taux de suicide et des niveaux de violence (Szkłarska et Rzymiski, 2019). À des concentrations supérieures, des effets néfastes peuvent par contre être observés. Des exemples d'effets rapportés dans la littérature chez des mammifères exposés en laboratoire sont résumés dans les paragraphes suivants.

Du fait de leur rôle épurateur, le foie et les reins sont les principaux organes d'exposition aux effets toxiques de nombreux métaux, y compris le lithium. Une atteinte hépatique se traduisant par une dégénérescence

des hépatocytes, une nécrose hépatique et une diminution des taux sériques des enzymes alanine aminotransférase (ALT) et aspartate aminotransférase (AST) a été observée chez des rats Wistar exposés, par l'eau de boisson, à 15 et 30 mg/kg/jour de LiCl_2 , pendant sept semaines (Ahmad et collab., 2011). Une diminution des niveaux de glutathion (GSH) et une stimulation de la peroxydation lipidique (LPO) ont également été observées au niveau des globules rouges des organismes exposés. Les effets observés étaient dépendants de la dose d'exposition. Le Li_2CO_3 , administré par la nourriture à forte dose (1,1 g/kg/jour) chez le rat pendant une période maximale de quatre mois, est aussi à l'origine d'une hépatotoxicité qui se manifeste par une augmentation de l'activité des transaminases et des phosphatases alcalines, une vacuolisation et une hypertrophie des hépatocytes (Chadha et collab., 2008). Des effets hépatiques et rénaux (nécroses des tubules rénaux, épaississement de la paroi capsulaire du glomérule rénal, diminution des taux sériques des enzymes hépatiques) ont également été observés chez des rats exposés sept semaines par gavage à 20 mg/kg/jour de LiNO_3 (Sharma et Iqbal, 2005). Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus lors de nombreuses autres études réalisées chez des rats exposés à de fortes doses à différentes formes de lithium (Tandon et collab., 1998; Chmielnicka et Nasiadek, 2003; Nciri et collab., 2009; Toplan et collab., 2016).

Selon les protocoles d'étude utilisés et les formes chimiques administrées, l'exposition au lithium par voie orale peut provoquer des changements significatifs sur le poids corporel des mammifères chez les mammifères exposés. L'injection de 80 mg/kg/jour de Li_2CO_3 a engendré une prise de poids marquée après 15 jours de traitement chez des souris (Nciri et collab., 2009). Une diminution significative du poids corporel a été observée chez des rats exposés 30 jours à 2 g/l de Li_2CO_3 dans l'eau de boisson (Toplan et collab., 2016). Il en est de même chez des rats exposés par l'eau de boisson à 15 et 30 mg/kg/jour de LiCl pendant sept semaines (Ahmad et collab., 2011). Lors de cette étude, une diminution du poids de certains organes (reins, cœur, rate et testicules) a également été observée. La perte de poids était proportionnelle à la dose d'exposition. Le carbonate de lithium peut aussi occasionner une perte de tissus osseux. Une perte significative a par exemple été observée au niveau des tibias de rates exposées à 45 mg/kg/jour dans l'eau de boisson pendant trois mois (Lewicki et collab., 2006).

Quelques études ont également évalué la génotoxicité du lithium chez les mammifères. De façon générale, comme cela a été observé chez les microorganismes (cf. section 4.1), le lithium engendre peu de modifications au niveau de l'ADN lorsque présent à de faibles concentrations. Aucun effet mutagène n'a ainsi été observé chez la souris exposée par voie intrapéritonéale à 28 mg/kg de LiCl (Aral et Vecchio-Sadus, 2008). Par contre, de fortes concentrations de Li_2CO_3 (3 g/l) peuvent inhiber la synthèse de l'ADN dans les cellules de hamsters chinois V79 (Slameňová et collab., 1986). Des souris exposées à différentes formes de lithium (de 0,05 à 5 mg/kg d'acétate de lithium, de 1,2 à 120 mg/kg de carbonate de lithium et de 0,2 à 21,25 mg/kg de LiCl) ont montré des aberrations chromosomiques, mais pas d'échanges de chromatides sœurs dans les cellules de la moelle osseuse (Sobti et collab., 1989). Une dose de 325 à 1 300 mg/kg de poids corporel de Li_2CO_3 pendant 6 à 30 jours a également engendré des anomalies chromosomiques dans la moelle osseuse et les cellules testiculaires de souris (Srivastava et collab., 1986).

Dans un objectif d'extrapolation pour la santé humaine, des études portant sur les effets du lithium sur la reproduction des mammifères ont été réalisées. Celles-ci ont par conséquent principalement été effectuées sur des mammifères de laboratoire, tels que des souris et des rats, exposés à des molécules utilisées pour le traitement thérapeutique :

- Une diminution du nombre de portées et une augmentation du temps entre les portées ont été observées chez des souris ayant été exposées par l'eau de boisson à 2 g/l de LiCl , deux semaines avant l'accouplement et pendant la gestation (Mroccka et collab., 1983). Chez les petits, la mortalité était plus élevée que chez les témoins. La reproduction des souris était complètement inhibée à une concentration de 4 g/l (Mroccka et collab., 1983). L'exposition de rates par l'eau de boisson à 845 mg/l de LiCl n'a occasionné aucune malformation chez leur descendance (Trautner et collab., 1958). Une inhibition de la spermatogenèse a aussi été rencontrée chez des rats immatures ayant reçu par injection sous-cutanée 2 mg/kg/jour de LiCl pendant 21 jours (Ghosh et collab., 1991). Les auteurs ont conclu que le lithium avait un effet néfaste sur la fonction testiculaire, en réduisant les niveaux sériques de l'hormone folliculo-stimulante, de l'hormone lutéinisante, de la prolactine et de la testostérone. Une diminution de la biosynthèse des androgènes a également été observée.

- À la suite de l'exposition de rates gestantes par gavage jusqu'à 300 mg/kg/jour de Li_2CO_3 , aucun effet n'a été observé chez la mère et la progéniture (Gralla et McIlhenny, 1972). Des effets embryotoxiques (diminution du nombre d'implantations, augmentation du nombre de résorptions), fœtotoxiques (diminution de la taille des fœtus et de leur poids) et tératogènes (augmentation de l'incidence de côtes surnuméraires ou déformées, raccourcissement des os, ossification incomplète des sternèbres) ont été rapportés chez la descendance de rates, exposées par gavage à 100 mg/kg/jour de Li_2CO_3 , du 6^e au 15^e jour de gestation (Marathe et Thomas, 1986). Aucun de ces effets n'était observé lorsqu'elles étaient exposées à 50 mg/kg/jour.

Ces études démontrent que les effets néfastes observés sur le fœtus ne se produisent qu'à des niveaux toxiques pour la mère.

Bien que des effets néfastes sur différents systèmes aient été rapportés en présence de certaines formes de lithium, ces composés n'engendrent une mortalité des mammifères qu'à de très fortes concentrations d'exposition (tableau 12). Par exemple, chez des bovins ayant reçu par gavage 250, 500 ou 700 mg/kg de poids corporel sous forme de LiCl , la plus faible dose n'a engendré aucune mortalité, contrairement à la plus élevée, où tous les animaux sont décédés dans les 4 à 7 jours suivant l'exposition (Johnson et collab., 1980). Dans le groupe ayant reçu la dose intermédiaire (500 mg/kg), 75 % des bœufs sont morts dans les 7 à 11 jours. Les doses létales par voie orale pour 50 % (DL_{50}) des rats et des lapins exposés au LiCl étaient de 526 et 850 mg/kg, respectivement. Pour le LiCO_3 , les DL_{50} par voie orale pour le chien, le rat et la souris étaient de 500, 525 et 531 mg/kg (Smyth et collab., 1969; Stockinger, 1981). L'équilibre en sel semble être un élément déterminant dans la survie des organismes exposés au lithium. Avec un apport normal en sodium, des chiens ont survécu à des doses orales quotidiennes de 50 mg/kg de poids corporel de LiCl pendant les 150 jours de l'expérimentation, alors que la même dose était létale en 12 à 18 jours avec un faible apport en sodium (Radomski et collab., 1950).

Tableau 9 – Toxicité de différents composés de lithium sur les plantes terrestres

Composé	Organisme	Paramètre	Durée d'exposition	Valeur (mg/kg)	Référence
Sulfate de lithium (LiSO ₄)	Avocat (<i>Persea americana</i>)	CE ₂₅ (croissance)	2 mois	6	Bingham et collab., 1964
Sulfate de lithium (LiSO ₄)	Betterave (<i>Beta vulgaris</i>)	CE ₂₅ (croissance)	2 mois	35	Bingham et collab., 1964
		CE ₄₀ (croissance)	55 jours	1,75	Elsheikh et collab., 1971
Sulfate de lithium (LiSO ₄)	Coton mexicain (<i>Gossypium hirsutum</i>)	CE ₂₅ (croissance)	2 mois	25	Bingham et collab., 1964
		CSEO (rendement des feuilles)	5 semaines	50	Rehab et Wallace, 1978
		CMEO (diminution de 74 % du rendement des feuilles)		100	
		CSEO (rendement des tiges)		50	
		CMEO (diminution de 85 % du rendement des tiges)		100	
		CE ₁₀ (rendement des tiges)		82	
		CE ₂₀ (rendement des tiges)		84,6	
		CE ₄₀ (rendement des tiges)		88,6	
		CE ₁₀ (rendement des feuilles)		77,2	
		CE ₂₀ (rendement des feuilles)		81,4	
		CE ₄₀ (rendement des feuilles)		88	
Sulfate de lithium (LiSO ₄)	Cotonnier créole (<i>Gossypium barbadense</i>)	CSEO (rendement des feuilles)	5 semaines	50	Rehab et Wallace, 1978
		CMEO (diminution de 86,5 % du rendement des feuilles)		100	
		CSEO (rendement des tiges)		50	
		CMEO (diminution de 92 % du rendement des tiges)		100	

Composé	Organisme	Paramètre	Durée d'exposition	Valeur (mg/kg)	Référence
Sulfate de lithium (LiSO ₄)	Cotonnier créole (<i>Gossypium barbadense</i>)	CE ₁₀ (rendement des tiges)	5 semaines	50,4	Rehab et Wallace, 1978
		CE ₂₀ (rendement des tiges)		56	
		CE ₄₀ (rendement des tiges)		64,3	
		CE ₁₀ (rendement des feuilles)		53,1	
		CE ₂₀ (rendement des feuilles)		57,5	
		CE ₄₀ (rendement des feuilles)		65,9	
Sulfate de lithium (LiSO ₄)	Haricot (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	CE ₂₅ (croissance)	2 mois	12	Bingham et collab., 1964
Sulfate de lithium (LiSO ₄)	Herbe de Rhodes (<i>Chloris gayana</i>)	CE ₂₅ (croissance)	2 mois	65	Bingham et collab., 1964
Sulfate de lithium (LiSO ₄)	Laitue (<i>Lactuca sativa</i>)	CSEO (nombre de feuilles)	35 jours	40	Da Silva et collab., 2019
		CSEO (longueur de la tige)		40	
		CSEO (poids de la tige)		40	
		CSEO (surface foliaire)		30	
		CSEO (réduction de 19 % de la surface foliaire)		40	
		CSEO (croissance)		30	
		CSEO (réduction de 15 % de la croissance)		40	
		CSEO (diamètre de la tige)		40	
		CSEO (poids des feuilles)		30	
		CSEO (réduction de 24 % du poids des feuilles)		40	
		CE ₁₀ (poids des feuilles)		10	

Composé	Organisme	Paramètre	Durée d'exposition	Valeur (mg/kg)	Référence
Sulfate de lithium (LiSO ₄)	Laitue (<i>Lactuca sativa</i>)	CE ₂₀ (poids des feuilles)	35 jours	29,5	Da Silva et collab., 2019
		CSEO (poids des pousses)		30	
		CME0 (réduction de 15 % du poids des pousses)		40	
		CSEO (biomasse des racines)		40	
		CSEO (poids des racines)		30	
		CME0 (réduction de 22 % du poids des racines)		40	
Sulfate de lithium (LiSO ₄)	Maïs (<i>Zea mays</i>)	CE ₂₅ (croissance)	2 mois	70	Bingham et collab., 1964
Sulfate de lithium (LiSO ₄)	Orange amère (<i>Citrus × aurantium</i>)	CE ₂₅ (croissance)	2 mois	8	Bingham et collab., 1964
Sulfate de lithium (LiSO ₄)	Paspale dilaté (<i>Paspalum dilatatum</i>)	CE ₂₅ (croissance)	2 mois	25	Bingham et collab., 1964
Sulfate de lithium (LiSO ₄)	Raisin	CE ₂₅ (croissance)	2 mois	12	Bingham et collab., 1964
Sulfate de lithium (LiSO ₄)	Soja (<i>Glycine max</i>)	CE ₂₅ (croissance)	2 mois	7	Bingham et collab., 1964
Sulfate de lithium (LiSO ₄)	Tomate (<i>Solanum lycopersicum</i>)	CE ₂₅ (croissance)	2 mois	12	Bingham et collab., 1964
Chlorure de lithium (LiCl)	<i>Apocynum pictum</i>	CE ₅₀ (taux de germination)	15 jours	9 980	Jiang et collab., 2018b
		CE ₁₀₀ (taux de germination)		17 240	
		CME0 (taux de germination)		6 370	
		CSEO (taux de germination)		4 250	

Composé	Organisme	Paramètre	Durée d'exposition	Valeur (mg/kg)	Référence
Chlorure de lithium (LiCl)	<i>Apocynum pictum</i>	CSEO (poids sec des feuilles)	90 jours	50	Jiang et collab., 2018b
		CSEO (poids sec des tiges)		50	
		CSEO (poids sec des racines)		50	
		CMEO (réduction de 42,95 % du poids sec des feuilles)		200	
		CMEO (réduction de 45,34 % du poids sec des tiges)		200	
		CMEO (réduction de 40,41 % du poids sec des racines)		200	
		CE ₁₀ (poids sec des feuilles)		92,2	
		CE ₂₀ (poids sec des feuilles)		127,5	
		CE ₄₀ (poids sec des feuilles)		192	
		CE ₁₀ (poids sec des tiges)		80,5	
		CE ₂₀ (poids sec des tiges)		115,9	
		CE ₄₀ (poids sec des tiges)		185,8	
		CE ₁₀ (poids sec des racines)		78,4	
		CE ₂₀ (poids sec des racines)		120,4	
		CE ₄₀ (poids sec des racines)		211,3	
Chlorure de lithium (LiCl)	<i>Apocynum venetum</i>	CSEO (biomasse)	90 jours	50	Jiang et collab., 2014
		CMEO (biomasse)		200	
		CSEO (pigments photosynthétiques)		50	
		CMEO (pigments photosynthétiques)		200	

Composé	Organisme	Paramètre	Durée d'exposition	Valeur (mg/kg)	Référence
Chlorure de lithium (LiCl)	<i>Apocynum venetum</i>	CSEO (croissance)	90 jours	25	Jiang et collab., 2019
		CME0 (réduction de 53 % du taux de germination)	15 jours	8 500	Jiang et collab., 2018a
		CME0 (réduction de 96 % du taux de germination)		17 000	
		CE ₅₀ (taux de germination)		8 320	
		CSEO (taux de germination)		2 120	
Chlorure de lithium (LiCl)	<i>Arabidopsis thaliana</i>	CME0 (biomasse)	3 semaines	630	Martinez et collab., 2018
		CME0 (teneurs en chlorophylle)		630	
Chlorure de lithium (LiCl)	<i>Brassica napus</i>	CME0 (biomasse)	3 semaines	630	Martinez et collab., 2018
		CSEO (teneurs en chlorophylle)		630	
Chlorure de lithium (LiCl)	Chou commun (<i>Brassica oleracea</i>)	CSEO (survie)	4 mois	1 000	Kavanagh et collab., 2018b
Chlorure de lithium (LiCl)	Chou éthiopien (<i>Brassica carinata</i>)	CSEO (germination)	10 jours	200	Li et collab., 2009
		CSEO (croissance)		200	
		CE ₁₀₀ (germination)		800	
Chlorure de lithium (LiCl)	Haricot (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	CE ₅₀ (croissance)	10 jours	55	Franzaring et collab., 2016
		CE ₄₀ (croissance)		36,7	
		CE ₂₀ (croissance)		13,8	
		CE ₁₀ (croissance)		6,1	

Composé	Organisme	Paramètre	Durée d'exposition	Valeur (mg/kg)	Référence
Chlorure de lithium (LiCl)	Haricot (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	CE ₄₀ (biomasse)	21 jours	29	Wallace et collab., 1977
		CE ₂₀ (biomasse)		20,4	
		CE ₁₀ (biomasse)		15,5	
Chlorure de lithium (LiCl)	Hydne hérisson (<i>Hericium erinaceus</i>)	CSEO (biomasse)	Non précisée	40	Rzymiski et collab., 2017
Chlorure de lithium (LiCl)	Laitue pommée (<i>Lactuca sativa var. capitata</i>)	CE ₁₀₀ (croissance des pousses)	21 jours	100	Kalinowska et collab., 2013
		CME0 (réduction de 13 % du rendement des parties aériennes)		20	
		CME0 (réduction de 58 % de la biomasse des pousses)		50	
		CME0 (biomasse des racines)		50	
Chlorure de lithium (LiCl)	Maïs (<i>Zea mays</i>)	CME0 (biomasse)	3 semaines	630	Martinez et collab., 2018
		CSEO (teneurs en chlorophylle)		630	
		CE ₅₀ (croissance)	21 jours	118	Franzaring et collab., 2016
		CE ₄₀ (croissance)		78,7	
		CE ₂₀ (croissance)		29,5	
		CE ₁₀ (croissance)		13,1	
		CE ₅₀ (rendement des racines)	4 semaines	180	Antonkiewicz et collab., 2017
		CE ₅₀ (rendement des feuilles)		174	
		CE ₅₀ (rendement des tiges)		135	
		CE ₅₀ (rendement des inflorescences)		50	

Composé	Organisme	Paramètre	Durée d'exposition	Valeur (mg/kg)	Référence
Chlorure de lithium (LiCl)	Maïs (<i>Zea mays</i>)	CSEO (poids frais des racines)	14 jours	25	Hawrylak-Nowak et collab., 2012
		CMEO (réduction de 31 % du poids frais des racines)		50	
		CMEO (réduction de 32 % de la biomasse des pousses)		50	
		CMEO (réduction de 29 % de la surface foliaire)		25	
Chlorure de lithium (LiCl)	Pholiote du peuplier (<i>Agrocybe cylindracea</i>)	CSEO (biomasse)	Non précisée	40	Rzymski et collab., 2017
Chlorure de lithium (LiCl)	Pleurote en huître (<i>Pleurotus ostreatus</i>)	CSEO (croissance)	60 jours	500	De Assunção et collab., 2012
Chlorure de lithium (LiCl)	Sarrasin (<i>Fagopyrum esculentum</i>)	CE ₅₀ (croissance)	60 jours	47	Franzaring et collab., 2016
		CE ₄₀ (croissance)		31,3	
		CE ₂₀ (croissance)		11,8	
		CE ₁₀ (croissance)		5,2	
Chlorure de lithium (LiCl)	Tournesol (<i>Helianthus annuus</i>)	CMEO (réduction de 27 % de la biomasse des pousses)	14 jours	50	Hawrylak-Nowak et collab., 2012
		CSEO (poids frais des racines)		50	
		CSEO (biomasse)	3 semaines	630	Martinez et collab., 2018
		CMEO (teneurs en chlorophylle)		630	
		CSEO (croissance)		630	

Composé	Organisme	Paramètre	Durée d'exposition	Valeur (mg/kg)	Référence
Chlorure de lithium (LiCl)	Tournesol (<i>Helianthus annuus</i>)	CME0 (croissance de l'hypocotyle ⁵)	3 jours	8,4	Stolarz et collab., 2015
		Réduction de 34 % de la croissance de l'hypocotyle		2 520	
		Réduction de 55 % de la croissance de l'hypocotyle		3 360	
		CSEO (survie)	4 mois	1 000	Kavanagh et collab., 2018b
Nitrate de lithium (LiNO ₃)	Lichen (<i>Cladonia rangiferina</i>)	CSEO (activité enzymatique de la phosphatase)	30 minutes	6 895	Lane et Puckett, 1979
Nitrate de lithium (LiNO ₃)	Coton (<i>Gossypium hirsutum</i>)	CSEO (rendement)	21 jours	25	Wallace et collab., 1977
		CME0 (rendement)		50	
		CE ₄₀ (biomasse des feuilles)		28,5	
		CE ₂₀ (biomasse des feuilles)		21,8	
		CE ₁₀ (biomasse des feuilles)		18,1	
		CE ₄₀ (biomasse des tiges)		20,4	
		CE ₂₀ (biomasse des tiges)		14,8	
		CE ₁₀ (biomasse des tiges)		11,5	
Nitrate de lithium (LiNO ₃)	Cresson officinal (<i>Nasturtium officinale</i>)	CME0 (croissance)	30 jours	140	Magalhães et collab., 1990
Nitrate de lithium (LiNO ₃)	Haricot (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	CSEO (rendement)	16 jours	10	Wallace et collab., 1977
		CME0 (apparition de chloroses)		25	

⁵L'hypocotyle est la partie de la tigelle située entre sa base et les premiers cotylédons de la plante.

Composé	Organisme	Paramètre	Durée d'exposition	Valeur (mg/kg)	Référence
Nitrate de lithium (LiNO ₃)	Laitue (<i>Lactuca sativa</i>)	CSEO (croissance)	30 jours	140	Magalhães et collab., 1990
Nitrate de lithium (LiNO ₃)	Radis (<i>Raphanus sativus</i>)	CSEO (croissance)	30 jours	140	Magalhães et collab., 1990
Carbonate de lithium (Li ₂ CO ₃)	<i>Apocynum venetum</i>	CME0 (réduction de 97 % du taux de germination)	15 jours	11 100	Jiang et collab., 2018a
		CME0 (réduction de 61 % du taux de germination)		3 700	
		CE ₅₀ (taux de germination)		2 665	
Carbonate de lithium (Li ₂ CO ₃)	Haricot (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	CE ₅₀ (croissance)	15 jours	71	Franzaring et collab., 2016
		CE ₄₀ (croissance)		47,3	
		CE ₂₀ (croissance)		17,8	
		CE ₁₀ (croissance)		7,9	
Carbonate de lithium (Li ₂ CO ₃)	Maïs (<i>Zea mays</i>)	CE ₅₀ (croissance)	15 jours	171	Franzaring et collab., 2016
		CE ₄₀ (croissance)		114	
		CE ₂₀ (croissance)		42,7	
		CE ₁₀ (croissance)		19	
Carbonate de lithium (Li ₂ CO ₃)	Sarrasin (<i>Fagopyrum esculentum</i>)	CE ₅₀ (croissance)	15 jours	16	Franzaring et collab., 2016
		CE ₄₀ (croissance)		10,7	
		CE ₂₀ (croissance)		4	
		CE ₁₀ (croissance)		1,8	
Acétate de lithium (C ₂ H ₃ LiO ₂)	Hydne hérisson (<i>Hericium erinaceus</i>)	CSEO (biomasse)	Non précisée	65	Rzymiski et collab., 2017
Acétate de lithium (C ₂ H ₃ LiO ₂)	Pholiote du peuplier (<i>Agrocybe cylindracea</i>)	CSEO (biomasse)	Non précisée	65	Rzymiski et collab., 2017

Composé	Organisme	Paramètre	Durée d'exposition	Valeur (mg/kg)	Référence
Hydroxyde de lithium (LiOH)	Laitue pommée (<i>Lactuca sativa</i> var. <i>capitata</i>)	CMEO (biomasse des racines)	21 jours	50	Kalinowska et collab., 2013
		CMEO (réduction de 69 % de la biomasse des pousses)		50	
		CE ₁₀₀ (croissance des pousses)		100	
		CMEO (réduction de 19 % du rendement des parties aériennes)		20	
Hydroxyde de lithium (LiOH)	Laitue (<i>Lactuca sativa</i>)	CSEO (nombre de feuilles)	35 jours	40	Da Silva et collab., 2019
		CSEO (longueur de la tige)		40	
		CSEO (poids de la tige)		40	
		CSEO (surface foliaire)		30	
		CMEO (réduction de 10 % de la surface foliaire)		40	
		CSEO (croissance)		30	
		CMEO (réduction de 15 % de la croissance)		40	
		CE ₂₀ (croissance)		40	
		CE ₁₀ (croissance)		10	
		CSEO (diamètre de la tige)		30	
		CMEO (réduction de 12 % du diamètre de la tige)		40	
		CSEO (poids des feuilles)		30	
		CMEO (réduction de 24 % du poids des feuilles)		40	
		CSEO (poids des pousses)		30	

Composé	Organisme	Paramètre	Durée d'exposition	Valeur (mg/kg)	Référence
Hydroxyde de lithium (LiOH)	Laitue (<i>Lactuca sativa</i>)	CMEO (réduction de 20 % du poids des pousses)	35 jours	40	Da Silva et collab., 2019
		CSEO (biomasse des racines)		40	
		CSEO (poids des racines)		30	
		CMEO (réduction de 22 % du poids des racines)		40	

CE : concentration effective.

CSEO : concentration sans effet observé.

CMEO : concentration minimale avec effet observé.

Tableau 10 – Toxicité de différents composés de lithium sur les invertébrés terrestres

Composé	Organisme	Paramètre	Durée d'exposition	Valeur (mg/kg)	Référence
Nitrate de lithium (LiNO ₃)	<i>Caenorhabditis elegans</i>	CL ₅₀	24 heures	14 685	Tatara et collab., 1998
Chlorure de lithium (LiCl)	<i>Drosophila melanogaster</i>	CSEO (génotoxicité)	72 heures	140	King et collab., 1979
Chlorure de lithium (LiCl)	<i>Eisenia fetida</i>	CMEO (survie)	7 semaines	70	Aral et Vecchio-Sadus, 2008
Chlorure de lithium (LiCl)	<i>Caenorhabditis elegans</i>	CMEO (croissance)	72 heures	53	Inokuchi et collab., 2015
		CMEO (maturation)		13,3	
		CMEO (reproduction)		424	
		CSEO (survie)	24 heures	424	
Carbonate de lithium (Li ₂ CO ₃)	<i>Caenorhabditis elegans</i>	CMEO (croissance)	72 heures	55,4	Inokuchi et collab., 2015
		CMEO (maturation)		55,4	
		CMEO (reproduction)		221,7	
		CL ₅₀	24 heures	532	

CL : concentration létale.

CSEO : concentration sans effet observé.

CMEO : concentration minimale avec effet observé.

Tableau 11 – Toxicité de différents composés de lithium sur les oiseaux

Composé	Organisme	Paramètre	Durée d'exposition	Voie d'exposition	Valeur (mg/kg)	Référence
Chlorure de lithium (LiCl)	Carouge à épaulettes (<i>Agelaius phoeniceus</i>)	CMEO (apprentissage des tâches)	4 jours	Injection intrapéritonéale	10	Werner et Provenza, 2011
Hypochlorite de lithium (LiClO)	Canard colvert (<i>Anas platyrhynchos</i>)	CL ₅₀	8 jours	Oral par la nourriture	> 5 000	EPA, 1992
			14 jours	Oral par capsule	567	
		CSEO (survie)	14 jours	Oral par capsule	125	
Lithium perfluorooctane sulfonate (C ₈ F ₁₇ LiO ₃ S)	Canard colvert (<i>Anas platyrhynchos</i>)	CL ₅₀	8 jours	Oral par la nourriture	324	EPA, 1992
		CSEO (survie)			< 94	
		CL ₅₀	14 jours	Oral par capsule	81	
		CSEO (survie)			< 12,5	
Lithium perfluorooctane sulfonate (C ₈ F ₁₇ LiO ₃ S)	Colin de Virginie (<i>Colinus virginianus</i>)	CL ₅₀	8 jours	Oral par la nourriture	220	EPA, 1992
		CSEO (survie)			< 94	
		CL ₅₀	14 jours	Oral par capsule	42	
		CSEO (survie)			< 11,7	

CL : concentration létale.

CSEO : concentration sans effet observé.

CMEO : concentration minimale avec effet observé.

Tableau 12 – Effets observés chez des mammifères à la suite de l'ingestion de différents composés de lithium

Composé	Organisme	Paramètre	Durée d'exposition	Voie d'exposition	Valeur (mg/kg/jour)	Référence
Carbonate de lithium (Li ₂ CO ₃)	Souris grise (<i>Mus musculus</i>)	CMEO (prise de poids)	15 jours	Injection intrapéritonéale	80	Nciri et collab., 2009
Carbonate de lithium (Li ₂ CO ₃)	Souris grise (<i>Mus musculus</i>)	CSEO (survie)	13 jours	Oral/Gavage	400	Chernoff et Kavlock, 1982
			15 jours		400	
		CSEO (poids corporel)	12 jours		400	
			13 jours		400	
			15 jours		400	
		CSEO (reproduction)	12 jours		400	
Carbonate de lithium (Li ₂ CO ₃)	Souris grise (<i>Mus musculus</i>)	CSEO (comportement)	34 jours	Oral/Gavage	400	Gray et collab., 1986
			71 jours		400	
			223 jours		400	
Carbonate de lithium (Li ₂ CO ₃)	Surmulot (<i>Rattus norvegicus</i>)	CSEO (reproduction)	10 jours	Oral/Gavage	50	Marathe et Thomas, 1986
		CMEO (reproduction)			100	
		CE ₂₀ (poids des petits)			70	
		CE ₂₀ (survie des petits)			65	
		CE ₄₀ (survie des petits)			85	
		CE ₂₀ (taux d'implantation)			86	

Composé	Organisme	Paramètre	Durée d'exposition	Voie d'exposition	Valeur (mg/kg/jour)	Référence
Carbonate de lithium (Li ₂ CO ₃)	Souris grise (<i>Mus musculus</i>)	CE ₂₀ (survie)	Exposition unique	Oral/Gavage	155	Smyth et collab., 1969
		CE ₄₀ (survie)			310	
Carbonate de lithium (Li ₂ CO ₃)	Surmulot (<i>Rattus norvegicus</i>)	CE ₂₀ (survie)	Exposition unique	Oral/Gavage	150	Smyth et collab., 1969
		CE ₄₀ (survie)			280	
Carbonate de lithium (Li ₂ CO ₃)	Loup (<i>Canis lupus</i>)	CE ₂₀ (survie)	Exposition unique	Oral/Gavage	150	Smyth et collab., 1969
		CE ₄₀ (survie)			320	
Chlorure de lithium (LiCl)	Bovin (<i>Bos taurus</i>)	CSEO (survie)	Exposition unique	Oral/Gavage	250	Johnson et collab., 1980
		CME0 (survie)			500	
		CE ₂₀ (survie)			460	
		CE ₄₀ (survie)			495	
Chlorure de lithium (LiCl)	Chèvre (<i>Capra hircus</i>)	CSEO (alimentation)	1 jour	Oral/Gavage	150	Kimball et Billings, 2007
			30 jours		150	
Chlorure de lithium (LiCl)	Surmulot (<i>Rattus norvegicus</i>)	CME0 (poids corporel)	7 semaines	Oral/Eau de boisson	15	Ahmad et collab., 2011
Chlorure de lithium (LiCl)	Surmulot (<i>Rattus norvegicus</i>)	CME0 (spermatogénèse)	21 jours	Injection sous-cutanée	2	Ghosh et collab., 1991
Chlorure de lithium (LiCl)	Souris grise (<i>Mus musculus</i>)	CE ₂₀ (survie)	Exposition unique	Oral/Gavage	150	Smyth et collab., 1969
		CE ₄₀ (survie)			300	
Chlorure de lithium (LiCl)	Souris grise (<i>Mus musculus</i>)	CE ₂₀ (reproduction)	14 jours	Oral/Gavage	335	Mroczka et collab., 1983
		CE ₄₀ (reproduction)			360	

Composé	Organisme	Paramètre	Durée d'exposition	Voie d'exposition	Valeur (mg/kg/jour)	Référence
Chlorure de lithium (LiCl)	Lapin (<i>Oryctolagus cuniculus</i>)	CE ₂₀ (survie)	Exposition unique	Oral/Gavage	250	Smyth et collab., 1969
		CE ₄₀ (survie)			490	

CI : concentration inhibitrice.

CSEO : concentration sans effet observé.

CMEO : concentration minimale avec effet observé.

5. Détermination des valeurs toxicologiques de référence

L'évaluation du risque écotoxicologique (ÉRE) a pour objet d'estimer les possibilités ou les probabilités d'occurrence d'effets néfastes chez des récepteurs écologiques susceptibles d'être affectés à la suite de l'exposition à un ou à plusieurs contaminants, selon les caractéristiques propres à la source de contamination et au site à l'étude. Elle consiste à utiliser la méthode du quotient pour estimer le risque lié à un sol contaminé. Ainsi, pour le récepteur considéré et le type d'usage du site considéré, le risque estimé est obtenu en comparant la valeur de l'exposition estimée à la valeur toxicologique de référence (VTR) correspondant à un niveau de réponse considéré comme acceptable. La méthode du quotient correspond à l'égalité suivante :

$$RE = \sum_{i,j=1}^n (EE_{ij} / VR_{ij})$$

avec :

RE : risque estimé;

EE_{ij} : exposition estimée (dose, concentration, niveau d'effet) pour le contaminant i et la voie d'exposition j;

VR_{ij} : valeur toxicologique de référence (dose, concentration, niveau d'effet) pour le contaminant i et la voie d'exposition j.

Des VTR pour les récepteurs terrestres sont élaborées et mises à la disposition des évaluateurs de risque (CEAEQ, 2012) pour leur utilisation dans les démarches d'évaluation du risque sur l'écosystème, comme cela est décrit dans la Procédure d'évaluation du risque écotoxicologique pour la réhabilitation des terrains contaminés (PÉRE; CEAEQ, 1998).

Trois niveaux de VTR pour les récepteurs terrestres sont ainsi disponibles pour cinq groupes de récepteurs, soit les microorganismes, les végétaux, les invertébrés du sol, les oiseaux et les mammifères. Ces niveaux sont :

- N1 : la valeur toxicologique de référence pour les milieux sensibles, qui correspond à 10 % d'effets néfastes acceptés;
- N2 : la valeur toxicologique de référence pour les usages résidentiel, récréatif et institutionnel, qui correspond à 20 % d'effets néfastes acceptés;
- N3 : la valeur toxicologique de référence pour les usages commercial et industriel, qui correspond à 40 % d'effets néfastes acceptés.

Le modèle d'ajustement statistique de Weibull est utilisé pour estimer les courbes concentration/réponse (ou dose/réponse) pour chaque ensemble de données de toxicité expérimentales issues de la recherche bibliographique. L'objectif est d'estimer les concentrations ou doses induisant 10, 20 et 40 % d'effets (CE₁₀, CE₂₀ et CE₄₀; DE₁₀, DE₂₀ et DE₄₀) pour chacun des niveaux trophiques. Un exemple est donné dans la figure 5.

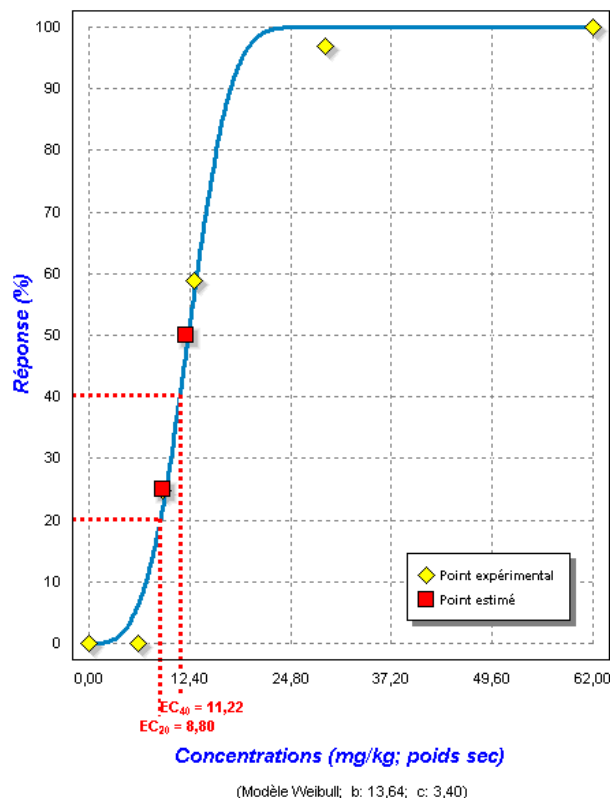


Figure 5 – Exemple de courbe concentration/réponse modélisée à partir de données de toxicité expérimentales et utilisée pour estimer les concentrations induisant 10, 20 et 40 % d'effets

Étant donné que les durées d'exposition et les paramètres d'effets (mortalité, croissance, reproduction, etc.) sont le plus souvent différents d'une étude à l'autre, des facteurs de correction ont été appliqués :

- Pour les microorganismes, les végétaux et les invertébrés, si le paramètre d'effets mesuré est de la mortalité, un facteur de correction de 5 est appliqué aux CE_{10} , CE_{20} et CE_{40} estimées. S'il s'agit d'un effet sur la reproduction, la croissance ou la germination (végétaux), aucun facteur de correction n'est appliqué.
- Pour les oiseaux et les mammifères, les facteurs de correction appliqués aux DE_{10} , DE_{20} et DE_{40} estimées sont les suivants : si le paramètre d'effets mesuré est de la mortalité, un facteur de correction de 5 est appliqué; s'il s'agit d'un effet sous-létal (croissance, etc.), un facteur de correction de 2,5 est appliqué; s'il s'agit d'un effet sur la reproduction, aucun facteur de correction n'est appliqué.
- Enfin, pour les oiseaux et les mammifères, si la durée d'exposition est de moins d'un an, un facteur de correction de 2,0 est appliqué, en plus des facteurs cités précédemment.

Pour les microorganismes, les végétaux et les invertébrés du sol, la distribution cumulée des valeurs de CE_{10} , CE_{20} et CE_{40} estimées est établie pour chaque catégorie de récepteurs. Étant constituées d'un très grand nombre d'espèces, présentant des sensibilités très différentes à l'égard des contaminants, ces catégories de récepteurs sont considérées à l'échelle de la communauté. Ainsi, la VTR retenue pour chacun de ces niveaux trophiques correspond à la moyenne géométrique de la distribution des CE_{10} , CE_{20} et CE_{40} estimées.

Pour les oiseaux et les mammifères, la distribution cumulée des valeurs de DE₁₀, DE₂₀ et DE₄₀ est établie pour chaque catégorie de récepteurs. La VTR retenue pour les oiseaux et les mammifères correspond à la valeur la plus faible de ces distributions. Elle correspond ainsi à l'espèce la plus sensible parmi les études recensées et permet donc de protéger l'ensemble des populations d'oiseaux ou de mammifères. Notons que si cette donnée est jugée peu représentative de l'ensemble des données (qualité faible, exposition par gavage, etc.), la VTR peut alors être choisie parmi les données immédiatement moins sensibles.

À l'aide des données de toxicité expérimentales disponibles, il a été possible d'utiliser cette méthode pour déterminer des VTR pour le lithium pour plusieurs catégories de récepteurs :

- Pour les plantes (figure 6), une valeur de : 20,3 mg/kg, basée sur 18 données, est proposée comme VTR dans les milieux sensibles (niveau N1); une VTR de 26,8 mg/kg, basée sur 29 données, est proposée pour un usage résidentiel/parc (niveau N2); une VTR de 59,1 mg/kg, basée sur 16 données, est proposée pour un usage commercial et industriel (niveau N3).
- Pour les oiseaux, les études disponibles sur la toxicité du Li ont été réalisées avec des formes chimiques qui ne sont pas représentatives de celles naturellement présentes dans l'environnement, notamment autour des activités minières : l'hypochlorite de lithium est un désinfectant et le perfluorooctane sulfonate de lithium, un pesticide. Par conséquent, aucune VTR n'a pu être déterminée pour les oiseaux.
- Pour les mammifères, une VTR de 15 mg/kg de poids corporel/jour est proposée pour un usage résidentiel/parc (niveau N2) et une VTR de 28 mg/kg de poids corporel/jour, pour un usage commercial et industriel (niveau N3). Dans les deux cas, ces VTR sont basées sur un jeu de 10 données (figure 7).

Les données collectées dans cette revue de littérature ont montré que le lithium n'a pas d'effet néfaste sur les microorganismes aux concentrations représentatives de celles retrouvées dans l'environnement. Par conséquent, aucune valeur toxicologique de référence n'a été établie pour ces récepteurs. Pour les invertébrés du sol, les données récoltées sont insuffisantes pour développer des valeurs toxicologiques de référence fiables. Les études disponibles pour les amphibiens et les reptiles ayant été réalisées sur la phase aquatique du cycle de vie de ces récepteurs, les données de toxicité pour l'exposition terrestre au lithium ont été jugées insuffisantes pour dériver des valeurs toxicologiques de référence dans le sol.

Le tableau 13 résume les valeurs toxicologiques de référence proposées pour estimer le risque écotoxicologique relié au lithium pour les récepteurs terrestres.

Tableau 13 – Valeurs toxicologiques de référence proposées pour les récepteurs terrestres exposés au lithium

Récepteur terrestre	VTR de niveau N1	VTR de niveau N2	VTR de niveau N3
Microorganismes	-	-	-
Plantes	20,3 mg/kg	26,8 mg/kg	59,1 mg/kg
Invertébrés terrestres*		-	-
Oiseaux		-	-
Mammifères	-	15 mg/kg/jour	28 mg/kg/jour

* : nombre de données insuffisant pour générer une valeur de référence.

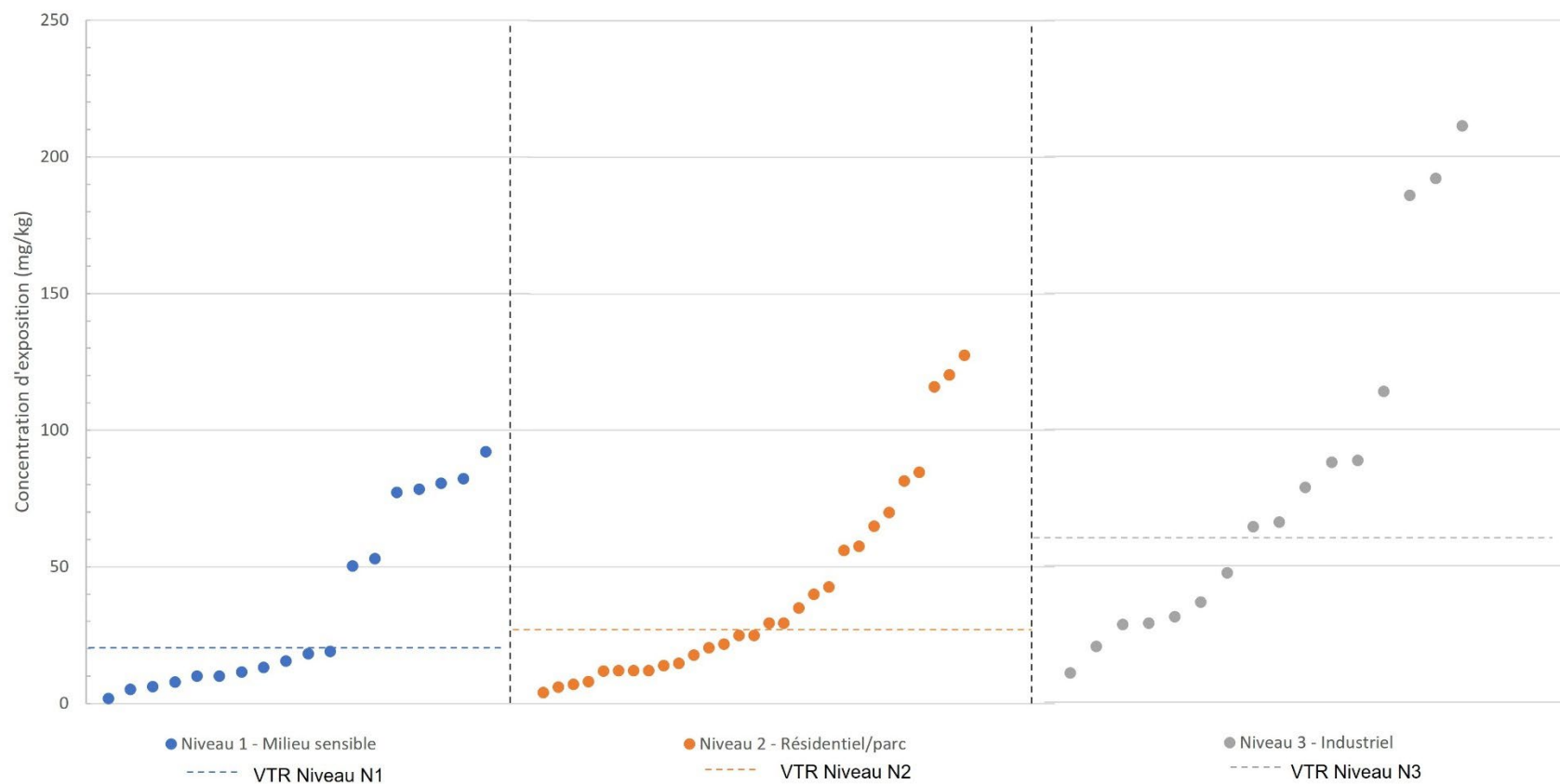


Figure 6 – Distribution des données utilisées pour dériver les VTR pour chaque type d'utilisation de sols chez les plantes

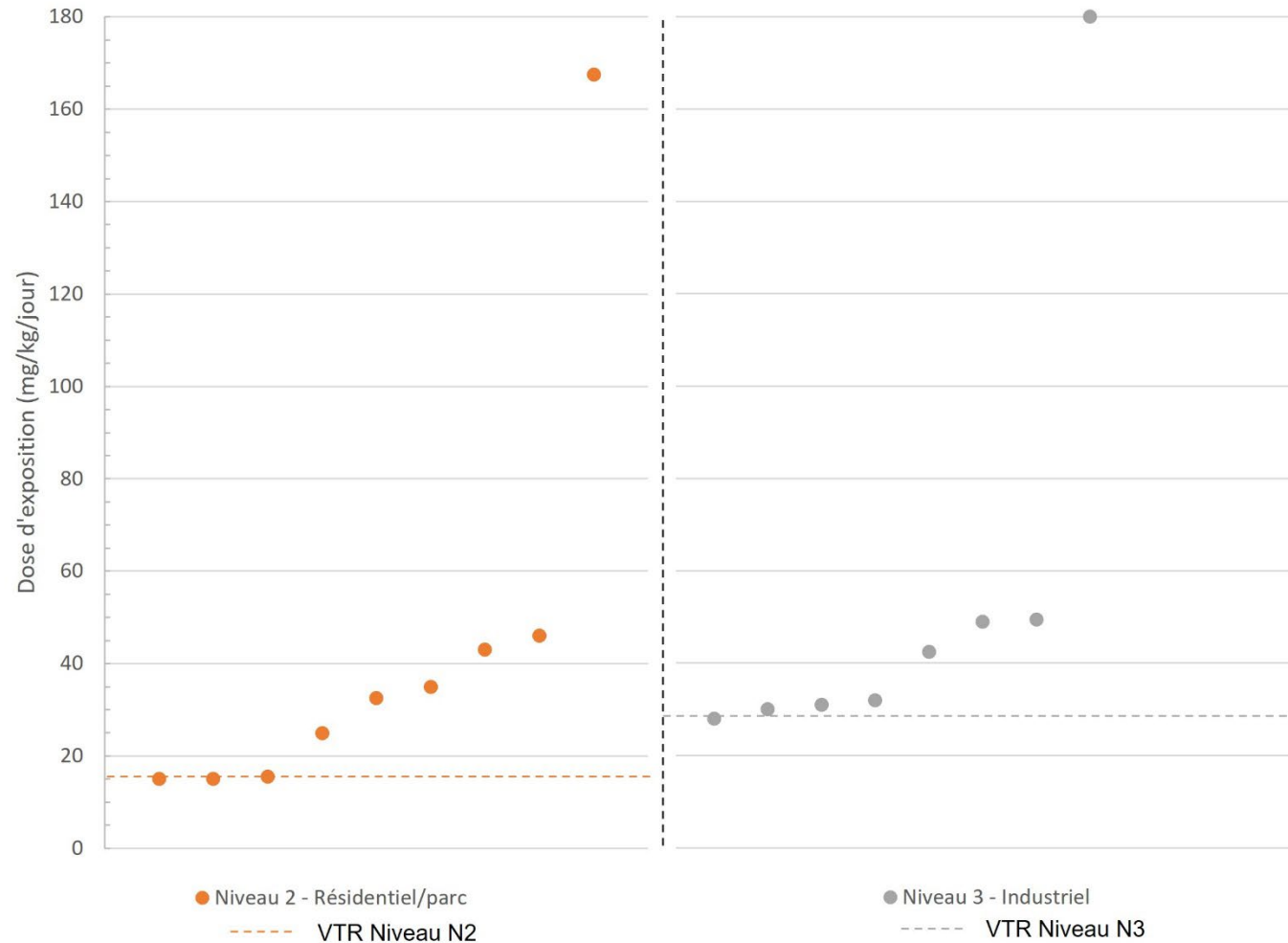


Figure 7 – Distribution des données utilisées pour dériver les VTR pour chaque type d'utilisation de sols chez les mammifères, en tenant compte des facteurs de correction

6. Conclusions et perspectives

Les énergies renouvelables, l'électrification des transports et les technologies de pointe sont des secteurs en croissance pour lesquels un approvisionnement en minéraux critiques et stratégiques (MCS) est indispensable. Le Québec disposant de ressources minérales très diversifiées, particulièrement en territoire nordique, le gouvernement du Québec a récemment mis en œuvre le Plan québécois pour la valorisation des minéraux critiques et stratégiques 2020-2025 (PQVMCS), qui présente des stratégies pour favoriser l'exploration minière, la mise en valeur et l'exploitation de ces minéraux, y compris le lithium, sans oublier leur recyclage et leur utilisation optimale. Étant donné les capacités de l'industrie québécoise à s'impliquer dans l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement des batteries Li-ion, comme annoncé dans le Plan pour une économie verte 2030, il apparaît donc indispensable d'acquérir des connaissances sur le devenir du lithium dans l'environnement, son potentiel de bioaccumulation et son potentiel toxique pour la faune et la flore terrestres. Cette revue de la littérature avait pour objectif : 1) d'évaluer la présence et le devenir du lithium dans l'environnement; 2) d'inventorier les données de bioaccumulation et de toxicité disponibles sur le lithium pour la faune et la flore terrestres; 3) de proposer des valeurs toxicologiques de référence, soit des concentrations seuils d'effets pour les organismes terrestres exposés au lithium présent dans le sol; et, sur la base de ces données, 4) d'établir s'il existe un potentiel de danger associé à la présence de lithium dans l'environnement et si des études doivent être entreprises pour compléter les données disponibles.

Au Québec, le lithium provient des pegmatites riches en minéraux aluminosilicates et se trouve principalement dans les dépôts de spodumène. Les étapes de production du lithium qui entraînent les plus grands impacts environnementaux sont la lixiviation et la purification, alors que pour la production des batteries Li-ion, il s'agit de l'enfouissement des batteries usées. Le recyclage de ces dernières pourrait donc diminuer les impacts environnementaux provenant de la génération de déchets de batteries et de l'extraction des ressources primaires. Cependant, les données sont limitées sur le comportement du lithium dans les résidus miniers à la suite de leur disposition, sur leur toxicité pour les organismes terrestres ainsi que sur les impacts environnementaux des étapes de recyclage, ce qui introduit une grande incertitude dans l'interprétation des résultats et limite la capacité des modèles d'analyses de cycle de vie à identifier l'ensemble des impacts environnementaux de la chaîne de valeur du Li.

Le lithium est considéré comme un élément très mobile dans l'environnement. Sa mobilité dans les sols est surtout contrôlée par sa chimie et les conditions prévalant dans le sol, telles que le pH et la composition du sol (ex. : proportion de matière organique par rapport à l'argile). Une fois solubilisés, les ions Li^+ peuvent être lessivés du sol par les pluies et rejoindre les eaux souterraines et le milieu aquatique. Une fois dans le milieu aquatique, le lithium se trouve principalement sous forme ionique. Les composés les plus retrouvés, le LiCl et le sulfate de lithium (LiSO_4), sont les plus solubles et se dissocient en milieu aqueux. Par conséquent, les concentrations de lithium sont généralement plus élevées dans les eaux de mer (environ 170 $\mu\text{g/l}$) que dans les eaux douces (entre 1 et 40 $\mu\text{g/l}$).

D'après les données disponibles, le lithium est biodisponible pour l'ensemble des organismes. L'accumulation est proportionnelle aux teneurs environnementales et ne dépend pas de la forme chimique ajoutée. Chez les plantes, à la suite de sa prise en charge par les racines, le Li absorbé est principalement retrouvé dans les feuilles, en raison de l'efficacité présumée du phénomène de translocation pour ce métal. Chez les mammifères, le lithium est absorbé par le tractus gastro-intestinal, avant de s'accumuler dans le cerveau, les glandes endocrines et les os. Les études sur le potentiel de bioaccumulation chez les autres niveaux trophiques sont très limitées.

Le potentiel toxique du lithium est relativement faible et n'est observé qu'à des concentrations élevées. En effet, de faibles concentrations de lithium peuvent engendrer des effets bénéfiques, peu importe le niveau trophique étudié. Ces effets positifs peuvent se traduire par une stimulation de la croissance chez les plantes, ainsi que par une amélioration du comportement chez les mammifères. En revanche, à de plus forts niveaux d'exposition, la présence excessive de lithium peut occasionner différents effets néfastes. Chez les végétaux, cela inclut l'apparition de nécroses, ainsi qu'une diminution du taux de germination, de

la biomasse et de la croissance. Chez les mammifères, des teneurs élevées en lithium altèrent les fonctions rénales et hépatiques, en plus d'affecter la reproduction, la prise de poids et la survie. De plus, chez tous les organismes, le Li interfère avec l'absorption et la translocation d'autres éléments biologiquement importants, comme le magnésium, le sodium, le potassium et le calcium, ce qui peut occasionner des carences. La tolérance au lithium chez certaines espèces serait d'ailleurs étroitement liée à leur tolérance au sodium. Par conséquent, les espèces connues pour être facilement affectées par de faibles quantités de sodium (ex. : arbres à feuilles caduques, agrumes, avocats, haricots rouges) sont plus sensibles aux effets du lithium, tandis que d'autres cultures tolérant le sodium seraient relativement tolérantes à ce métal. Il convient de noter que les données de toxicité sont limitées pour les invertébrés et les oiseaux et que peu d'études chroniques ont été réalisées. Toutefois, la mise en place de mesures de mitigation au pourtour des mines et des industries produisant des batteries lithium-ion devrait limiter l'exposition des organismes terrestres à de fortes teneurs environnementales.

Enfin, les données actuelles ont été suffisantes pour établir des valeurs toxicologiques de référence pour les plantes et les mammifères. Pour les oiseaux, des valeurs toxicologiques de référence pourront être dérivées à partir des valeurs établies pour les mammifères, selon la méthode suggérée par l'EPA (1993). Des données de toxicité complémentaires sont nécessaires pour déterminer les valeurs toxicologiques de référence pour les invertébrés terrestres. Une fois disponibles, ces valeurs de référence permettront d'estimer le risque relié à la présence de lithium pour la faune et la flore en milieu terrestre dans les projets de mise en valeur des minerais de lithium. Lorsque les données de toxicité du lithium pour les invertébrés terrestres seront disponibles, des critères écotoxicologiques de qualité des sols pourront être proposés.

7. Références bibliographiques

- Agah, H. (2018). "Assessment of trace metals accumulation in water and surface sediments of Chabahar Bay, Makran". *Indian Journal of Geo-Marine Sciences* **47**(11): 2230-2236.
- Agusdinata, D. B. et collab. (2018). "Socio-environmental impacts of lithium mineral extraction: towards a research agenda". *Environmental Research Letters* **13**(12).
- Aldrich D. G., A. P. Vanselow et G. R. Bradford (1951). "Lithium toxicity in Citrus". *Soil Science* **71**: 291-296.
- Althaus, H. J. et collab. (2007). *Life cycle inventories of highly pure chemicals*. Ecoinvent report No.8, v2.0. EMPA Dübendorf, Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Dübendorf, CH.
- Ahmad, M. et collab. (2011). "Lithium induced toxicity in rats: Blood serum chemistry, antioxidative enzymes in red blood cells and histopathological studies". *Biological & Pharmaceutical Bulletin* **34**(2): 272-277.
- Ammari, T. et collab. (2011). "The occurrence of lithium in the environment of the Jordan Valley and its transfer into the food chain". *Environmental geochemistry and health* **33**: 427-437.
- Anderson, C. E. (1990). "Lithium in plants". *Lithium and Cell Physiology*. R. O. Bach and V. S. Gallicchio. New York, NY, Springer New York: 25-46.
- Anderson, M. A., P. M. Bertsch et W. P. Miller. (1988). "The distribution of lithium in selected soils and surface waters of the southeastern USA". *Applied Geochemistry* **3**: 205-12.
- Antonkiewicz, J. et collab. (2017). "Determination of lithium bioretention by maize under hydroponic conditions". *Archives of Environmental Protection* **43**(4): 94-104.
- Aral, H. et A. Vecchio-Sadus (2008). "Toxicity of lithium to humans and the environment – A literature review". *Ecotoxicology and Environmental Safety* **70**(3): 349-356.
- Aral, H. et A. Vecchio-Sadus (2011). "Lithium: Environmental pollution and health effects". *Encyclopedia of Environmental Health*. J. O. Nriagu. Burlington, Elsevier: 499-508.
- Araoka, D. et collab. (2014). "Lithium and strontium isotopic systematics in playas in Nevada, USA: constraints on the origin of lithium". *Mineralium Deposita* **49**(3): 371-379.
- Avila-Arias, H. et collab. (2019). "Impacts of molybdenum-, nickel-, and lithium- oxide nanomaterials on soil activity and microbial community structure". *Science of the Total Environment* **652**: 202-211.
- Backstrom, S. (1954). "Morphogenetic effects of lithium on the embryonic development of Xenopus". *Archiv für Zoologie und Zootomie* **6**: 527-536.
- Badot, P. M. (1993). "Lithium, its effects and its possible mechanisms of action in plants bibliography". *Acta Botanica Gallica* **140**(5): 549-571.
- Balter, V. et N. Vigier (2014). "Natural variations of lithium isotopes in a mammalian model". *Metallomics* **6**(3): 582-586.
- Barone, M. (2017). « Valproate et grossesse : connaissances et pratiques en pharmacie d'officine ». Sciences pharmaceutiques. Université de Bordeaux. En ligne : <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01610367>.

- Bertrand D. (1959). « Nouvelles recherches sur la répartition du lithium chez les Phanerogames ». *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences* **249**: 787-788.
- Bertrand D. (1952). « Recherches sur le lithium chez les Phanerogames ». *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences* **234**: 2102-2104.
- Bibienne, T. et collab. (2020). "From mine to mind and mobiles: Society's increasing dependence on lithium." *Elements* **16**(4): 265–270.
- Birch, N. J. et J. D. Philips (1992). "Distribution and pharmacokinetics of lithium in tissues and in cells". Dans : Thellier M, Wissocq J-C, eds. *Lithium Kinetics*. Carnforth, Lancashire, United Kingdom: Marius Press, 69-96.
- Bingham, F. T. et collab. (1964). "Toxicity of lithium". *California Agriculture* **18**: 6-7.
- Birch, N. J. (1976). "Possible mechanism for biological action of lithium." *Nature* **264**(5587): 681-681.
- Boga, A. et collab. (2000). "Morphological changes in *Xenopus laevis* embryos with lithium and evaluation of the FETAX test". *Turkish Journal of Biology* **4**(2):177–188.
- Borovik-Romanova, T. F. (1965). "The content of lithium in plants". Dans : Inst. Geokem. Akad. Nauk, U.S.S.R., N. I. Khitarov [ed].
- Bowell, R. J. et collab. (2020). "Classification and characteristics of natural lithium resources". *Elements* **16**: 259-264.
- Boyden, A. et collab. (2016). "The environmental impacts of recycling portable lithium-ion batteries". *Procedia CIRP* **48**: 188-193.
- Bradford, G. B. (1966). "Lithium", Chap. 17 dans Chapman, H. D., ed., *Diagnostic Criteria for Plants and Soils*: Berkeley, California Univ., Div. Agr. Sci., Agr. Expt. Sta., p. 218-223.
- Bradford, G. R. (1963). "Lithium survey of California's water resources." *Soil Science* **96**(2): 77-81.
- Bradley, D. C. et collab. (2017). "Lithium - chap. K of critical mineral resources of the United States—Economic and environmental geology and prospects for future supply". Édité par Schulz, K.J., DeYoung, J.H., Jr., Seal, R.R., II, and Bradley, D.C., eds.: *U.S. Geological Survey Professional Paper* 1802, p. K1–K21,
- Breckenridge, L. J. et collab. (1987). "Lithium inhibits morphogenesis of the nervous system but not neuronal differentiation in *Xenopus laevis*". *Development* **99**(3): 353-70.
- Bueso, E. et collab. (2007). "The lithium tolerance of the *Arabidopsis cat2* mutant reveals a cross-talk between oxidative stress and ethylene". *Plant Journal* **52**(6): 1052-1065.
- Busa, W. B. et R. L. Gimlich (1989). "Lithium-induced teratogenesis in frog embryos prevented by a polyphosphoinositide cycle intermediate or a diacylglycerol analog". *Developmental Biology* **132**: 315-324.
- Bustuoabad, O. D., J. Herkovits et A. Pisanó (1977) "Different sensitivity to lithium ion during the segmentation of *Bufo arenarum* eggs". *Acta Embryologiae Experimentalis (Italy)* **3**: 271-282.
- Cannon, H. L., T. F. Harms et J. C. Hamilton (1975). *Lithium in unconsolidated sediments and plants of the basin and range province, Southern California and Nevada (No. 918)*, US Government Publishing Office: Washington, DC, USA.

- Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (CEAEQ) (2012). *Valeurs de référence pour les récepteurs terrestres*. Québec, ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, 28 p.
- Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (CEAEQ) (1998). *Procédure d'évaluation du risque écotoxicologique pour la réhabilitation des terrains contaminés*. Québec, ministère de l'Environnement et de la Faune, gouvernement du Québec, 139 p.
- Chadha, V. D. et collab. (2008). "Zinc modulates lithium-induced hepatotoxicity in rats." *Liver International* **28**(4): 558-565.
- Chan, L. H., N. C. Sturchio et A. Katz (1997). "Lithium isotope study of the Yellowstone hydrothermal system." *EOS Trans. American Geophysical Union* **78**, F802.
- Chen, J. (1998). "Lithium: Element and geochemistry". Dans : *Geochemistry. Encyclopedia of Earth Science*. Springer, Dordrecht.
- Chernoff, N. et R. J. Kavlock (1982). "An in vivo teratology screen utilizing pregnant mice". *Journal of Toxicology and Environmental Health* **10**(4-5): 541-550.
- Chmielnicka, J. et M. Nasiadek (2003). "The trace elements in response to lithium intoxication in renal failure". *Ecotoxicology and Environmental Safety* **55**(2): 178-183.
- Cindric, I. J. et collab. (2019). "Metals in pine needles: characterisation of bio-indicators depending on species". *International Journal of Environmental Science and Technology* **16**(8): 4339-4346.
- Cubillos, C. F. et collab. (2018). "Microbial communities from the world's largest lithium reserve, Salar de Atacama, Chile: life at high liCl concentrations". *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences* **123**(12): 3668-3681.
- Dabkowska-Naskret, H. et P. Malczyk (1999). "Total and DTPA-extractable forms of Li, Rb and Sr in arable soils of Kujawy region (Poland)". *Macroelements and Trace Elements. Mengen- und Spurenelemente* (Series), p. 834-841.
- Da Silva, R. R. et collab. (2019). "Enrichment of lithium in lettuce plants through agronomic biofortification". *Journal of Plant Nutrition* **42**(17): 2102-2113.
- Davey, B. G. et R. C. Wheeler (1980). "Some aspects of the chemistry of lithium in soils". *Plant and Soil* **57**(1): 49-60.
- Davie, R. J. (1991). "Gastrointestinal absorption of lithium". Dans: Birch NJ, ed. *Lithium and the Cell: Pharmacology and Biochemistry*. London, New York: Academic Press Ltd, p. 243-248.
- De Assunção, L. S. et collab. (2012). "Enrichment of mushrooms: An interesting strategy for the acquisition of lithium". *Food Chemistry* **134**(2): 1123-1127.
- Drummond, A. H. (1987). "Lithium and inositol lipid-linked signalling mechanisms". *Trends in Pharmacological Sciences* **8**(4):129-133.
- Duff, M. C. et collab. (2014). "mRNA Transcript abundance during plant growth and the influence of Li+ exposure". *Plant Science* **229**: 262-279.
- Elektorowicz, M. et Z. Keropian (2015). "Lithium, vanadium and chromium uptake ability of Brassica juncea from lithium mine tailings". *International Journal of Phytoremediation* **17**(6): 521-528.

- Elsheikh, A. M. et collab. (1971). "Effect of lithium on growth, salt absorption, and chemical composition of sugar beet plants". *Agronomy Journal* **63**(5): 755-758.
- EPA (U.S. Environmental Protection Agency) (2019). *Inventory of US Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2017*. EPA430-R-19-001. En ligne: www.epa.gov/ghgemissions/inventory-us-greenhouse-gas-emissions-and-sinks.
- EPA (1993). *Wildlife exposure factors*. Handbook vol.I and II. Washington, DC. 32 p. EPA/600/R-93/187.
- EPA (1992). *Pesticide Ecotoxicity Database* (Formerly: Environmental Effects Database (EEDB)). Environmental Fate and Effects Division, U.S.EPA, Washington, D.C.:
- Fay, D. et collab. (2007). *Soil Geochemical Atlas of Ireland*. Teagasc and Environmental Protection Agency: Dublin, Ireland.
- Feder, G. L. (1972). *Geochemical Survey of Missouri*. Open file report, United States Geological Survey.
- Ferguson, G., R. N. Betcher et S. E. Grasby (2005). *Water chemistry of the Winnipeg formation in Manitoba*. Geological Survey of Canada, Open File 4933, 37 p.
- Figuerola, L. et collab. (2012). "Environmental lithium exposure in the north of Chile-I. Natural water sources". *Biological Trace Element Research* **149**(2): 280-290.
- Figuerola, L. T. et collab. (2013). "Environmental lithium exposure in the north of Chile-II. Natural food sources". *Biological Trace Element Research* **151**(1): 122-131.
- Fleishman, D. G. et collab. (1997). "Lithium secretion in kidneys of amphibians and reptiles under hydrated conditions". *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology* **118**(4): 1259-1265.
- Flexer, V. et collab. (2018). "Lithium recovery from brines: A vital raw material for green energies with a potential environmental impact in its mining and processing". *Science of the Total Environment* **639**: 1188-1204.
- Franzaring, J. et collab. (2016). "Regional differences in plant levels and investigations on the phytotoxicity of lithium". *Environmental Pollution* **216**: 858-865.
- Garcia, C. A. B. et collab. (2009). "Regional geochemical baselines and controlling factors for trace metals in sediments from the Poxim River, northeast Brazil". *Journal of the Brazilian Chemical Society* **20**(7): 1334-1342.
- Ghosh, D. et collab. (1991). "Studies on the effect of prolactin treatment on testicular steroidogenesis and gametogenesis in lithium-treated rats". *Acta Endocrinologica (Copenhagen)* **125**(3): 313.
- Gralla, E. J. et H. M. McIlhenny (1972). "Studies in pregnant rats, rabbits and monkeys with lithium carbonate". *Toxicology and Applied Pharmacology* **21**(3): 428-433.
- Gray, L. E. Jr. et collab. (1986). "An evaluation of figure-eight maze activity and general behavioral development following prenatal exposure to forty chemicals: effects of cytosine arabinoside, dinocap, nitrofen, and vitamin A". *Neurotoxicology* **7**(2): 449-462.
- Grew, E. S. (2020). "The minerals of lithium". *Elements* **16**(4): 235–240.
- Guo, Q. et collab. (2007). "Major hydrogeochemical processes in the two reservoirs of the Yangbajing geothermal field, Tibet, China". *Journal of Volcanology and Geothermal Research* **166**(3): 255-268.

- Gutiérrez, M. et P. Borrego (1999). "Water quality assessment of the Rio Conchos, Chihuahua, Mexico". *Environment International* **25**(5): 573-583.
- Haas, A. R. C. (1929). "Mottle-leaf in citrus artificially produced by lithium". *Botanical Gazette* **87**(5): 630-641.
- Haferburg, G. et collab. (2017). "Microbial diversity of the hypersaline and lithium-rich Salar de Uyuni, Bolivia". *Microbiological Research* **199**: 19-28.
- Hall, T. S. (1942). "The mode of action of lithium salts in amphibian development". *Journal of Experimental Zoology* **89**(1): 1-35.
- Hara, T. et collab. (1977). "Growth response of cabbage plants to lithium, sodium, and rubidium under water culture conditions". *Soil Science and Plant Nutrition* **23**(4): 531-539.
- Hawrylak-Nowak, B. et collab. (2012). "A study on selected physiological parameters of plants grown under lithium supplementation". *Biological Trace Element Research* **149**(3): 425-430.
- Hedgepeth, C. M. et collab. (1997) "Activation of the Wnt signaling pathway: a molecular mechanism for lithium action". *Developmental Biology* **185**: 82–91.
- Helm, L. et A. E. Merbach. (1999). "Water exchange on metal ions: experiments and simulations". *Coordination Chemistry Reviews* **187**: 151-181.
- Huh, Y. et collab. (1998). "Lithium and its isotopes in major world rivers: Implications for weathering and the oceanic budget". *Geochimica et Cosmochimica Acta* **62**: 2039-2051.
- Ikonomova, O. C. et collab. (2000). "Lithium treatment in ovo: effects on embryonic heart rate, natural death of ciliary ganglion neurons, and brain expression of a highly conserved chicken homolog of human MTG8/ETO". *Developmental Brain Research* **123**:13–24
- Inokuchi, A. et collab. (2015). "Effects of lithium on growth, maturation, reproduction and gene expression in the nematode *Caenorhabditis elegans*". *Journal of Applied Toxicology* **35**(9): 999-1006.
- Jaskula, B. W. (2020). *Lithium: Mineral commodity summaries (2020)*. United States Geological Survey: Reston, VA, USA.
- Jaskula, B. W. (2019). *Lithium: Mineral commodity summaries (2019)*. United States Geological Survey: Reston, VA, USA.
- Jaskula, B. W. (2018). *Lithium: Mineral commodity summaries (2018)*. United States Geological Survey: Reston, VA, USA.
- Jaskula, B. W. (2012). *2010 Minerals yearbook: Lithium*. United States Geological Survey: Reston, VA, USA.
- Jiang, L. et collab. (2020). "Environmental impacts of lithium production showing the importance of primary data of upstream process in life-cycle assessment". *Journal of Environmental Management* **262**: 110253.
- Jiang, L. et collab. (2019). "Lithium biofortification of medicinal tea *Apocynum venetum*". *Scientific Reports* **9**(1): 8182.
- Jiang, L. et collab. (2018a). "High lithium tolerance of *Apocynum venetum* seeds during germination". *Environmental Science and Pollution Research* **25**(5): 5040-5046.

- Jiang, L. et collab. (2018b). "Tolerance and accumulation of lithium in *Apocynum pictum* Schrenk". *Peerj* **29**(6): 5559.
- Jiang, L. et collab. (2014). "Apocynum venetum: A newly found lithium accumulator". *Flora – Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants* **209**(5): 285-289.
- Johnson, J. H. et collab. (1980). "Lithium toxicity in cattle". *Veterinary and human toxicology* **22**(4): 248-251.
- Kabata-Pendias, A. et H. Pendias (1992). *Trace Elements in Soils and Plants*. 2nd Edition, CRC Press, Boca Raton.
- Kabata-Pendias, A. (2004). "Soil–plant transfer of trace elements—an environmental issue". *Geoderma* **122**(2): 143-149.
- Kabata-Pendias, A. et A. B. Mukherjee (2007). *Trace elements from soil to human*. Springer Science & Business Media.
- Kalinowska, M. et collab. (2013). "The influence of two lithium forms on the growth, l-ascorbic acid content and lithium accumulation in lettuce plants". *Biological Trace Element Research* **152**(2): 251-257.
- Kamekura, M. et H. Onishi (1982). "Cell-associated cations of the moderate halophile *Micrococcus varians* ssp. *halophilus* grown in media of high concentrations of LiCl, NaCl, KCl, RbCl, or CsCl". *Canadian Journal of Microbiology* **28**(2): 155-161.
- Kanematsu, N. et collab. (1980). "Rec assay and mutagenicity studies on metal-compounds". *Mutation Research* **77**(2): 109-116.
- Kavanagh, L. et collab. (2018). "Global lithium sources-industrial use and future in the electric vehicle industry: A review". *Resources* **7**(3): 57.
- Kavanagh, L. et collab. (2018b). "Induced plant accumulation of lithium". *Geosciences* **8**(2).
- Kavanagh, L. et collab. (2017). "Lithium in the natural waters of the south east of Ireland". *International Journal of Environmental Research and Public Health* **14**(6): 561.
- Kent, N. L. (1941). "Absorption, translocation, and ultimate fate of lithium in the wheat plant". *New Phytologist* **40**: 291-298.
- Kerr, F. et collab. (2018). "Molecular mechanisms of lithium action: switching the light on multiple targets for dementia using animal models". *Frontiers in Molecular Neuroscience* **11**: 297.
- Kesler, S. E. et collab. (2012). "Global lithium resources: Relative importance of pegmatite, brine and other deposits". *Ore Geology Reviews* **48**: 55-69.
- Kimball, B. A. et V. Billings (2007). "Do herbivores associate flavours with specific consequences in flavour aversion learning?" *Applied Animal Behaviour Science* **107**(3): 252-261.
- King, M. T. et collab. (1979). "Mutagenicity studies with x-ray-contrast media, analgesics, antipyretics, antirheumatics and some other pharmaceutical drugs in bacterial, Drosophila and mammalian test systems". *Mutation Research* **66**(1): 33-43.
- Kısakürek, B. et collab. (2005). "Li and $\delta^7\text{Li}$ in Himalayan rivers: Proxies for silicate weathering?" *Earth and Planetary Science Letters* **237**(3): 387-401.

- Kjølholt, J. F. et collab. (2003). *The Elements in the Second Rank – Lithium*. Miljøministeriet, Copenhagen, Denmark.
- Kszos, L. A. et A. J. Stewart (2003). "Review of lithium in the aquatic environment: distribution in the United States, toxicity and case example of groundwater contamination". *Ecotoxicology* **12**(5): 439-447.
- Lane, I. et K. J. Puckett (1979). "Responses of the phosphatase-activity of the lichen *Cladonia rangiferina* to various environmental-factors including metals". *Canadian Journal of Botany – Revue canadienne de botanique* **57**(14): 1534-1540.
- Lazou, A. et A. Beis (1993). "Lithium induces changes in the plasma membrane protein pattern of early amphibian embryos". *Biology of the Cell* **77**(3): 265-268.
- Lewicki, M. et collab. (2006). "Effect of lithium carbonate on subchondral bone in sexually mature Wistar rats". *Experimental and Toxicologic Pathology* **58**(2): 197-201.
- Li, X. et collab. (2009). "Analysis of the metabolome and transcriptome of *Brassica carinata* seedlings after lithium chloride exposure". *Plant Science* **177**(1): 68-80.
- Louguet, P. et M. Thellier (1976). « Influence du lithium sur le degré d'ouverture et les vitesses d'ouverture et de fermeture des stomates chez le *Pelargonium x hortorum* ». *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences* **282**: 2171-2174.
- Lui-Heung, C. et J. M. Edmond (1988). "Variation of lithium isotope composition in the marine environment: A preliminary report". *Geochimica et Cosmochimica Acta* **52**(6): 1711-1717.
- Lund, K. E. et K. L. Young (2005). "Contaminant transport in High Arctic soils: a tracer experiment". *Permafrost and Periglacial Processes* **16**(2): 195-207.
- Magalhães, J. R. et collab. (1990). "Research on lithium-phytological metabolism and recovery of hypolithium". *Pesquisa Agropecuária Brasileira* **25**: 1781-1787
- Manji, H. K. et R. H. Lenox (1994). "Long-term action of lithium – a role for transcriptional and posttranscriptional factors regulated by protein-kinase-c". *Synapse* **16**(1): 11-28.
- Marathe, M. R. et G. P. Thomas (1986). "Embryotoxicity and teratogenicity of lithium carbonate in wistar rat". *Toxicology Letters* **34**(1): 115-120.
- Martin, M. et collab. (1982). "Lithium as a nonradioactive tracer for roots of intercropped species". *Plant and Soil* **64**(2): 203-208.
- Martinez, N. E. et collab. (2018). "Reflectance-based vegetation index assessment of four plant species exposed to lithium chloride". *Sensors* **18**(9): 2750.
- McNeely, R. N., V. P. Neimanis et L. Dwyer (1979). "Lithium". Dans *Water Quality Sourcebook. A Guide to Water Quality Parameters*. Water Quality Branch, Inland Waters Directorate, Environnement Canada, Ottawa. p. 21-22.
- McStay, N. G. et collab. (1980). "Effects of lithium on *Phaseolus vulgaris* L." *Science of the Total Environment* **16**(2): 185-191.
- Millot, R. et collab. (2010). "Behaviour of lithium and its isotopes during weathering in the Mackenzie Basin, Canada". *Geochimica et Cosmochimica Acta* **74**(14): 3897-3912.

- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) (2021). *Les émissions de gaz à effet de serre des véhicules automobiles*. En ligne : <https://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/ges/reglement.htm>. (Page consultée le 15 décembre 2021).
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) (2020). *Plan pour une économie verte 2030 – Plan de mise en œuvre 2021-2026*, ISBN 978-2-550-88061-5 (PDF), 42 p.
- Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN) (2020). *Les minéraux critiques et stratégiques. Plans québécois pour la valorisation des minéraux critiques et stratégiques 2020-2025*, ISBN 978-2-550-87714-1 (PDF), 62 p.
- Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN) (2011). *Le lithium au Québec: les projets miniers d'actualité*. En ligne : <https://mern.gouv.qc.ca/mines/quebec-mines/2011-06/lithium.asp>. (Page consultée le 2 juin 2020).
- Misra, S. (2012). "Lithium isotope history of cenozoic seawater: Changes in silicate weathering and reverse weathering". *Science* **335**(6070): 818-823.
- Morrison, J. M. et collab. (1971). "Plasma and brain lithium levels after lithium carbonate and lithium chloride administration by different routes in rats". *Proceedings of the Society for Experimental Biology and Medicine* **137**(3): 889-892.
- Mroccka, D. L. et collab. (1983). "Effect of lithium on reproduction and postnatal growth of mice". *Biology of the Neonate* **43**(5-6): 287-296.
- Munk, L. et collab. (2016). "Lithium brines: A global perspective: Chapter 14". *Society of Economic Geologists, Inc. Reviews in Economic Geology* **18**: 339-365.
- National Research Council (1974). *Geochemistry and the Environment: Volume I: The Relation of Selected Trace Elements to Health and Disease*. Washington, DC: The National Academies Press.
- NAQUADAT (1985). *National Water Quality Data Bank*. Water Quality Branch, Inland Waters Directorate, Environment Canada, Ottawa.
- Naranjo, M. A. et collab. (2003). "Lithium treatment induces a hypersensitive-like response in tobacco". *Planta* **217**(3): 417-424.
- Nciri, R. et collab. (2009). "The effects of subchronic lithium administration in male Wistar mice on some biochemical parameters". *Human & Experimental Toxicology* **28**(10): 641-646.
- Nicolas, M. P. B. (2017). "Preliminary investigation of the potential for lithium in groundwater in sedimentary rocks in southwestern Manitoba". *Report of Activities 2017, Manitoba Growth, Enterprise and Trade, Manitoba Geological Survey*: 183-190.
- Nishioka, H. (1975). "Mutagenic activities of metal-compounds in bacteria". *Mutation Research* **31**(3): 185-189.
- Nuss, P. et M. J. Eckelman (2014). "Life cycle assessment of metals: A scientific synthesis". *PLoS ONE* **9**(7): e101298.
- Ober, J. A. (2008). "Lithium". Dans : *Mineral Commodity Summaries 2008*. United States Geological Survey: Reston, VA, USA.

- Ober, J. A. (1996). "Lithium". Dans : *Mineral Commodity Summaries 1996*. United States Geological Survey: Reston, VA, USA.
- Oliveira, A. G., M. J. Soares et A. S. Pinto (1997). "Ultrastructural alterations induced by lithium chloride in DNA-containing organelles of a bat trypanosome". *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz* **92**: 513-516.
- Pekmezekmek, A. B. et collab. (2020). "L-Glutamic acid monosodium salt reduces the harmful effect of lithium on the development of *Xenopus laevis* embryos". *Environmental Science and Pollution Research* **27**: 42124-42132.
- Peralta Arnold, Y. et collab. (2017). "Fluid geochemistry of a deep-seated geothermal resource in the Puna plateau (Jujuy Province, Argentina)". *Journal of Volcanology and Geothermal Research* **338**: 121-134.
- Phiel, C. J. et P. S. Klein (2001). "Molecular targets of lithium action". *Annual Review of Pharmacology and Toxicology* **41**: 789-813.
- Propulsion Québec (2019). *Filière des batteries lithium-ion – Développer un secteur porteur d'avenir pour l'économie du Québec*, 45 p.
- Purves, W. K. (1966). "Monovalent cations and growth regulation. I. Growth responses in cucumber hypocotyl segments". *Plant Physiology* **41**(2): 230-233.
- Qiao, L. et collab. (2018). "Subcellular distribution and chemical forms of lithium in Li-accumulator *Apocynum venetum*". *Plant Physiology and Biochemistry* **132**: 341-344.
- Radomski, J. L. et collab. (1950). "The toxic effects, excretion and distribution of lithium chloride". *Journal of Pharmacology and Experimental Therapeutics* **100**(4): 429-444.
- Recyclage Lithion (2021). *Le développement d'usines de recyclage de batteries lithium-ion par Recyclage Lithion*. En ligne : <https://www.lithionrecycling.com/fr/usines-recyclage-batteries-lithium-ion/>. (Page consultée le 2 mars 2021).
- Rehab, F. I. et A. Wallace (1978). "Excess trace-metal effects on cotton .4. Chromium and lithium in Yolo loam soil". *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **9**(7): 645-651.
- Rim, K. et S. J. Kim (2014). "Mutagenicity of lithium carbonate assessed by bacterial reverse mutation (Ames) test". *Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene* **24**: 330-335.
- Robinson, B. H. et collab. (2018). "Lithium as an emerging environmental contaminant: Mobility in the soil-plant system". *Chemosphere* **197**: 1-6.
- Robinson, W. O., L. A. Steinkoenig et C. F. Miller (1971). *The Relation of Some of the Rarer Elements in Soils and Plants*. U.S. Dept. Agric. Bull. No. 600. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C. 27 p.
- Roca-Perez, L. et collab. (2010). "Selenium and heavy metals content in some Mediterranean soils". *Journal of Geochemical Exploration* **107**(2): 110-116.
- Rubio-Arias, H. et collab. (2007). "Vanadium and lithium contamination in freshwaters of the Conchos River in Chihuahua, Mexico". *Environmental Health Risk* **11**: 171-179.
- Rzymiski, P. et collab. (2017). "Lithium biofortification of medicinal mushrooms *Agrocybe cylindracea* and *Hericium erinaceus*". *Journal of Food Science and Technology-Mysore* **54**(8): 2387-2393.

- Saeidnia, S. et M. Abdollahi (2013). "Concerns on the growing use of lithium: The pros and cons". *Iranian Red Crescent Medical Journal* **15**(8): 629-632.
- Schrauzer, G. N. (2002). "Lithium: Occurrence, dietary intakes, nutritional essentiality". *Journal of the American College of Nutrition* **21**(1): 14-21.
- Shahzad, B. et collab. (2017). "Is lithium biologically an important or toxic element to living organisms? An overview". *Environmental Science and Pollution Research* **24**(1): 103-115.
- Shahzad, B. et collab. (2016). "Lithium toxicity in plants: Reasons, mechanisms and remediation possibilities – A review". *Plant Physiology and Biochemistry* **107**: 104-115.
- Sharma, S. D. et M. Iqbal (2005). "Lithium induced toxicity in rats: A hematological, biochemical and histopathological study". *Biological & Pharmaceutical Bulletin* **28**(5): 834-837.
- Slameňová, D. et collab. (1986). "Results of genotoxicity testing of mazindol (degonan), lithium carbonicum (contemnlol) and dropropizine (ditustat) in Chinese hamster V79 and human EUE cells". *Mutation Research/Genetic Toxicology* **169**(3): 171-177.
- Smyth, H. F. Jr. et collab. (1969). "Range-finding toxicity data: List VII". *American Industrial Hygiene Association Journal* **30**(5): 470-476.
- Sobti, R. C. et collab. (1989). "Frequency of sister chromatid exchanges (SCEs) and chromosome aberrations (CAs) caused by three salts of lithium". *Cytologia* **54**(2): 245-248.
- Srivastava, S., A. Sharma et G. Talukder (1986). "Effects of lithium carbonate on cellular systems in mice". *Perspectives in Cytology and Genetics* **5**: 381-386.
- Steinkoenig, L. A. (1915). "Lithium in soils". *Journal of Industrial & Engineering Chemistry* **7**(5): 425-426.
- Stosch, H. G. (1998). "Elements: Lithophile". Dans : *Geochemistry. Encyclopedia of Earth Science. Springer*, Dordrecht.
- Stokinger, H. E. (1981). "Lithium, Li". Dans : Clayton GD, Clayton FE, eds. *Patty's Industrial Hygiene and Toxicology* Vol 2A. 3rd revised ed. New York, Chichester, Brisbane, Toronto: John Wiley & Sons, 1728-1740.
- Stolarz, M. et collab. (2015). "Lithium distinguishes between growth and circumnutation and augments glutamate-induced excitation of *Helianthus annuus* seedlings". *Acta Physiologiae Plantarum* **37**: 69.
- Szeleszczuk, P. et collab. (2004). "Evaluation of lithium and selenium toxicity for chicken embryos and one-day-old chicks". *Medycyna Weterynaryjna* **60**: 492-495.
- Szklarska, D. et P. Rzymiski (2019). "Is lithium a micronutrient? From biological activity and epidemiological observation to food fortification". *Biological Trace Element Research* **189**(1): 18-27.
- Tan, H. et collab. (2012). "Geothermal constraints on enrichment of boron and lithium in salt lakes: An example from a river-salt lake system on the northern slope of the eastern Kunlun Mountains, China". *Journal of Asian Earth Sciences* **51**: 21-29.
- Tan, H. B. et collab. (2018). "Enrichment mechanism of Li, B and K in the geothermal water and associated deposits from the Kawu area of the Tibetan plateau: Constraints from geochemical experimental data". *Applied Geochemistry* **93**: 60-68.

- Tandon, A. et collab. (1998). "Effect of lithium on hepatic lipid peroxidation and antioxidative enzymes under different dietary protein regimens". *Journal of Applied Toxicology* **18**(3): 187-190.
- Tatara, C. P. et collab. (1998). "Use of ion characteristics to predict relative toxicity of mono-, di- and trivalent metal ions: *Caenorhabditis elegans* LC50". *Aquatic Toxicology* **42**(4): 255-269.
- Thimann, K. V. et C. L. Schneider (1938). "The role of salts, hydrogen-ion concentration and agar in the response of the avena coleoptile to auxins". *American Journal of Botany* **25**(4): 270-280.
- Tölgyesi, G. (1983). "Distribution of lithium in Hungarian soils and plants". Dans : Anke M, Baumann W, Braunlich H, editors. *Lithium 4. Spurenelement symposium; Jena*. 1983. p. 39-44.
- Tomascak, P. B. (2004). "Developments in the understanding and application of lithium isotopes in the earth and planetary sciences". *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* **55**(1): 153-195.
- Tomascak, P. B. et collab. (2003). "The lithium isotopic composition of waters of the Mono Basin, California". *Geochimica et Cosmochimica Acta* **67**(4): 601-611.
- Toplan, S. et collab. (2016). "The effects of lithium administration on oxidant/antioxidant status in rats: Biochemical and histomorphological evaluations". *Biological Trace Element Research* **169**(2): 279-284.
- Trautner, E. et collab. (1958). "The effects of prolonged sub-toxic lithium ingestion on pregnancy in rats". *Australian Journal of Experimental Biology and Medical Science* **36**(4): 305-322.
- Tsuruta, T. (2005). "Removal and recovery of lithium using various microorganisms". *Journal of Bioscience and Bioengineering* **100**(5): 562-566.
- Voelcker, J. A. (1912). "Pot culture experiments, 1910–11–12. I. Hills' experiments". *Journal of the Royal Agricultural Society of England* **73**: 314–325.
- Yalamanchali, R. (2012). *Lithium, an Emerging Environmental Contaminant, is Mobile in the Soil-Plant System*. Ph.D. Thesis, Lincoln University, Lincoln, New Zealand.
- Yang, Y. et collab. (2021). "On the sustainability of lithium ion battery industry – A review and perspective". *Energy Storage Materials* **36**: 186-212.
- Youngsook, H. et collab. (1998). "Lithium and its isotopes in major world rivers: implications for weathering and the oceanic budget". *Geochimica et Cosmochimica Acta* **62**(12): 2039-2051.
- Wanger, T. (2011). "The Lithium future – resources, recycling, and the environment". *Conservation Letters* **4**: 202-206.
- Wallace, A. et collab. (1977). "Lithium toxicity in plants". *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **8**(9): 773-780.
- Wedepohl, K. H. (1995). "The composition of the continental crust". *Geochimica et Cosmochimica Acta* **59**: 1217-1232.
- Werner, S. J. et F. D. Provenza (2011). "Reconciling sensory cues and varied consequences of avian repellents". *Physiology and Behavior* **102**(2): 158-163.
- Witherow, R. A. et collab. (2010). "Lithium isotopic composition of the McMurdo Dry Valleys aquatic systems". *Chemical Geology* **275**(3-4): 139-147.

Annexe 1 – Liste de minerais contenant du lithium

Nom du minéral	Formule chimique
Aleksandrovite	$\text{KLi}_3\text{Ca}_7\text{Sn}_2[\text{Si}_6\text{O}_{18}]_2\text{F}_2$
Alumino-ottoliniite	$\text{NaLi}(\text{Mg}_3\text{Al}_2)\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
Amblygonite	$(\text{Li},\text{Na})\text{AlPO}_4(\text{F},\text{OH})$
Balestraite	$\text{KLi}_2\text{VSi}_4\text{O}_{12}$
Balipholite	$\text{BaMg}_2\text{LiAl}_3(\text{Si}_2\text{O}_6)_2(\text{OH};\text{F})_8$
Baratovite	$\text{KLi}_3\text{Ca}_7(\text{Ti};\text{Zr})_2\text{Si}_{12}\text{O}_{36}\text{F}_2$
Berezanskite	$\text{KTi}_2\text{Li}_3\text{Si}_{12}\text{O}_{30}$
Bertossaite	$\text{Li}_2\text{CaAl}_4(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_4$
Bikitaite	$\text{Li}_2[\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{12}]\cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Bityite	$\text{CaLiAl}_2(\text{AlBeSi}_2)\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
Borocookeite	$\text{LiAl}_4(\text{Si}_3\text{B})\text{O}_{10}(\text{OH})_8$
Brannockite	$\text{KSn}_2(\text{Li}_3\text{Si}_{12})\text{O}_{30}$
Bulgakite	$\text{Li}_2(\text{Ca},\text{Na})\text{Fe}^{2+}_7\text{Ti}_2(\text{Si}_5\text{O}_{12})_2\text{O}_2(\text{OH})_4(\text{F},\text{O})(\text{H}_2\text{O})_2$
Ciprianiite	$\text{Ca}_4[(\text{Th},\text{U})(\text{REE})]\text{Al}_2(\text{Si}_4\text{B}_4\text{O}_{22})(\text{OH},\text{F})_2$
Clino-ferri-holmquistite	$\text{Li}_2\{\text{Mg}_3\text{Fe}^{3+}_2\}(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$
Clino-ferro-ferri-holmquistite	$\text{Li}_2((\text{Fe}^{3+})_2(\text{Fe}^{2+})_3)\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
Clinoferroholmquistite	$\text{Li}_2[\text{Fe}^{2+}_3\text{Al}_2]\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH},\text{F})_2$
Clinoholmquistite	$(\text{Li}_2\text{Mg}_3\text{Al}_2)\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
Colquiriite	CaLiAlF_6
Cookeite	$(\text{Al},\text{Li})_3\text{Al}_2(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$
Cryolithionite	$\text{Na}_3\text{Al}_2(\text{LiF}_4)_3$
Darapiosite	$\text{KNa}_2\text{Mn}_2(\text{Li}_2\text{ZnSi}_{12})\text{O}_{30}$
Darrellhenryite	$\text{Na}(\text{LiAl}_2)\text{Al}_6(\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{OH})_3\text{O}$
Dilithium telluride	Li_2Te
Diomignite	$\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$
Dusmatovite	$\text{KK}_2\text{Mn}_2(\text{Zn}_2\text{LiSi}_{12})\text{O}_{30}$
Elbaite	$\text{Na}(\text{Al}_{1.5}\text{Li}_{1.5})\text{Al}_6(\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{OH})_4$
Eliseevite	$\text{Na}_{1.5}\text{Li}\{\text{Ti}_2\text{O}_2[\text{Si}_4\text{O}_{10.5}(\text{OH})_{1.5}]\}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Nom du minéral	Formule chimique
Emeleusite	$\text{Na}_2\text{LiFe}^{3+}\text{Si}_6\text{O}_{15}$
Ephesite	$\text{NaLiAl}_2(\text{Si}_2\text{Al}_2)\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
Eucryptite	LiAlSiO_4
Faizievite	$\text{Li}_6\text{K}_2\text{Na}(\text{Ca}_6\text{Na})\text{Ti}_4(\text{Si}_6\text{O}_{18})_2(\text{Si}_{12}\text{O}_{30})\text{F}_2$
Ferri-fluoro-leakeite	$\text{Na}\{\text{Na}_2\}\{\text{Mg}_2\text{Fe}^{3+}_2\text{Li}\}(\text{Si}_8\text{O}_{22})\text{F}_2$
Ferri-leakeite	$[\text{Na}][\text{Na}_2][\text{Mg}_2\text{Fe}^{3+}_2\text{Li}]\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
Ferri-ottoliniite	$(\text{Na},\text{Li})(\text{Mg}_3\text{Fe}^{3+}_2)(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$
Ferripedizite	$\text{NaLi}_2((\text{Fe}^{3+})_2\text{Mg}_2\text{Li})\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
Ferrisicklerite	$\text{Li}_{1-x}(\text{Fe}^{3+}_x\text{Fe}^{2+}_{1-x})\text{PO}_4$
Ferriwhittakerite	$\text{Na}(\text{Na},\text{Li})(\text{Mg}_2\text{Fe}^{3+}\text{Li})(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$
Ferro-ferri-fluoro-leakeite	$\text{NaNa}_2(\text{Fe}^{2+}_2\text{Fe}^{3+}_2\text{Li})\text{Si}_8\text{O}_{22}\text{F}_2$
Ferro-ferri-pedrizite	$\text{NaLi}_2((\text{Fe}^{3+})_2(\text{Fe}^{2+})_3)\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
Ferro-fluoro-leakeite'	$\text{NaNa}_2(\text{Fe}^{2+}_2\text{Al}_2\text{Li})(\text{Si}_8\text{O}_{22})\text{F}_2$
Ferro-holmquistite	$\text{Li}_2(\text{Fe}^{2+}_3\text{Al}_2)(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$
Ferroleakeite	$\text{NaNa}_2(\text{Fe}^{2+}_2\text{Al}_2\text{Li})(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$
Ferro-pedrizite	$\text{Na}_2(\text{Fe}^{2+}_3\text{Al}_2)\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
Fluor-elbaite	$\text{Na}(\text{Li}_{1.5}\text{Al}_{1.5})\text{Al}_6(\text{Si}_6\text{O}_{18})(\text{BO}_3)_3(\text{OH})_3\text{F}$
Fluor-liddicoatite	$\text{Ca}(\text{Li}_2\text{Al})\text{Al}_6(\text{Si}_6\text{O}_{18})(\text{BO}_3)_3(\text{OH})_3\text{F}$
Fluoro-leakeite	$\text{NaNa}_2(\text{Mg}_2\text{Al}_2\text{Li})(\text{Si}_8\text{O}_{22})\text{F}_2$
Fluoro-Liddicoatite	$\text{Ca}(\text{Li}_2\text{Al})\text{Al}_6(\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{OH})_3\text{F}$
Fluoro-pedrizite	$\text{NaLi}_2(\text{Mg}_2\text{Al}_2\text{Li})(\text{Si}_8\text{O}_{22})\text{F}_2$
Footemineite	$\text{Ca}_2\text{Mn}^{2+}\text{Mn}_2^{2+}\text{Mn}_2^{2+}\text{Be}_4(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_4\cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Gainesite	$\text{Na}_2(\text{Be},\text{Li})(\text{Zr},\text{Zn})_2(\text{PO}_4)_4\cdot 1-2\text{H}_2\text{O}$
Garmite	$\text{CsLiMg}_2(\text{Si}_4\text{O}_{10})\text{F}_2$
Gorbunovite	$\text{CsLi}_2(\text{Ti},\text{Fe})\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{F},\text{OH},\text{O})_2$
Griceite	LiF
Griphite	$\text{Na}_4\text{Li}_2\text{Ca}_6(\text{Mn}^{2+},\text{Fe}^{2+},\text{Mg})_{19}\text{Al}_8(\text{PO}_4)_{24}(\text{F},\text{OH})_8$
Hectorite	$\text{Na}_{0.3}(\text{Mg},\text{Li})_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
Holmquistite	$\text{Li}_2(\text{Mg},\text{Fe}^2)\text{Al}_2\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
Hsianghualite	$\text{Li}_2\text{Ca}_3(\text{BeSiO}_4)_3\text{F}_2$
Jadarite	$\text{LiNaSiB}_3\text{O}_7\text{OH}$
Katayamalite	$\text{KLi}_3\text{Ca}_7\text{Ti}_2(\text{SiO}_3)_{12}(\text{OH})_2$

Nom du minéral	Formule chimique
Kupletskite-(Cs)	$\text{Cs}_2\text{NaMn}^{2+}_7\text{Ti}_2(\text{Si}_4\text{O}_{12})_2\text{O}_2(\text{OH})_4\text{F}$
Lavinskyite	$\text{K}(\text{Li}, \text{Cu}, \text{Mg}, \text{Na})_2\text{Cu}_6(\text{Si}_4\text{O}_{11})_2(\text{OH})_4$
Leakeite	$\text{NaNa}_2(\text{Mg}_2\text{Al}_2\text{Li})(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$
Lépidolite	$\text{K}(\text{Li}, \text{Al})_3(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{F}, \text{OH})_2$
Liberite	$\text{Li}_2\text{BeSiO}_4$
Liddicoatite	$[\text{Ca}][\text{Li}_2\text{Al}][\text{Al}_6][(\text{OH})_3]\text{F}(\text{BO}_3)_3[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$
Lintisite	$\text{LiNa}_3\text{Ti}_2(\text{Si}_2\text{O}_6)_2\text{O}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Lithiomagnésite	$\text{Li}_2\text{Mg}(\text{CO}_3)_2$
Lithiomarsturite	$\text{LiMn}^{2+}_2\text{Ca}_2\text{Si}_5\text{O}_{14}(\text{OH})$
Lithiophilite	LiMnPO_3
Lithiophorite	$(\text{Al}, \text{Li})\text{MnO}_2(\text{OH})_2$
Lithiophosphate	Li_3PO_4
Lithiotantite	$\text{Li}(\text{Ta}, \text{Nb})_3\text{O}_8$
Lithiowodginite	LiTa_3O_8
Luanshiweiite	$\text{KLiAl}_{1.5}(\text{Si}_{3.5}\text{Al}_{0.5})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
Lunijianlaite	$\text{Li}_{0.7}\text{Al}_{6.2}(\text{AlSi}_7\text{O}_{20})(\text{OH}, \text{O})_{10}$
Magnésioneptunite	$\text{KNa}_2\text{Li}(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{Ti}_2\text{Si}_8\text{O}_{24}$
Magnésiostaurinite	$\text{Mg}(\text{Mg}, \text{Li})_3(\text{Al}, \text{Mg})_{18}\text{Si}_8\text{O}_{44}(\text{OH})_4$
Manandonite	$\text{Li}_2\text{Al}_4(\text{Si}_2\text{AlB})\text{O}_{10}(\text{OH})_8$
Mangani-dellavventuraite	$\{\text{Na}\}\{\text{Na}_2\}\{\text{MgMn}^{3+}_2\text{LiTi}^{4+}\}\text{Si}_8\text{O}_{22}\text{O}_2$
Manganoneptunite	$\text{KNa}_2\text{LiMn}^{2+}_2\text{Ti}_2\text{Si}_8\text{O}_{24}$
Masutomilite	$\text{KLiAlMn}^{2+}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{F}, \text{OH})_2$
Mccrillisite	$\text{NaCs}(\text{Be}, \text{Li})\text{Zr}_2(\text{PO}_4)_4 \cdot 1-2\text{H}_2\text{O}$
Montebrasite	$\text{LiAl}(\text{PO}_4)(\text{OH}, \text{F})$
Murakamiite	$\text{Ca}_2\text{LiSi}_3\text{O}_8(\text{OH})$
Nalipoite	NaLi_2PO_4
Nalivkinite	$\text{Li}_2\text{NaFe}^{2+}_7\text{Ti}_2(\text{Si}_4\text{O}_{12})_2\text{O}_2(\text{OH})_4\text{F}(\text{H}_2\text{O})_2$
Nambulite	$(\text{Li}, \text{Na})\text{Mn}_4\text{Si}_5\text{O}_{14}(\text{OH})$
Nanlingite	$\text{Na}(\text{Ca}_5\text{Li})\text{Mg}_{12}(\text{AsO}_3)_2[\text{Fe}(\text{AsO}_3)_6]\text{F}_{14}$
Nanpingite	$\text{CsAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH}, \text{F})_2$
Natronambulite	$(\text{Na}, \text{Li})(\text{Mn}, \text{Ca})_5\text{Si}_5\text{O}_{14}\text{OH}$
Neptunite	$\text{KNa}_2\text{Li}(\text{Fe}^{2+}, \text{Mn}^{2+})_2\text{Ti}_2\text{Si}_8\text{O}_{24}$

Nom du minéral	Formule chimique
Norrishite	$\text{KLiMn}^{3+}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}\text{O}_2$
Olympite	$\text{Na}_5\text{Li}(\text{PO}_4)_2$
Orlovite	$\text{KLi}_2\text{Ti}(\text{Si}_4\text{O}_{10})\text{OF}$
Oxo-mangani-leakeite	$\text{NaNa}_2(\text{Mn}^{3+}_4\text{Li})\text{Si}_8\text{O}_{22}\text{O}_2$
Pahasapaite	$\text{Li}_8(\text{Ca},\text{Li},\text{K})_{10.5}\text{Be}_{24}(\text{PO}_4)_{24} \cdot 38\text{H}_2\text{O}$
Palermoite	$\text{Li}_2\text{SrAl}_4(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_4$
Peatite-(beta)	$\text{Li}_4\text{Na}_{12}\text{Y}_{12}(\text{PO}_4)_{12}(\text{CO}_3)_4(\text{F},\text{OH})_8$
Pétalite	$\text{LiAlSi}_4\text{O}_{10}$
Pezzottaite	$\text{Cs}(\text{Be}_2\text{Li})\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$
Piergorite-(Ce)	$\text{Ca}_8(\text{Ce},\text{Th},\text{La},\text{Nd})_2(\text{Al}_{0.5},\text{Fe}^{3+}_{0.5})(\text{Li},\text{Be})_2\text{Si}_6\text{B}_8\text{O}_{36}(\text{OH},\text{F})_2$
Polyolithionite	$\text{KLi}_2\text{AlSi}_4\text{O}_{10}\text{F}_2$
Potassiccarpholite	$\text{K}(\text{Li},\text{Mn}^{2+})_2\text{Al}_4(\text{Si}_2\text{O}_6)_2(\text{OH},\text{F})_8$
Potassic-ferri-leakeite	$\text{K}[\text{Na}_2][\text{Mg}_2\text{Fe}^{3+}_2\text{Li}]\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
Potassic-leakeite	$\text{KNa}_2(\text{Mg}_2\text{Al}_2\text{Li})(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$
Potassic-mangani-leakeite	$[(\text{Na},\text{K})][\text{Na}_2][\text{Mg}_2\text{Mn}^{3+}_2\text{Li}]\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
Punkaruaivite	$\text{LiTi}_2(\text{HSi}_4\text{O}_{12})(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$
Ramikite-(beta)	$\text{Li}_4(\text{Na},\text{Ca})_{12}\text{Y}_6\text{Zr}_6(\text{PO}_4)_{12}(\text{CO}_3)_4\text{O}_4[(\text{OH}),\text{F}]_4$
Rankamaite	$(\text{Na},\text{K})_3(\text{Ta},\text{Nb},\text{Al})_{11}(\text{O},\text{OH})_{31}$
Rossmannite	$(\text{LiAl}_2)\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{BO}_3)_3(\text{OH})_4$
Salitote	$(\text{Li},\text{Na})\text{Al}_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_5$
Sicklerite	$\text{Li}_{1-x}(\text{Mn}^{3+}_x\text{Mn}^{2+}_{1-x})\text{PO}_4$
Silinaite	$\text{NaLiSi}_2\text{O}_5 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Simferite	$\text{Li}(\text{Mg},\text{Fe}^{3+},\text{Mn}^{3+})_2(\text{PO}_4)_2$
Simmonsite	$\text{Na}_2\text{LiAlF}_6$
Sodic-ferri-clinoferroholmquistite	$\text{Na}_{0.5}\{\text{Li}_2\}\{\text{Fe}^{2+}_3\text{Fe}^{3+}_2\}(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$
Sogdianite	$\text{KZr}_2\text{Li}_3\text{Si}_{12}\text{O}_{30}$
Sokolovaite	$\text{CsLi}_2\text{Al}(\text{Si}_4\text{O}_{10})\text{F}_2$
Salitote	$(\text{Li},\text{Na})\text{Al}_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_5$
Spodumène	$\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$
Sugilite	$\text{KNa}_2(\text{Fe},\text{Mn},\text{Al})_2\text{Li}_3\text{Si}_{12}\text{O}_{30}$
Swinefordite	$\text{Ca}_{0.2}(\text{Li},\text{Al},\text{Mg},\text{Fe})_3(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
Tainiolite	$\text{KLiMg}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}\text{F}_2$

Nom du minéral	Formule chimique
Tancoite	$\text{LiNa}_2\text{Al}(\text{PO}_4)(\text{HPO}_4)(\text{OH})$
Tanohataite	$\text{LiMn}_2(\text{HSi}_3\text{O}_9)$
Tavorite	$\text{LiFe}^{3+}(\text{PO}_4)(\text{OH})$
Tiptopite	$\text{K}_2(\text{Li,Na,Ca})_6(\text{Be}_6\text{P}_6)\text{O}_{24}(\text{OH})_2 \cdot 1.3\text{H}_2\text{O}$
Trilithionite	$\text{KLi}_{1.5}\text{Al}_{1.5}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}\text{F}_2$
Triphylite	$\text{Li}(\text{Fe,Mn})\text{PO}_4$
Virgilite	$\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$
Voloshinite	$\text{Rb}(\text{LiAl}_{1.5})(\text{Al}_{0.5}\text{Si}_{3.5})\text{O}_{10}\text{F}_2$
Walkerite	$\text{Ca}_{16}(\text{Mg,Li})_2[\text{B}_{13}\text{O}_{17}(\text{OH})_{12}]_4\text{Cl}_6 \cdot 28\text{H}_2\text{O}$
Watatsumiite	$\text{Na}_2\text{KLi}(\text{Mn}^{2+}, \text{Fe}^{2+})_2\text{V}^{4+}_2[\text{Si}_8\text{O}_{24}]$
Wilancookite	$(\text{Ba,K,Na})_8(\text{Ba,Li,[]})_6\text{Be}_{24}\text{P}_{24}\text{O}_{96} \cdot 32\text{H}_2\text{O}$
Zabuyelite	Li_2CO_3
Zektzerite	$\text{Li Na (Zr Ti H F) Si}_6\text{O}_{15}$
Zinnwaldite	$\text{KLiFeAl}(\text{AlSi}_3)\text{O}_{10}(\text{OH,F})_2$



**Environnement
et Lutte contre
les changements
climatiques**

Québec

