# LE CYCLE DU LITHIUM

***Webinaire n°6***
***Du 9 janvier 2025***
***Michel Jauzein,***
***Professeur de Science des Sols***

Arts et Métiers Sciences et Technologies

# Le cycle du Lithium

- Le Lithium et ses ressources planétaires
- Cycle biogéochimique du Lithium
- Usage et Cycle de vie du Lithium

Arts et Métiers Sciences et Technologies

# 1 – LE LITHIUM ET SES RESSOURCES PLANÉTAIRES

Arts et Métiers Sciences et Technologies

# Le Lithium : Li

- ***Un « métal léger »***
  - **Le métal alcalin le plus léger et le moins dense à l'état solide**
  - **Son nom vient du grec *lithos,* signifiant pierre**
  - **C'est l'un des trois éléments engendrés à la naissance de l'Univers avec l'Hélium (He) et l'Hydrogène (H)**
  - **Élément de prédilection pour les systèmes de stockage électrochimiques dans les batteries depuis 1970**
  - **Utilisé aussi dans les verres et les céramiques**
  - **Très réactif, on ne le retrouve pas à l'état natif**
- ***Un élément trace métallique de la croûte terrestre et des océans***
  - **Présent naturellement en faible quantité, mais toxique au-delà d'un certain seuil**
- ***Un élément trace de la biosphère, d'utilité hypothétique***
  - **C'est un oligo-élément éventuel, sans preuve qu'il est nécessaire à la vie**

Lithium, morceaux de métal mou

# Le Lithium : Li

***Numéro atomique 3***

**Masse atomique 6,94 g/mol.**

***Dureté 0,6***

**Masse volumique 0,534 g/cm³.**

**Température de fusion de 180,54°C**

Batteries au Lithium

***Teneur moyenne dans la croûte terrestre 20 ppm***

**On le retrouve dans les océans pour 0,18 mg/l et dans**

**des saumures issues de la lixiviation de roches riches en lithium ou des aluminosilicates dans des roches magmatiques**

***Le lithium est souvent accompagné d'autres « métaux légers »***

**Les métaux alcalins :**

**Na (sodium),**

**K (potassium)…**

© https://lelementarium.fr/element/lithium/

# Le Lithium Li : sels et minerais

- ***Les saumures carbonatées de lacs salés d'altitude***
  - **Les « salars » de la cordillère des Andes et du Tibet**
  - **On y retrouve le lithium sous forme cationique $Li^+$ :**

    **Principalement associé à l'hydrogénocarbonate $HCO_3^-$**

    **précipité $Li_2CO_3$ (carbonate de lithium)**
  - **La teneur en lithium peut atteindre 0,16 % (salar d'Atacama)**
- ***Les gisements aluminosilicatés de roches magmatiques***
  - **Dans des pegmatites riches en minéraux lithiés, notamment en Australie :**

    **$LiAl(SiO_3)_2$ (spodumène), $K(Li,Al)_3(Al,Si,Rb)_4O_{10}(F,OH)_2$ (lépidolite),**

    **$LiAlSi_4O_{10}$ (pétalite ou castorite)** Norseman (West Australia)

Tas de sels de lithium
Salar de Uyuni (Bolivie)

© CC Rob Lavinsky

© https://museum.wa.gov.au/research/collections/earth-and-planetary-sciences/rock-collection/lithium-rich-pegmatite-sinclair-mi

Cristal de Spodumène
Massachussets (Etats-Unis)

# Les gisements de Lithium Li

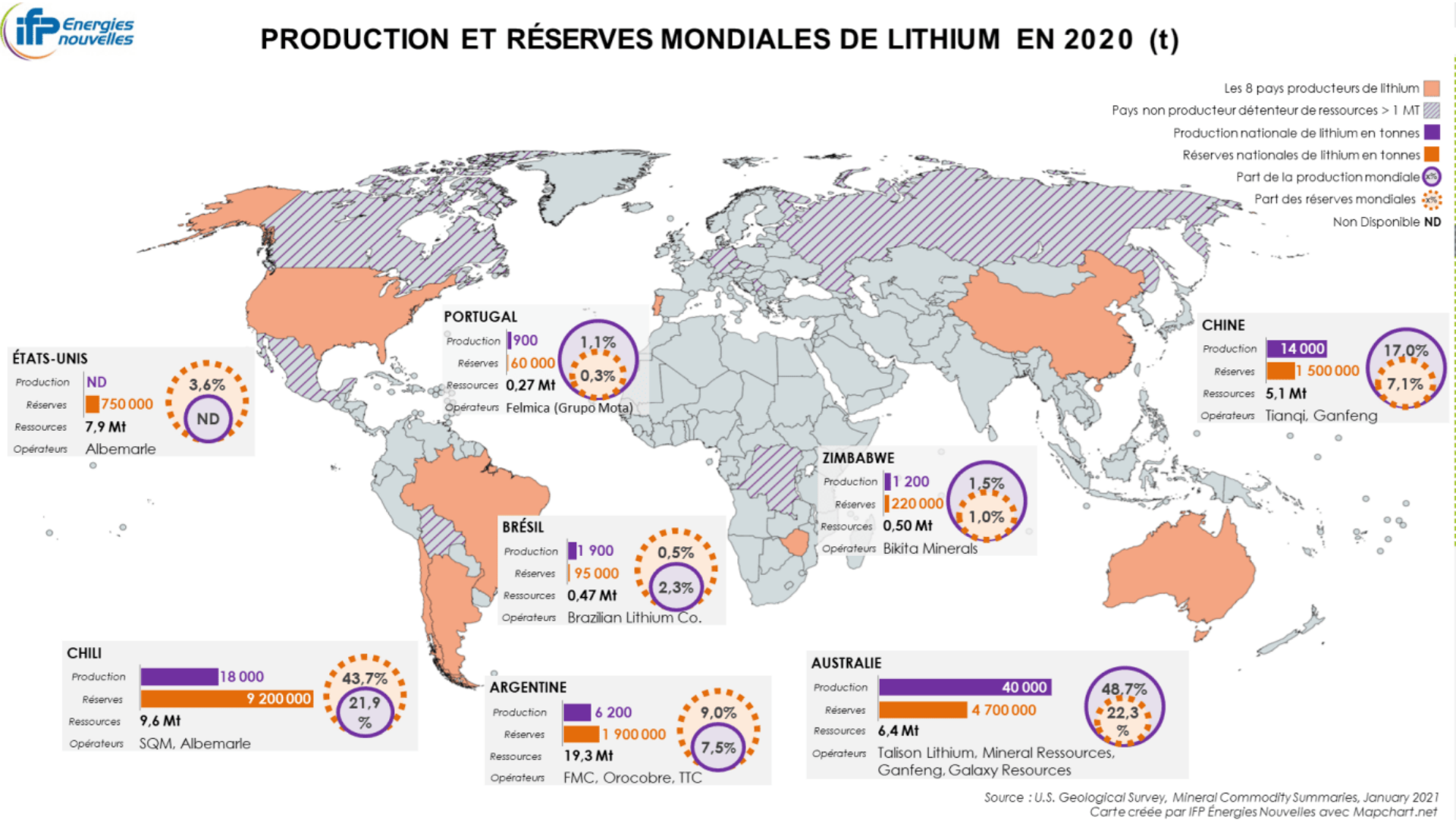
Productions en 2023, sur un total mondial de 182 000 t de Li contenu.

en tonnes de Li contenu

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Australie** | **86 000 t** | **Brésil** | **4 900 t** |
| **Chili** | **44 000 t** | **États-Unis, estimation** | **2 000 t** |
| **Chine** | **33 000 t** | **Canada** | **3 400 t** |
| **Argentine** | **9 600 t** | **Zimbabwe** | **3 400 t** |

*Source : USGS*

# Les gisements de Lithium Li



# 2.2 – CYCLE BIOGÉOCHIMIQUE DU LITHIUM

Arts et Métiers Sciences et Technologies

# Les données du cycle du Li

- ***W.H. Schlesinger, E.M. Klein, Z. Wang & A. Vengosh (2021)***
  - Global biogeochemical cycle of lithium. Global Biogeochemical Cycles, 35, e2021GB006999. https://doi.org/10.1029/2021GB006999
- ***Résumé traduit de la publication :***

  « Nous avons quantifié dans quelle mesure l'extraction du lithium par l'Homme, et d'autres moyens par lesquels le lithium est mobilisé à la surface de la Terre, peut être comparée aux phénomènes naturels qui génèrent du lithium dans l'environnement. Étant donné que le lithium, à des concentrations élevées, peut avoir des effets toxiques sur les plantes et les animaux, une comparaison entre les sources naturelles et humaines permet d'évaluer les impacts potentiels de l'augmentation de la production et de l'utilisation du lithium dans l'industrie électronique afin d'estimer la nécessité de recycler le lithium pour maintenir l'approvisionnement futur à l'usage de l'Homme.»
- ***Les données en flux de cette publication ont été utilisées***
  - Pour créer le schéma du cycle du lithium qui suit, afin d'illustrer les stocks et les flux de lithium sur les données 2000-2020

# Résumé scientifique sur le cycle du Li

Schlesinger, W. H., Klein, E. M., Wang, Z., & Vengosh, A. (2021). Global biogeochemical cycle of lithium. Global Biogeochemical Cycles, 35, e2021GB006999. https://doi. org/10.1029/2021GB006999

- ***Résumé scientifique traduit de la publication :***

  **« Le flux d'extraction anthropique du Li de la croûte terrestre, >1000 Gg/an, est bien plus important que celui mobilisé par les processus naturels d'altération chimique et mécanique (94 et 132 Gg/an respectivement), ce qui représente une perturbation d'environ 500 % du cycle global du Li par les activités humaines. La perturbation anthropique du cycle global du Li montre des rejets accrus dans les eaux douces par l'eau issue de l'exploitation du pétrole (46 Gg/an), la lixiviation des cendres de charbon (7 à 20 Gg/an) et l'exploitation des eaux souterraines (29 Gg/an). La somme de ces sources anthropiques fait plus que doubler le transport naturel de Li dissous dans les rivières vers les océans (69 Gg/an). Actuellement, les eaux usées contenant du Li issu des médicaments thérapeutiques, ou issu de l'élimination des batteries lithium-ion, ne représentent qu'une petite partie du transport de Li dans les rivières, même si ce dernier risque d'augmenter considérablement à mesure que les batteries lithium-ion domineront le stockage mondial de l'énergie. Les émissions humaines de particules de Li dans l'atmosphère (55 Gg/an provenant de la combustion du charbon) représentent environ 38 % des émissions de Li dans l'atmosphère provenant de diverses sources. Les apports dans l'atmosphère sont supérieurs au dépôt estimé de Li provenant de l'atmosphère, qui est mal cerné par les données disponibles.»**

# Estimation des stocks de Li

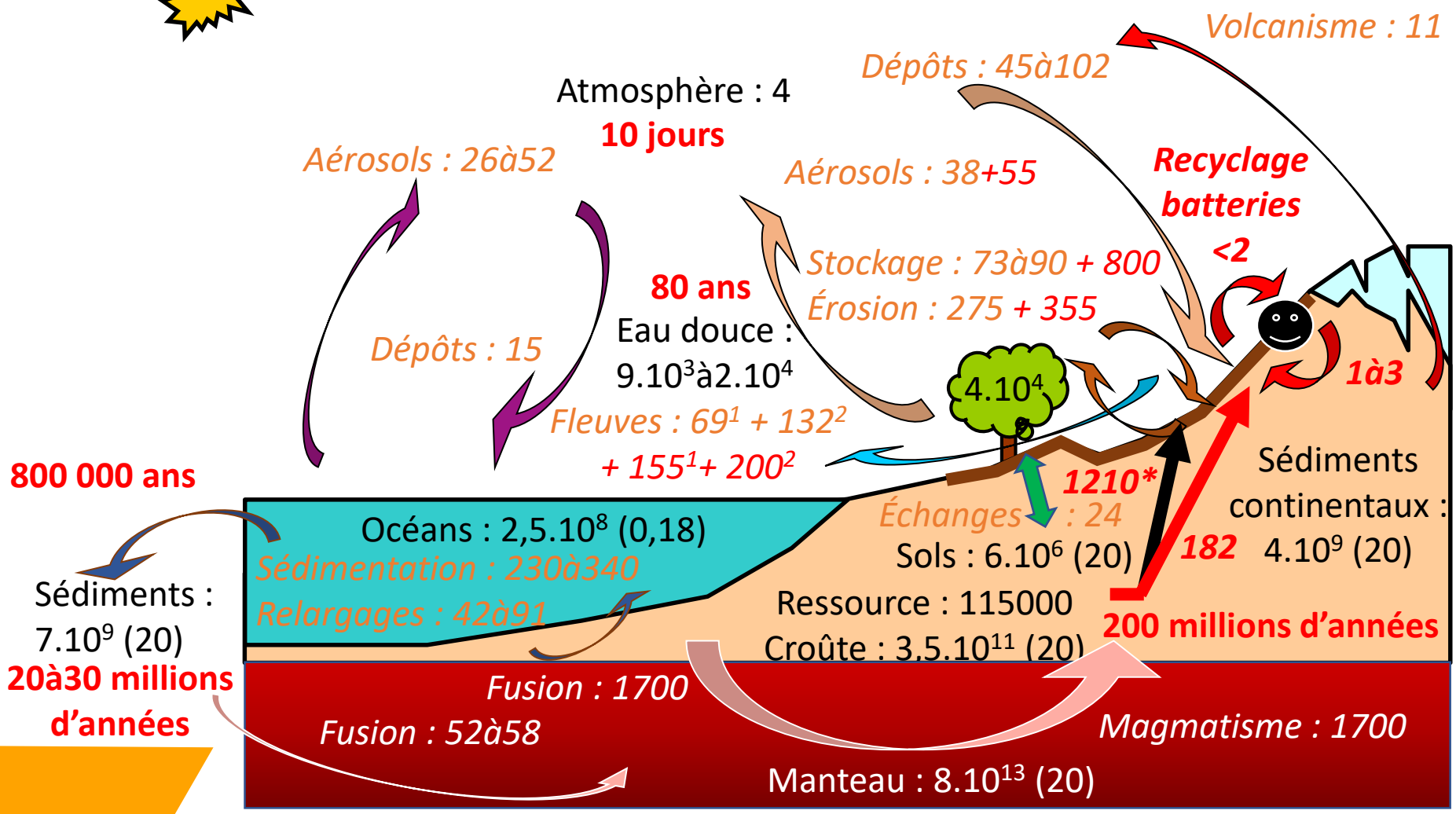
- ***Dans l'atmosphère et les rivières***
  - Le temps de séjour τ a été estimé par analogie au cuivre, et le stock par le produit F x τ
- ***Dans les océans***
  - Le stock a été estimé avec la concentration connue de Li dans l'eau de mer, et le temps de séjour en fonction des flux par le rapport S / F
- ***Dans les roches***
  - Les stocks ont été estimés à partir de la teneur moyenne de Li dans la croûte terrestre estimée à 20 ppm, et au prorata de la teneur en cuivre dans les différents compartiments (sédiments, sols, croûte terrestre et manteau)
  - Les flux du cycle géologique ont été estimés par analogie au cuivre pour les temps de séjours, et avec le rapport S / τ
- ***Flux du cycle anthropique du Li extrait pour les batteries***
  - Des données plus récentes (2023) pour les flux d'extraction et de recyclage ont été utilisées

# Stocks et Flux de Li

2020

Unités : Gg (ppm) ; *Gg/an*

* Li issu de l'extraction des énergies fossiles

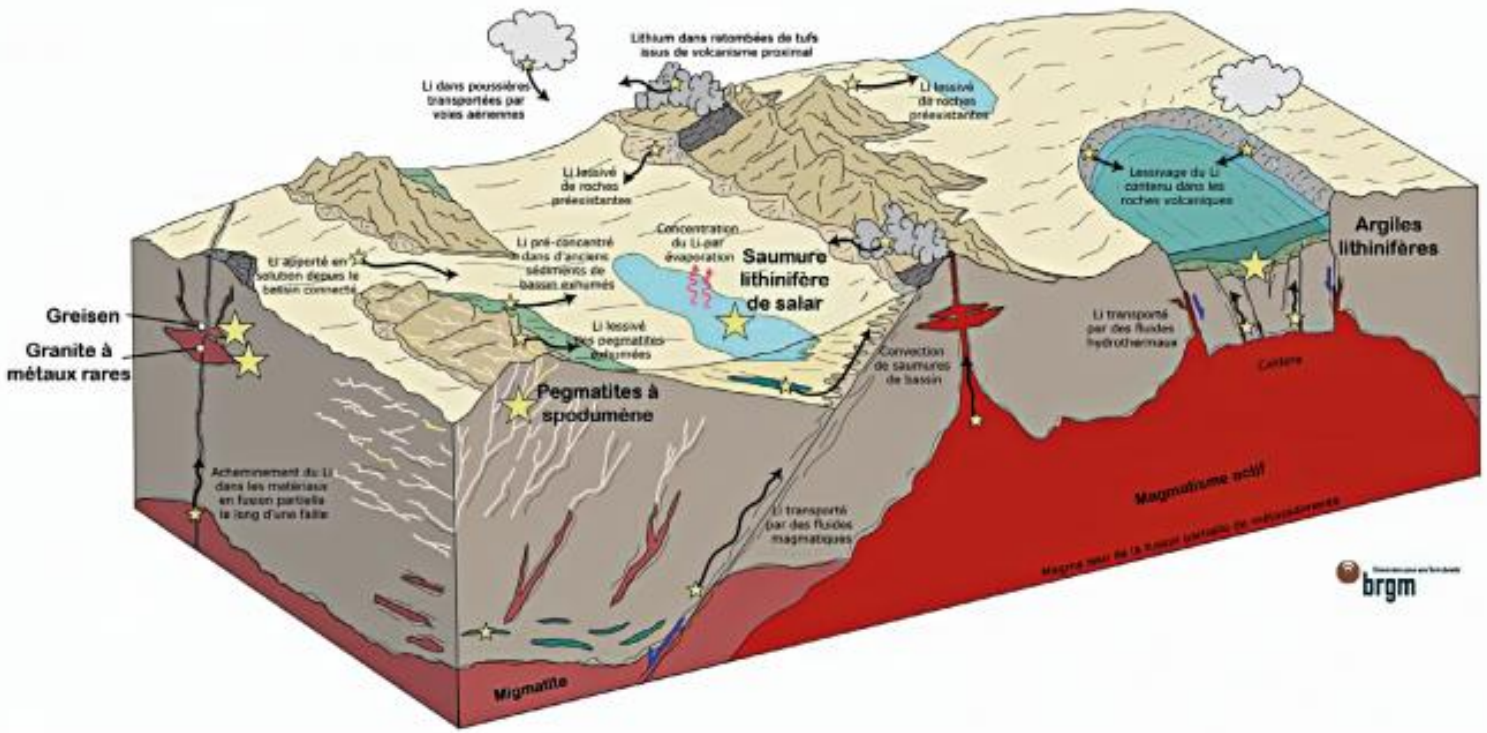



[1] en solution, [2] en suspension

© Schéma personnel, Michel Jauzein, 2024

# Dans la lithosphère, formation des gisements de sels et minéraux du lithium :

## L'ORIGINE GÉOLOGIQUE DES PRINCIPALES SOURCES ÉCONOMIQUES DE LITHIUM MONDIALES EN 2019




**Échelle non représentative**
Liste non-exhaustive des ressources potentielles de lithium (e.g ne sont pas représentées les saumures géothermales et pétrolifères, jadarite etc.)

- Gisement de lithium
- Source de lithium
- Failles normales
- Volcan néogène

- Volcan néogène
- Salar
- Cône alluvial proximal
- Autres sédiments de bassin moderne
- Anciens sédiments de bassins exhumés
- Roches exhumées indifférenciées

- Paléosédiments riches en lithium
- Roches sous-jacentes indifférenciées
- Hectorite
- Roches volcaniques
- Pegmatites lithinifères
- Pegmatites non-lithinifères

# Bienfaits et méfaits du Lithium pour l'Homme et les animaux

- ***Effets thymorégulateur et antidépresseur chez l'homme***
  - **Mécanismes encore mal connus**
  - **Etroite fourchette de doses pour des effets efficaces (0,8 à 1,2 mmol/l)**
  - **Minimum nécessaire pour un homme < 0,1 mg/jour**
  - **Maximum reconnu sans effet sur l'homme 10 mg/jour**
  - **Recommandation actuelle 1 mg/jour**
- ***Effets toxiques chez l'homme***
  - **Rapidement un dysfonctionnement des reins**
  - **A partir de 1,5 mmol/l, confusion et tremblements**
  - **A partir de 3 mmol/l, risque de coma et de décès**
  - **A plus faible exposition mais de manière chronique, risques d'hypercalcémie, de dysfonctionnement thyroïdien ou cardio-vasculaire**
  - **Néphrotoxicité à faibles doses d'exposition chronique**
- ***Sur les animaux***
  - **DL50 du rat vers 1g/kg**

DL50 = Dose Létale 50%

# Valeurs écotoxicologiques de référence proposées au Québec

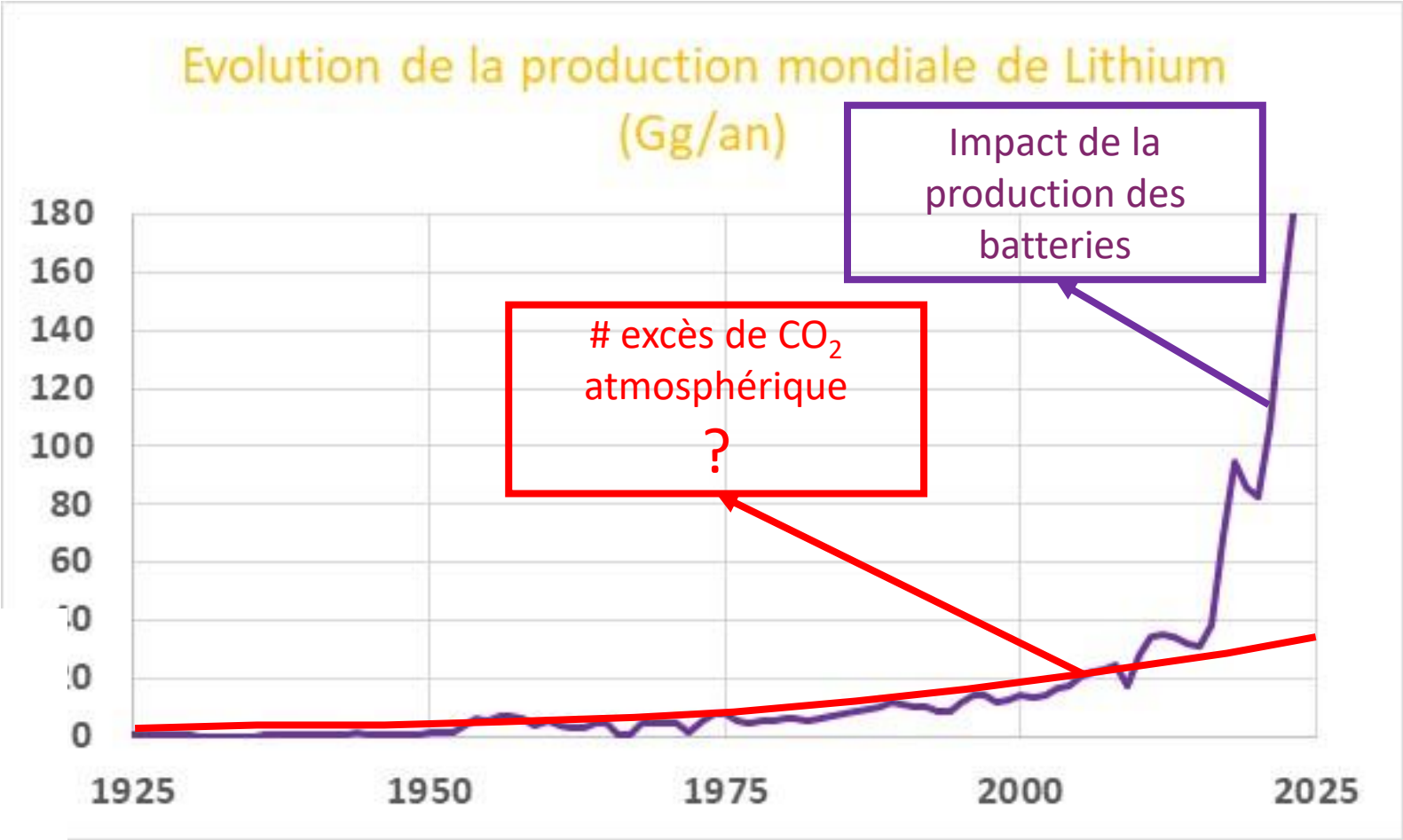
- ***Suivant les données de toxicité expérimentales disponibles***
  - **Pour les plantes :**
    - **une valeur de 20,3 mg/kg est proposée pour des milieux sensibles**
    - **une valeur de 26,8 mg/kg est proposée pour un usage résidentiel ou de détente**
    - **une valeur de 59,1 mg/kg est proposée pour un usage commercial ou industriel**
  - **Pour les mammifères :**
    - **une valeur de 15 mg/kg de poids corporel/jour est proposée pour un usage résidentiel ou de détente**
    - **une valeur de 28 mg/kg de poids corporel/jour est proposée pour un usage commercial ou industriel**

**référence : https://www.ceaeq.gouv.qc.ca/ecotoxicologie/revue_lithium.pdf**

# 2.3 – USAGE ET CYCLE DE VIE DU LITHIUM

Arts et Métiers Sciences et Technologies

# Production minière de Lithium 1925-2025




© d'après les données de l'USGS (2023) compilées par T.D. Kelly, J.A. Ober, and B.W. Jaskula.
et les données de https://fr.statista.com/statistiques/702647/production-lithium-en-mine-monde/

# Consommation de Lithium dans les batteries en 2014

Consommation de lithium, en 2014, dans des batteries

| Appareils | Nombre d'unités, en millions | Masse de Li par unité | Masse totale de Li contenu |
|---|---|---|---|
| Smartphones | 1 200 | 0,9 à 1,3 g | 1 320 t |
| Tablettes | 260 | 3,7 à 5,6 g | 1 210 t |
| Ordinateurs portables | 170 | 6,6 à 8,5 g | 1 280 t |
| Outils portables | 65 | 7,5 à 11,3 g | 610 t |
| Véhicules hybrides | 1,8 | 0,9 kg | 1 690 t |
| Véhicules électriques | 0,3 | 7,5 à 15 kg | 3 380 t |
| Batteries stationnaires | | 0,3 t | 190 t |

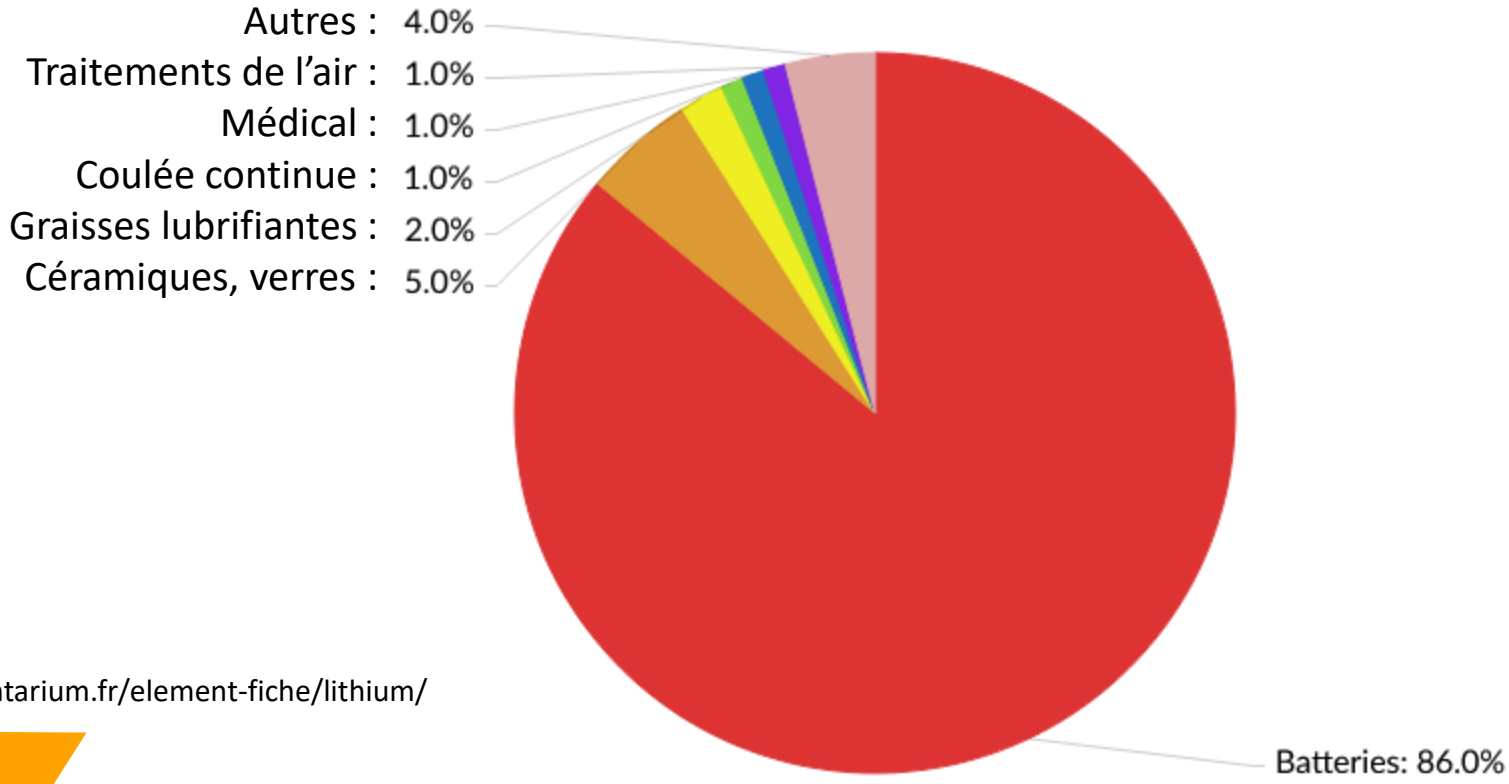
*Source : Albemarle*

© https://lelementarium.fr/element-fiche/lithium/

# Consommation de Lithium en 2023

La consommation mondiale, en 2023, est de 839 000 t en équivalent de carbonate de lithium.

## Secteurs d'utilisation du lithium




*En 2023, dans le monde. Source : Eramet*

© https://lelementarium.fr/element-fiche/lithium/

# Recyclage du Lithium

- ***Faible aujourd'hui***
  - **Environ 1 %**
- ***Dans les verres et les céramiques***
  - **Trop dispersé pour être recyclé aujourd'hui**
- ***Dans les batteries***
  - **Les procédés de recyclage du Lithium se développent depuis 2015**
  - **Retriev Technologies (Lancaster, Ohio, USA), Umicore (Hoboken, Belgique), Récupyl (Domène, France)…**
- ***Un challenge important pour la filière des véhicules électriques***
  - **Concevoir une économie circulaire du lithium utilisé pour le développement des véhicules électriques**
  - **Pour baisser la dépendance vis-à-vis des ressources extractibles et les impacts liés aux besoins en eau des procédés d'extraction et de production**
  - **Pour éviter la génération importante de déchets susceptibles de libérer du lithium en forte concentration dans les eaux continentales**

# Impact énergétique des procédés comparaison Li et Cu

| Métal | Energie pour la production primaire (MJ/kg) | Energie pour la transformation (MJ/kg produit) |
|---|---|---|
| Lithium | 380-850 | 12 (batteries) |
| Cuivre | 30-90 | 3 (câbles) |

© UNEP, Environmental risks and challenges of anthropogenic metals flows and cycles, Editor: International Resource Panel, Working Group on the Global Metal Flows

# Impact hydrique des procédés

| CONSOMMATION D'EAU SELON LES PROCÉDÉS D'EXTRACTION | LITHIUM PRODUIT À PARTIR DE ROCHES DURES | LITHIUM ISSU DES SALARS |
|---|---|---|
| **Quantité d'eau douce utilisée par tonne d'équivalent carbonate de lithium* produit (en m³)** | 77 | 45 |
| **Quantités de saumures utilisées par tonne d'équivalent carbonate de lithium produit (en m³)** | 0 | 221 |
| **Quantités d'eau totales consommées par tonne d'équivalent carbonate de lithium* produit (en m³)** | 77 | 266 |

Source : https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105762 - Assumptions for Brine requirement Li Content: 0.17% Yield: 50%.

# Cycle du lithium : principales conclusions

- ***Des flux anthropiques qui s'imposent***
  - Un flux lié à l'exploitation des énergies fossiles (pétrole et charbon) qui domine encore et a fortement modifié le cycle du lithium dans les eaux continentales et océaniques (environ 1210 Gg/an)
  - Un flux lié à l'extraction du lithium qui s'amplifie avec le développement des véhicules électriques, mais qui n'impacte pas encore le cycle du lithium déjà fortement anthropisé (environ 180 Gg/an en 2023)
  - Un recyclage aujourd'hui très faible du lithium des batteries (< 1 %).
- ***Des stocks importants dans les roches souterraines et l'océan***
  - avec des réserves exploitables identifiées en plein développement.
- ***Des émissions lithiées diffuses, liées à l'exploitation et l'usage des énergies fossiles, qui rejoignent les océans***
  - Environ 550 Gg/an rejoint les océans (66 % anthropique, 40 % $Li^+$ en solution) et s'y accumule pour partie comme le sodium ($Na^+$)
- ***Un réel besoin de généraliser le recyclage du lithium des batteries, et de limiter les autres émissions anthropiques***
  - Et peut-être de pouvoir récupérer le lithium des cendres, des eaux usées ou souterraines enrichies, ou de l'eau de mer ?

Arts et Métiers Sciences et Technologies

ARTSETMETIERS.FR