

LA GÉOLOGIE DU LITHIUM

Eric Legendre

AGO de Minéraux et Fossiles des Pyrénées

Morlaàs – 18 février 2023

Canada

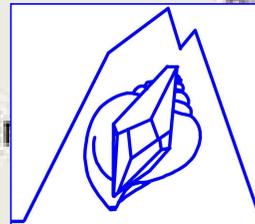
U.S.

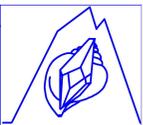
China

Chile

Argentin

Australia





Sommaire

Introduction

Géologie du lithium

Le traitement

En Europe

En France

Canada

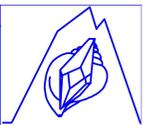
China

Chile

Argentina

Australia





Canada

Introduction

China

Chile

Argentina

Australia





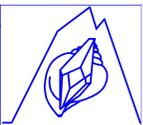
Pourquoi le lithium est-il à la mode ?

- **L'énergie (plus précisément l'accès à une énergie bon marché) est centrale dans le modèle de développement actuel**
- **La transition (d'une économie carbonée basée sur l'exploitation des combustibles fossiles vers une économie "électrique") nécessite le stockage de l'électricité**
- **La technologie la + couramment retenue est le stockage électrochimique dans des batteries au lithium**
 - **La technologie des batteries lithium-ion est une solution prouvée pour le stockage d'énergie sous forme électrique, mais les attentes et la demande induites semblent beaucoup trop importantes (capacités d'extraction mondiale, recyclage)**

→ Cela pourrait entraîner une dépendance forte de notre développement économique au lithium comme précédemment pour le pétrole

→ Mais ... la transition écologique et l'électrification des gammes promettaient des véhicules plus économes, plus légers, plus partagés... le marketing de l'abondance l'emporte sur celui de la sobriété, ce qui aura des conséquences économiques et écologiques (S. Lauer, Le Monde – 9 jan 2023)

→ Des techniques alternatives doivent être développées



Buts de cet exposé

**1) On va s'intéresser au lithium sous son aspect géologique
(minéraux, types de gisement)
et on oublie (pour l'instant !) la géopolitique**

**2) On va voir où on en trouve en particulier en Europe et en France
... et si on a pu en rencontrer lors des prospections de MFP64**

Canada

China

Argentina

Lithium (numéro atomique 3) = métal alcalin mou, gris-argenté (le + léger de tous les métaux) synthétisé lors du Big Bang avec H et He

- Très réactif → Li jamais présent à l'état natif dans la nature, mais uniquement sous forme de composés ioniques
- Teneur estimée : 20 ppm dans la croûte continentale supérieure (4.3 ppm croûte océanique et 1.6 ppm manteau) (35 ppm croûte continentale sup. & 12 ppm croûte océanique selon le BRGM) → **33^{ème} élt le + abondant sur Terre**
- Teneur totale en Li très importante et estimée à 230 milliards de tonnes (Li présent à une concentration relativement constante de 0.14 à 0.25 ppm mais fortes concentrations approchant 7 ppm trouvées près d'événements hydrothermaux)

Tableau périodique des éléments chimiques

Groupe → I A 18
 Période ↓ 1 2 3 4 5 6 7

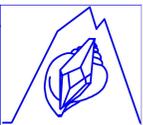
← nom de l'élément (gaz, liquide ou solide à 0°C et 101,3 kPa)
 ← numéro atomique
 ← symbole chimique
 ← masse atomique relative (ou celle de l'isotope le plus stable)
 © I.C.I.A.A.W. "Atomic Weights 2013" + rev. 2015

Hydrogène 1 H 1,007975																	Hélium 2 He 4,002602	
Lithium 3 Li 6,9395	Béryllium 4 Be 9,0121831											Bore 5 B 10,8135	Carbone 6 C 12,0106	Azote 7 N 14,006855	Oxygène 8 O 15,99940	Fluor 9 F 18,99840316	Néon 10 Ne 20,1797 (6)	
Sodium 11 Na 22,98976928	Magnésium 12 Mg 24,3055							VIII			II B		Aluminium 13 Al 26,9815385	Silicium 14 Si 28,085 (1)	Phosphore 15 P 30,97376200	Soufre 16 S 32,0675	Chlore 17 Cl 35,4515	Argon 18 Ar 39,948 (1)
Potassium 19 K 39,0983 (1)	Calcium 20 Ca 40,078 (4)	Scandium 21 Sc 44,955908 (6)	Titane 22 Ti 47,867 (1)	Vanadium 23 V 50,9415 (1)	Chrome 24 Cr 51,9961 (6)	Manganèse 25 Mn 54,938044	Fer 26 Fe 55,845 (2)	Cobalt 27 Co 58,933194	Nickel 28 Ni 58,6934 (4)	Cuivre 29 Cu 63,546 (3)	Zinc 30 Zn 65,38 (2)	Gallium 31 Ga 69,723 (1)	Germanium 32 Ge 72,630 (6)	Arsenic 33 As 74,921595	Sélénium 34 Se 78,971 (8)	Brome 35 Br 79,904	Krypton 36 Kr 83,798 (2)	
Rubidium 37 Rb 85,4678 (3)	Strontium 38 Sr 87,62 (1)	Yttrium 39 Y 88,90584	Zirconium 40 Zr 91,224 (2)	Niobium 41 Nb 92,90637	Molybdène 42 Mo 95,95 (1)	Technétium 43 Tc [98]	Ruthénium 44 Ru 101,07 (2)	Rhodium 45 Rh 102,90550	Palladium 46 Pd 106,42 (1)	Argent 47 Ag 107,8682 (2)	Cadmium 48 Cd 112,414 (4)	Indium 49 In 114,818 (1)	Étain 50 Sn 118,710 (7)	Antimoine 51 Sb 121,760 (1)	Tellure 52 Te 127,60 (3)	Iode 53 I 126,90447	Xénon 54 Xe 131,293 (6)	
Césium 55 Cs 132,905452	Baryum 56 Ba 137,327 (7)	Lanthanides 57-71		Hafnium 72 Hf 178,49 (2)	Tantale 73 Ta 180,94788	Tungstène 74 W 183,84 (1)	Rhénium 75 Re 186,207 (1)	Osmium 76 Os 190,23 (3)	Iridium 77 Ir 192,22 (3)	Platine 78 Pt 195,084 (6)	Or 79 Au 196,966569	Mercur 80 Hg 200,592 (3)	Thallium 81 Tl 204,3835	Plomb 82 Pb 207,2 (1)	Bismuth 83 Bi 208,98040	Polonium 84 Po [209]	Astato 85 At [210]	Radon 86 Rn [222]
Francium 87 Fr [223]	Radium 88 Ra [226]	Actinides 89-103		Rutherfordium 104 Rf [267]	Dubnium 105 Db [268]	Seaborgium 106 Sg [269]	Bohrium 107 Bh [270]	Hassium 108 Hs [277]	Méitnerium 109 Mt [278]	Darmstadtium 110 Ds [281]	Roentgenium 111 Rg [282]	Copernicium 112 Cn [285]	Nihonium 113 Nh [286]	Flerovium 114 Fl [289]	Moscovium 115 Mc [289]	Livermorium 116 Lv [293]	Tennesse 117 Ts [294]	Oganesson 118 Og [294]
Lanthane 57 La 138,90547	Cérium 58 Ce 140,116 (1)	Praséodyme 59 Pr 140,90766	Néodyme 60 Nd 144,242 (3)	Prométhium 61 Pm [145]	Samarium 62 Sm 150,36 (2)	Europium 63 Eu 151,964 (1)	Gadolinium 64 Gd 157,25 (3)	Terbium 65 Tb 158,92535	Dysprosium 66 Dy 162,500 (1)	Holmium 67 Ho 164,93033	Erbium 68 Er 167,259 (3)	Thulium 69 Tm 168,93422	Ytterbium 70 Yb 173,045	Lutécium 71 Lu 174,9668				
Actinium 89 Ac [227]	Thorium 90 Th 232,0377	Protactinium 91 Pa 231,03588	Uranium 92 U 238,02891	Néptunium 93 Np [244]	Plutonium 94 Pu [244]	Americium 95 Am [243]	Curium 96 Cm [247]	Berkélium 97 Bk [247]	Californium 98 Cf [251]	Einsteinium 99 Es [252]	Fermium 100 Fm [257]	Mendélévium 101 Md [258]	Nobelium 102 No [259]	Lawrencium 103 Lr [266]				

Source : Wikipedia / Bradley et al. (USGS – 2017)



Lithium flottant sur des HC liquides $d = 0.53$
(très réactif et inflammable
→ doit être stocké dans de l'huile minérale)
Photo Wikipédia

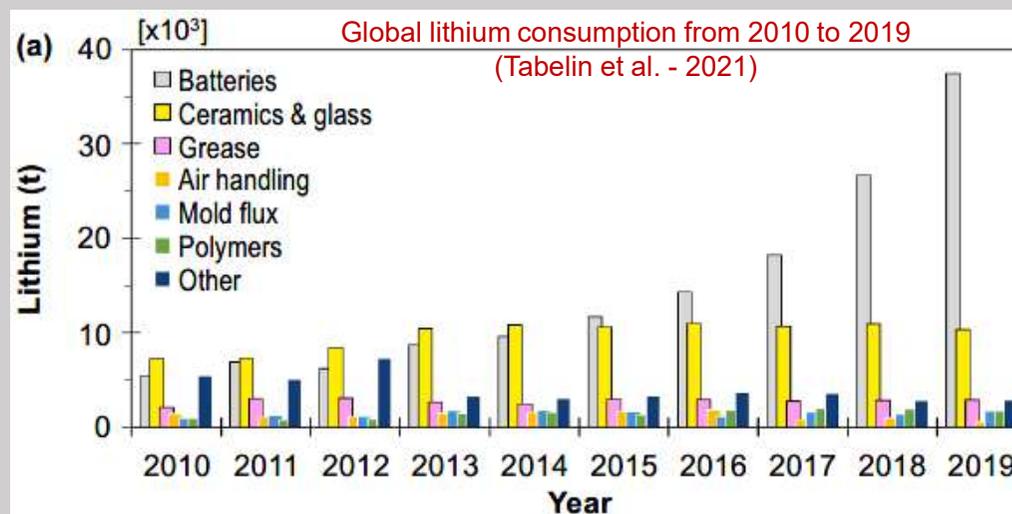


Utilisations

Plusieurs applications industrielles notamment :

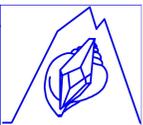
- **Largement utilisé pour le stockage d'énergie (batteries rechargeables Li-ion, environ 70% en 2019 – vs. 30 % en 2011 – de la consommation mondiale)
→ Li = métal stratégique**
- Verre résistant à la température et céramiques
- Graisses lubrifiantes au lithium

**Demande totale à l'horizon 2025
estimée de 150000 à 180000 t**



- Le lithium est présent dans les systèmes biologiques à l'état de traces (mais fonctions incertaines)
- Les sels de lithium sont utilisés pour stabiliser l'humeur dans le traitement de troubles bipolaires

Source : Wikipedia/ Bradley et al. (USGS – 2017)



Canada

Géologie du lithium

China

Chile

Argentina

Australia

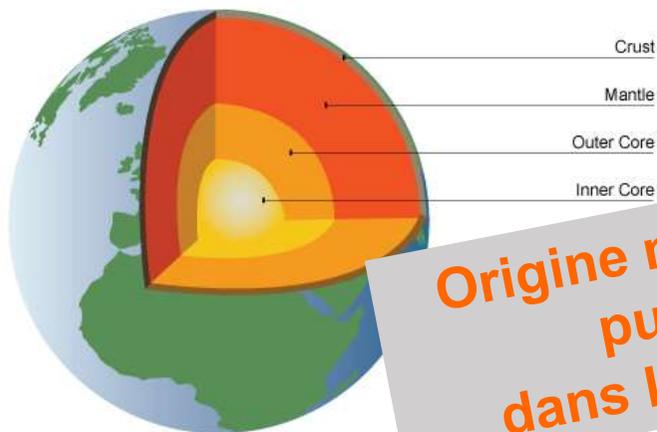


Lorsque des minéraux commencent à cristalliser à partir du refroidissement d'un magma le lithium à forte solubilité reste très tardivement dans la partie encore en fusion

- la tectonique des plaques a concentré le lithium dans la croûte continentale au cours des temps géologiques grâce à la fusion partielle du manteau sous les rides médio-océaniques et les arcs volcaniques
- la partie en fusion (magma) monte puis refroidit pour former une nouvelle roche dans la croûte terrestre apportant une grande partie du lithium disponible avec elle

Bradley, D.C. et al. – 2017, Lithium – U.S. Geological Survey Professional Paper 1802

Origine mantellique du lithium puis concentration dans la croûte continentale



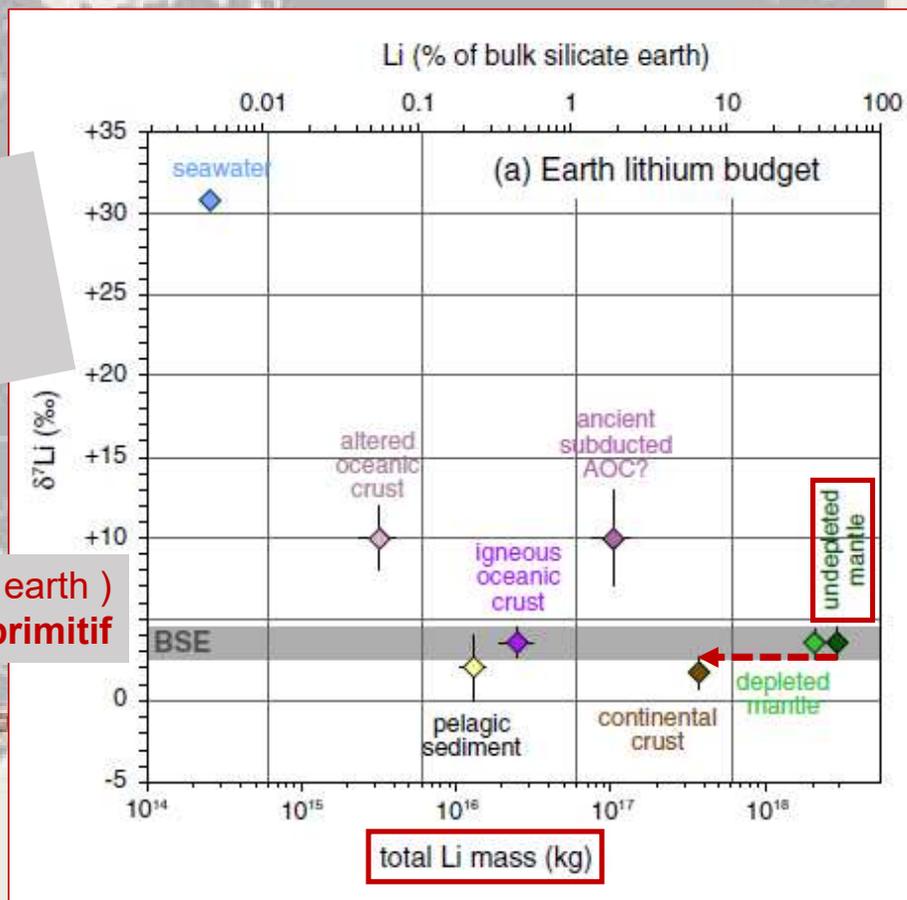
Le principal hôte du Li dans les roches du manteau est l'olivine (Marschall et al. – 2017)

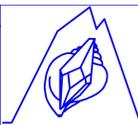
Rqce : L'olivine n'a pas le statut d'espèce minérale car « olivine » est en fait le nom générique de tous les minéraux de la série forstérite (Mg_2SiO_4) - fayalite (Fe_2SiO_4)

Photo Mindat



BSE (bulk silicate earth) = manteau primitif



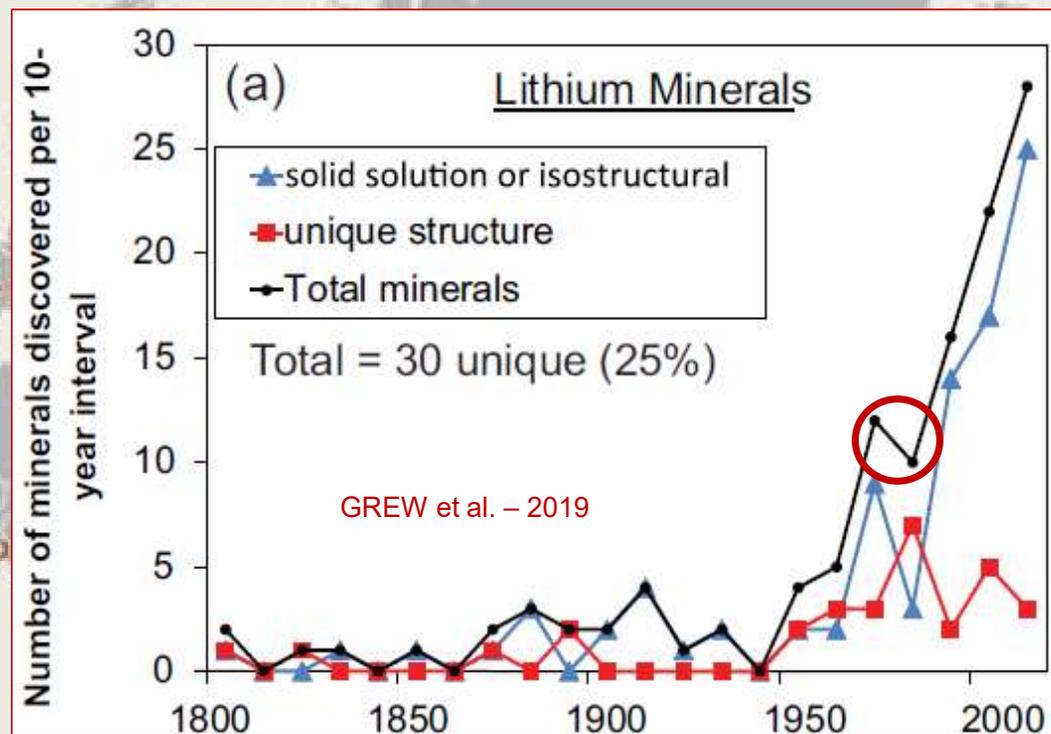


Historique de la découverte des minéraux de lithium

115 espèces minérales contiennent du lithium (dont 15 + communes)

Li ₂ O %	Minéral	Formule	Groupe	Poids moléculaire (gm)
10.20	Montebrasite	LiAl(PO ₄)(OH,F)	Phosphate	146.4
9.54	Lithiophilite	LiMnPO ₄	Phosphate	156.85
9.47	Triphylite	LiFe ²⁺ PO ₄	Phosphate	157.76
8.03	Spodumene	LiAlSi ₂ O ₆	Inosilicate	186.09
7.41	Amblygonite	(Li,Na)Al(PO ₄)(F,OH)	Phosphate	151.41
7.28	Jadarite	LiNaB ₃ SiO ₇ (OH)	Nesosilicate	221.63
6.46	Polyolithionite (Lepidolite)	KLi ₂ AlSi ₄ O ₁₀ (F,OH) ₂	Phyllosilicate	393.12
5.62	Trilithionite (Lepidolite)	KLi _{1.5} Al _{1.5} AlSi ₃ O ₁₀ F ₂	Phyllosilicate	399.21
4.76	Borocookeite	Li _(1+3x) Al _(4-x) (BSi ₃)O ₁₀ (OH,F) ₈ [x=0-0.33]	Phyllosilicate	502.73
4.50	Petalite	LiAlSi ₄ O ₁₀	Phyllosilicate	305.15
4.07	Elbaité	Na(Li,Al) ₃ Al ₆ (BO ₃) ₃ Si ₆ O ₁₈ (OH) ₄	Cyclosilicate	916.68
3.42	Zinnwaldite	KLiFe ²⁺ Al(AlSi ₃)O ₁₀ (F,OH) ₂	Phyllosilicate	437.1
3.16	Lithiophorite	(Al,Li)Mn ⁴⁺ O ₂ (OH) ₂	Hydroxyde	141.92
2.86	Cookeite	LiAl ₄ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH) ₈	Phyllosilicate	522.16
1.16	Hectorite	Na _{0.3} (Mg,Li) ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	Phyllosilicate	383.25

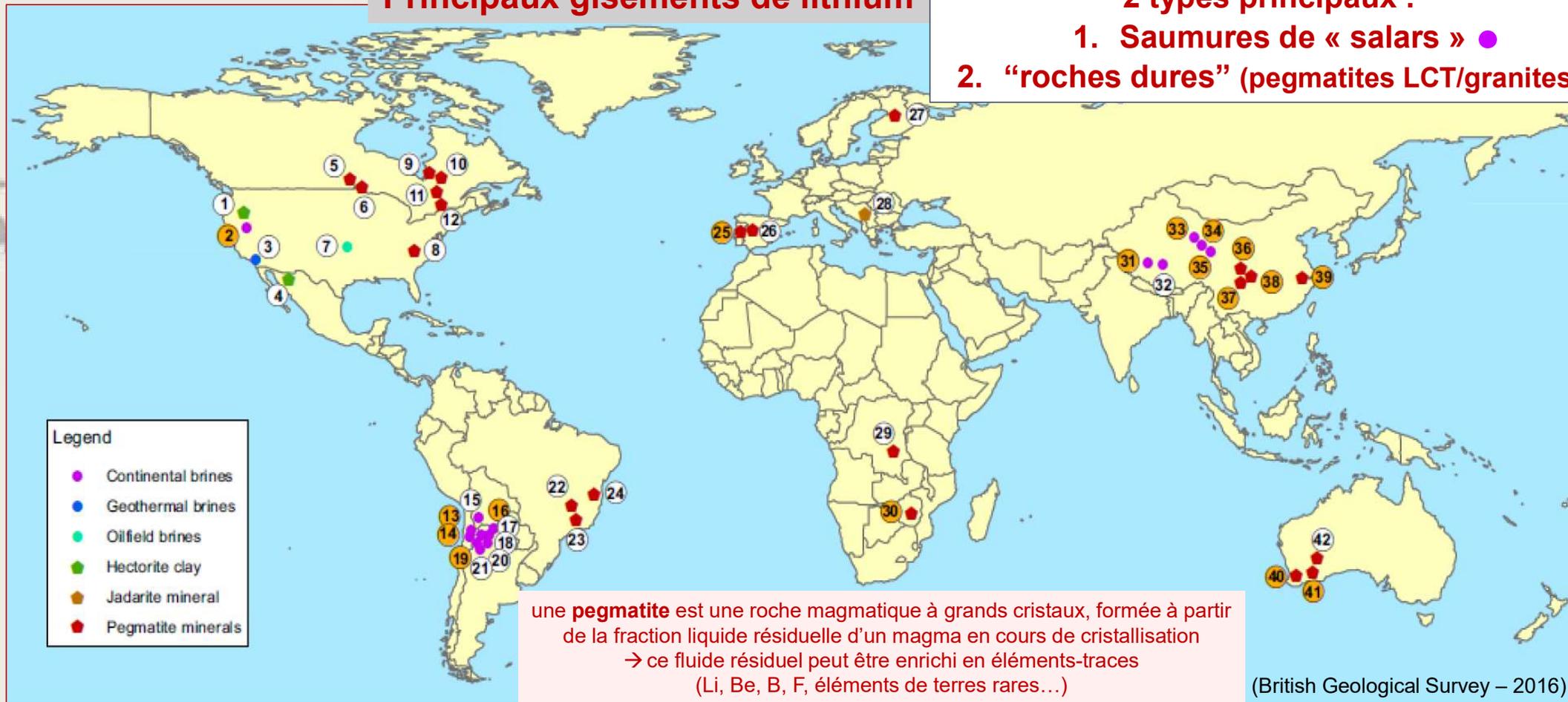
Tableau 3 : Contenu en lithium (% poids), formules structurales, groupe minéralogique et poids moléculaire des principales espèces minérales contenant du lithium. Source : IMA.



“Bond” dans les années 1980s
→ plus on cherche ... plus on trouve !

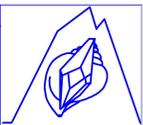
Principaux gisements de lithium

- 2 types principaux :
1. Saumures de « salars » ●
 2. « roches dures » (pegmatites LCT/granites) ◆



Key to Numbers

(1) Kings Valley, USA	(8) Kings Mountain, USA	(15) Salar de Uyuni, Bolivia	(22) Mibra, Brazil	(29) Manono, D.Rep. of Congo	(36) Sichuan Aba, China
(2) Silver Peak, USA	(9) James Bay, Canada	(16) Salar de Olaroz, Argentina	(23) Volte Grande, Brazil	(30) Bikita, Zimbabwe	(37) Jiajika, China
(3) Salton Sea, USA	(10) Rose, Canada	(17) Salar de Cauchari, Argentina	(24) Jequitinhonha, Brazil	(31) Zhabuye Salt Lake, China	(38) Maerkang, China
(4) Sonora, Mexico	(11) Whabouchi, Canada	(18) Salar de Rincon, Argentina	(25) Guarda, Portugal	(32) Dangxióngcuo, China	(39) Ningdu, China
(5) Tanco, Canada	(12) Val d'Or, Canada	(19) Salar de Hombre Muerto, Argentina	(26) La Fregeneda, Spain	(33) West Taiji Nai'er, China	(40) Greenbushes, Australia
(6) Separation Rapids, Canada	(13) Salar de Atacama	(20) Sal de Los Angeles, Argentina	(27) Lantta (and 3 others), Finland	(34) East Taiji Nai'er, China	(41) Mount Catlin, Australia
(7) Magnolia, USA	(14) Salar de Atacama	(21) Sal de Vida, Argentina	(28) Jadar, Serbia	(35) Qinghai Salt Lake, China	(42) Mount Marion, Australia



Sources actuelles et potentielles de Li dans le monde sont classées par environnement géologique :

"Conventionnelles" { saumures de bassins fermés (« salars ») 58 %
pegmatites (y compris les granites enrichis en Li) 26 %

« Non conv. » { argiles lithifères (hectorite) 7 %
saumures des champs pétroliers, saumures géothermiques et néosilicates lithifères (jadarite) 3 % chacune

**Le 1^{er} producteur de Li de saumures est le Chili et le 1^{er} producteur de Li de pegmatites est l'Australie
Le Portugal est le principal producteur européen**

Bradley et al. (USGS – 2017)

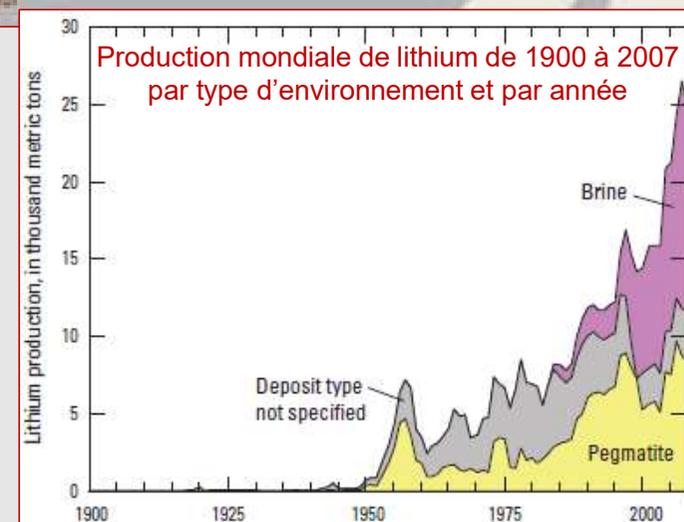
Ressources en lithium :

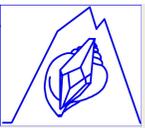
- Bolivie, 21 millions tonnes
- Argentine, 17 millions t
- Chili, 9 millions t
- USA, 6.8 millions t
- Australie, 6.3 millions t
- Chine, 4.5 millions t
- Congo (RDC), 3 millions t
- Allemagne, 2.5 millions t
- Canada et Mexique, 1.7 millions t chacun
- Tchéquie, 1.3 millions t

Ressources mondiales env. 80 millions t vs. réserves mondiales env. 17 millions t

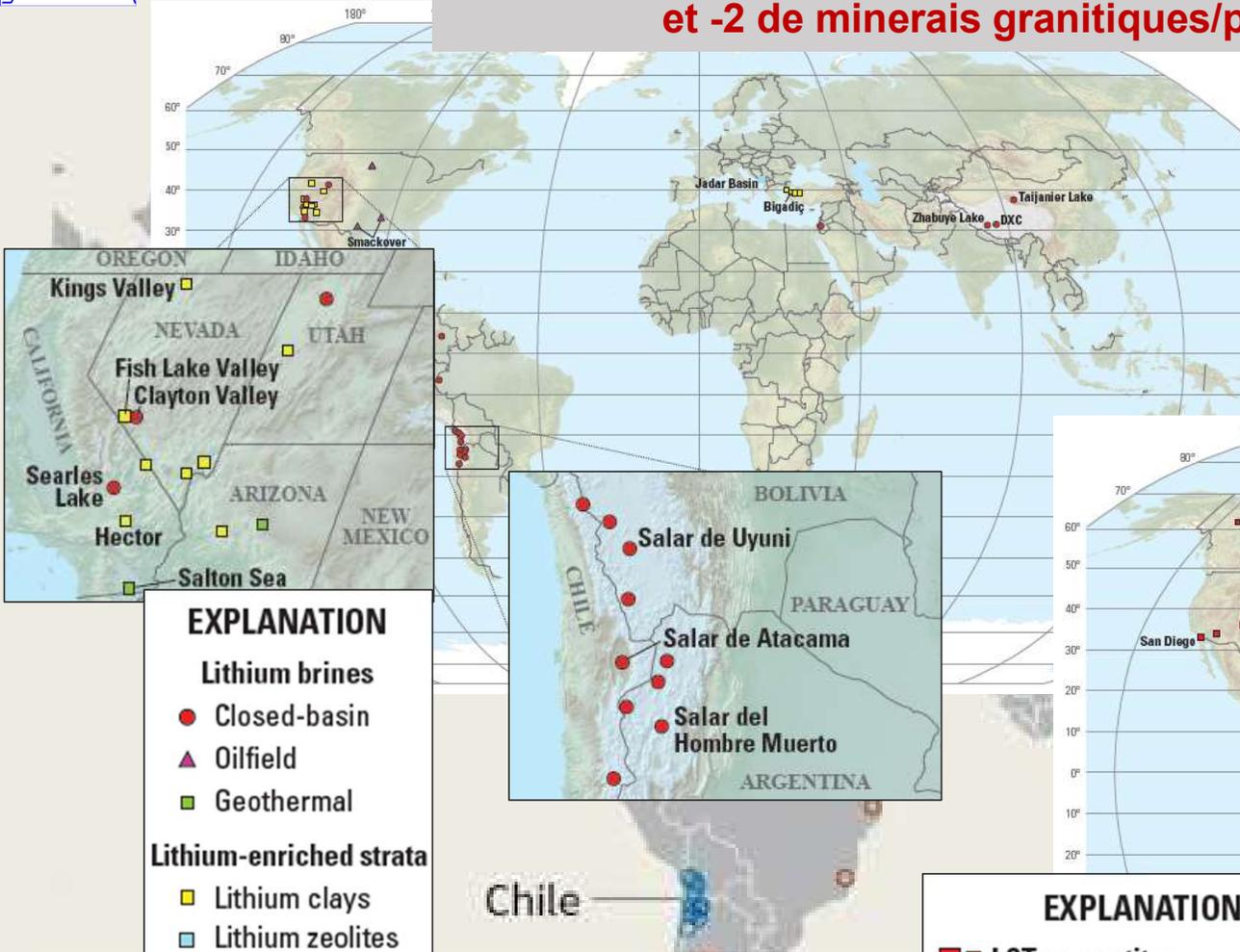
(Réserves minérales = partie des ressources minérales économiquement productibles et vendables)

U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2020

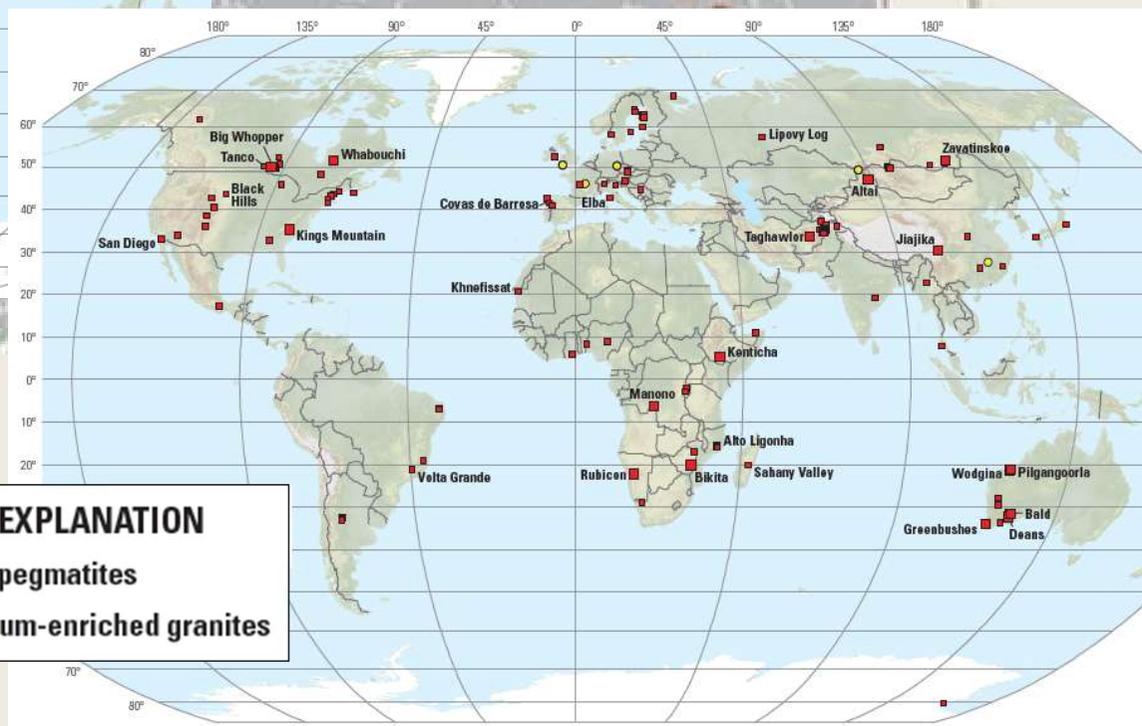




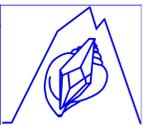
Aujourd'hui, le lithium est principalement extrait :
1- de saumures pompées dans des bassins sédimentaires fermés
et -2 de minerais granitiques/pegmatitiques



Bradley et al. - 2017, Lithium,
 U.S. Geological Survey Professional Paper 1802



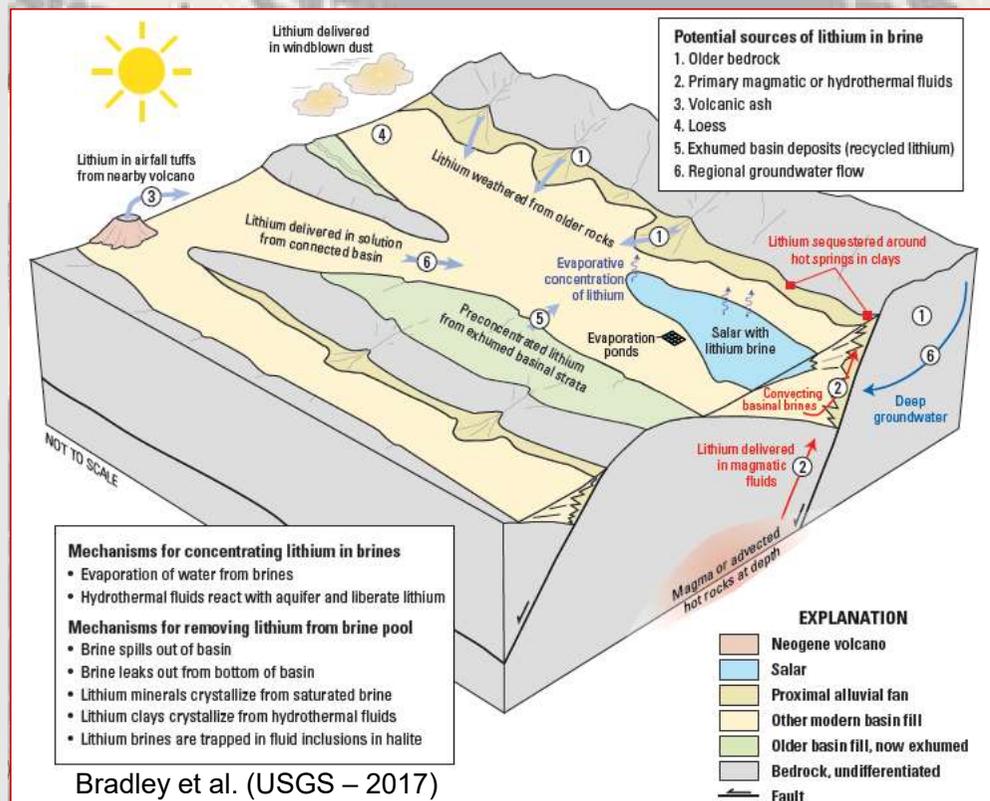
Le « triangle du lithium » en Amérique du Sud (Bolivie, Argentine, Chili) est la première région pour la production de lithium (45% de la production mondiale) mais aussi des ressources (env. 60%) en 2017, selon l'USGS



1- Les salars : grands lacs salés partiellement ou totalement asséchés en altitude dans les Andes. Les plus importants sont les salars d'Uyuni en Bolivie, d'Atacama au Chili et de l'Hombre Muerto en Argentine

Six caractéristiques communes des gisements de lithium de type « saumure » :

- 1- Conditions climatiques arides → concentration naturelle en sels des eaux par évaporation (sous forme LiCl)
- 2- Localisation dans un bassin fermé résultant de conditions tectoniques et climatiques contenant un salar (lac salé asséché) ou un lac salé. Les lacs non asséchés ne sont pas exploités à cause de leur concentration plus faible en Li.
- 3- Présence d'une activité hydrothermale souterraine (lessivage du lithium des roches régionales déjà riches en lithium, arrivée de lithium supplémentaire provenant des saumures magmatiques et de l'activité volcanique plus profonde que l'aquifère salin quand ce magmatisme actif existe, formation d'un minéral argileux riche en lithium = hectorite, ...)
- 4- Bassin en subsidence tectonique.
- 5- Présence d'une source de lithium conséquente. Celles-ci varient en fonction de l'aquifère salin considéré. Le lithium peut provenir de fluides magmatiques, d'hectorite (minéral argileux riche en lithium), de roches silicatées volcaniques (généralement acides), d'anciennes accumulations de sels.
- 6- Enfin, ce sont des environnements où le temps a pu faire son œuvre.
Les gisements exploités aujourd'hui seraient datés du Néogène (-23 à -5 Ma).



Le « triangle du lithium »



Salar d'Uyuni, Bolivie

Salar d'Atacama, Chili

Salar del Hombre Muerto, Argentine



Mine de lithium, Salar del Hombre Muerto, Argentine
NASA Earth Observatory

La saumure riche en lithium est concentrée en la pompant vers des étangs d'évaporation solaire



Salar de Uyuni – Bolivie (surface = 10582 km²) probablement la + grande accumulation de Li au monde

Lithium de Bolivie, YLB, un nouveau producteur entre en scène



Le salar d'Uyuni.

La Bolivie, qui possède d'importantes ressources de lithium dans le salar d'Uyuni, situé dans les hauts plateaux des Andes centrales, envisage de démarrer en 2020 la production industrielle de carbonate de lithium dans l'usine pilote de Llipi.

Cette usine appartient à la société publique Yacimientos de Litio Bolivianos (YLB). Cette société a été

créée en 2008 sous le gouvernement du président Evo Morales pour exploiter le lithium des salars comprenant, outre celui d'Uyuni, au sud-ouest du pays, les salars de Pastos Grandes, également situé au sud-ouest, ainsi que celui de Coipasa à l'ouest. Leurs réserves additionnées sont estimées à 21 Mt.

L'usine de Llipi aura une capacité de production de 15 000 t/an de carbonate de lithium. Afin de se garantir une maîtrise technique des procédés, YLB s'est assurée le concours de la société allemande ACI Systems, qui fabriquera des batteries made in Bolivia destinées au marché européen.

Parallèlement, une société chinoise interviendra dans les salars de Coipasa et Pastos Grandes mais la transformation de la matière première sera effectuée en Asie.

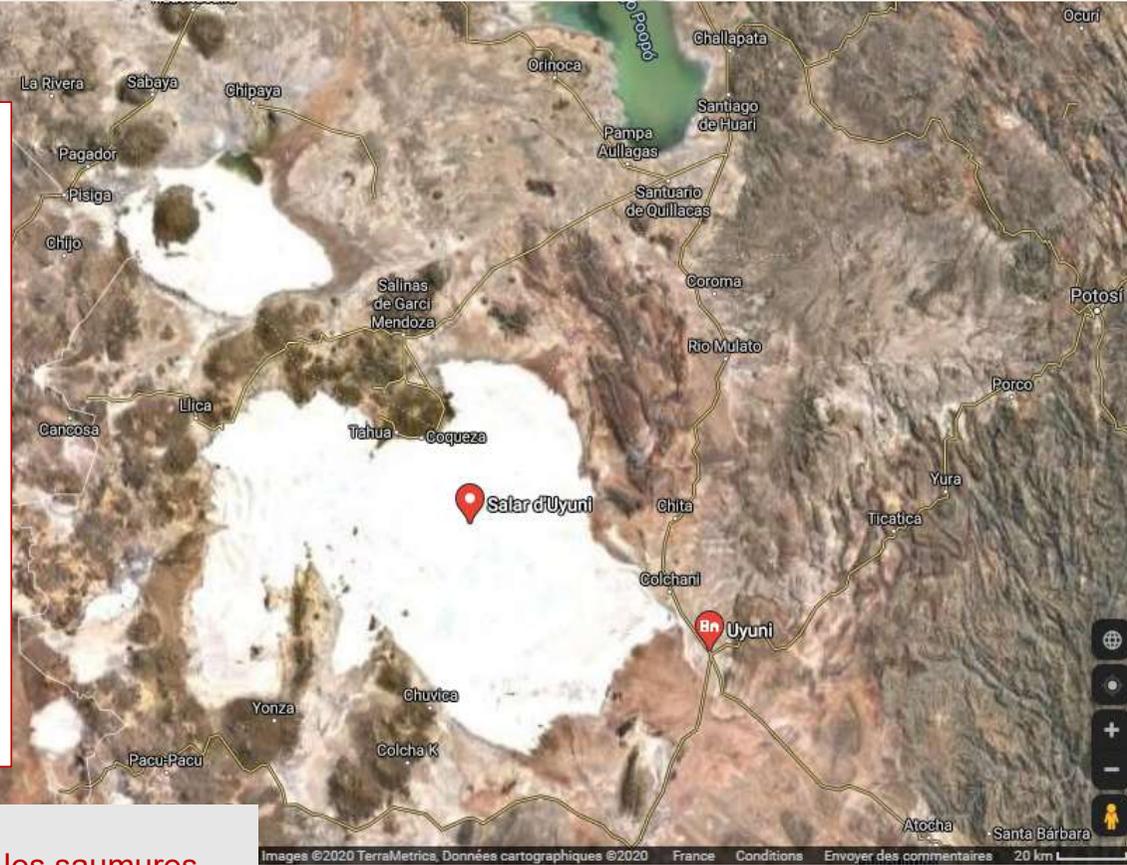
■ **Ph. Lagny**

» Sources : mines & carrières, n°273, p. 16 Oct. 2019

Du magnésium est souvent présent avec le lithium dans les saumures.
C'est une des impuretés les plus difficiles à séparer du lithium.
En Bolivie, les saumures sont beaucoup plus riches en magnésium qu'en Argentine ou au Chili → intérêt moindre pour les projets boliviens

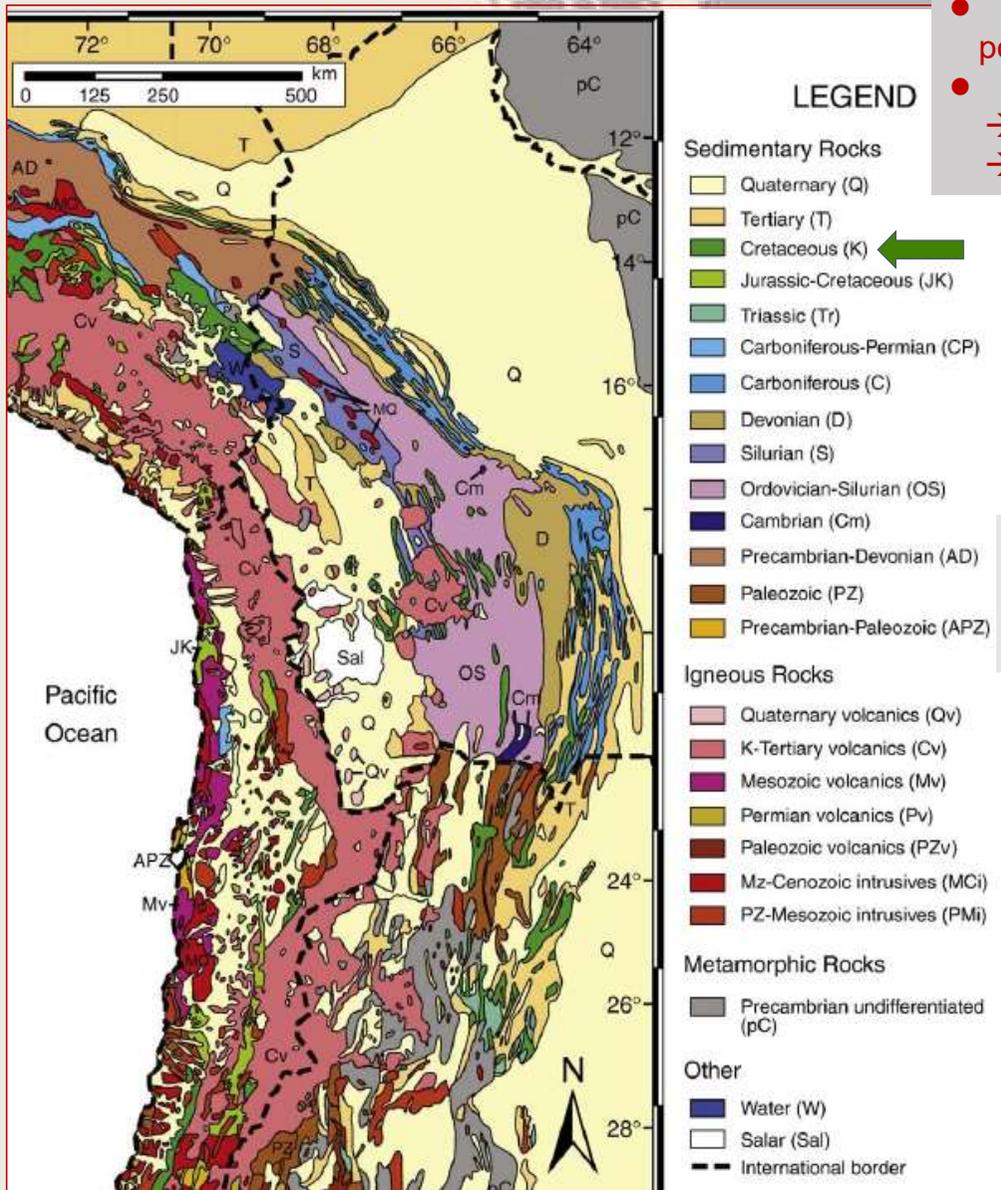
(Source : Dubourdiou - 2019)

(*) pour comparaison :
surface P.A. = 7645 km²

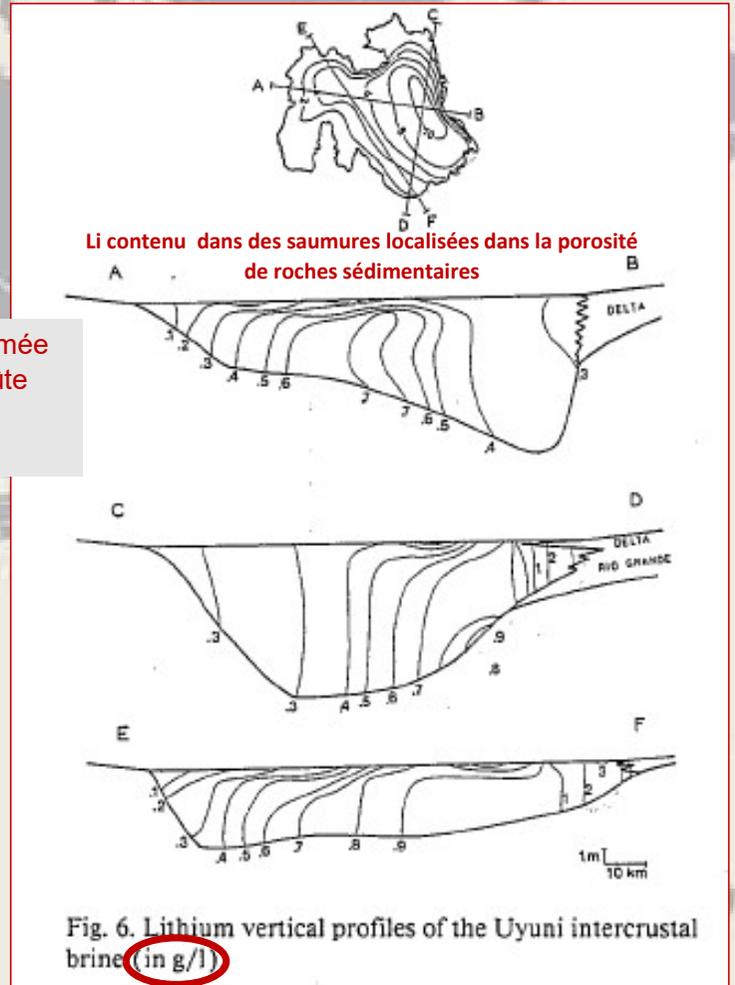


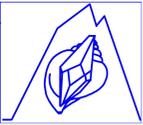
Présence de sel à Uyuni explicable par 2 hypothèses :

- Remaniement de systèmes évaporitiques du Crétacé sup, l'enrichissement en Li pourrait être lié à l'altération volcanique
- Hydratation et serpentinitisation du manteau situé au-dessous de l'Altiplano → peuvent expliquer soulèvement & effondrement orogénique ayant créé le salar → Li pourrait être lié à l'hydratation du manteau



Rappel : teneur moyenne estimée de 20 à 35 ppm dans la croûte continentale supérieure → concentration par ~20

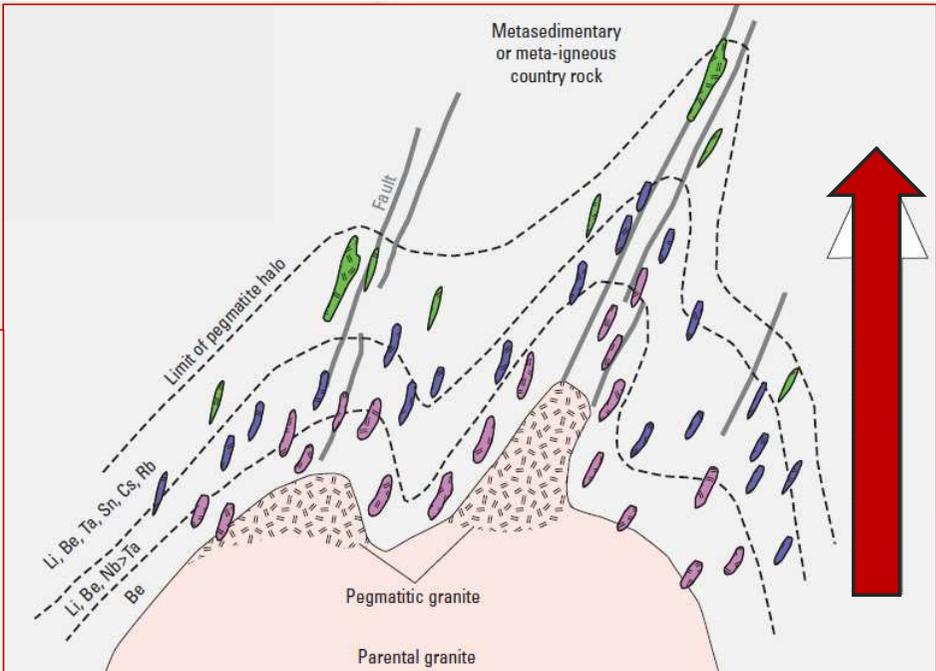




2- Les roches dures (pegmatites LCT) ont tendance à se trouver à côté des granites "fertiles", avec la + forte concentration de Li & autres éléments "incompatibles" dans les pegmatites plus distales Bradley et al. (USGS – 2017)



EXPLANATION	
Pegmatite bodies with characteristic enrichments	
	Li, Be, Ta, Sn, Cs, Rb
	Li, Be, Nb>Ta
	Be



Fractionnement croissant

➤ **La plupart des minéraux connus** contenant du Li se trouvent dans des pegmatites à lithium-césium-tantale (LCT) le spodumène et la pétalite étant les sources les plus commercialement viables. Un autre minéral important est la lépidolite.

Spodumène (Kunzite)
Afghanistan



Pétalite (*) Paprok
Afghanistan
(*) anciennement castorite



Lépidolite
Little Three Mine
Californie

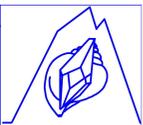
➤ **Silicates non conventionnels**

Hectorite Californie
(altération hydrothermale de cendres volcaniques)



Jadarite Serbie
(dépôts lacustres)

Sources : Wikipedia / Mindat / Bradley et al. – USGS 2017



Fractionnement et origine des variations de couleur dans les tourmalines multicolores

Canada



Tranche de
tourmaline « pastèque »

1^{ère} hypothèse : changement de conditions chimiques pendant la croissance du cristal

→ zones colorées sur toute la longueur du cristal, ou noyau d'une couleur et périphérie d'une autre

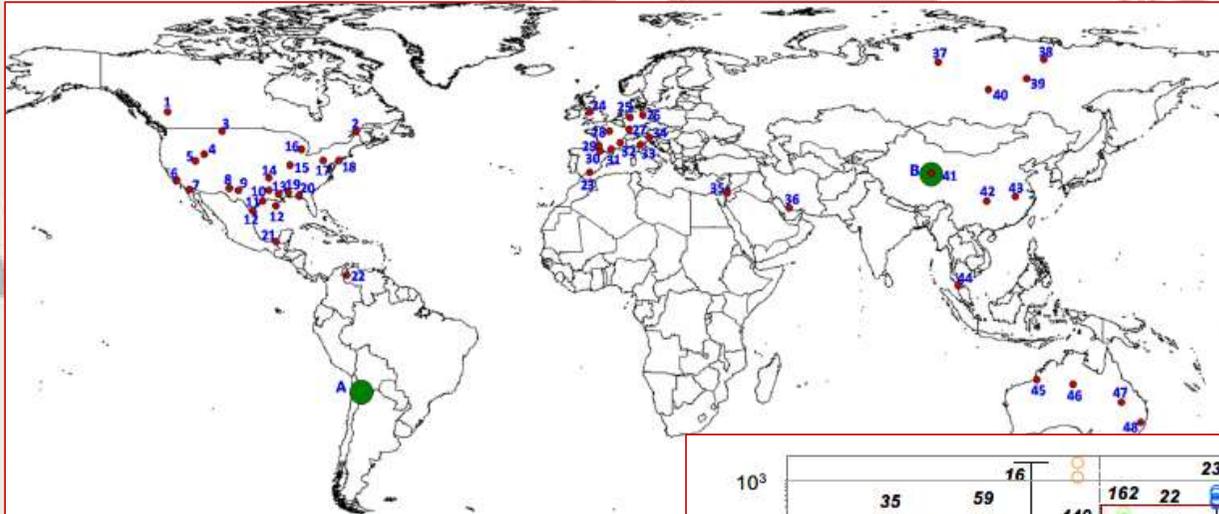
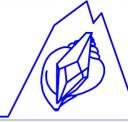
→ lors de la croissance du cristal de tourmaline « pastèque », celui-ci est exposé à différents éléments comme Mn puis Li, ce qui fait passer la gemme du rose au centre au vert en périphérie

2^{ème} hypothèse : diffusion chimique après la croissance des cristaux

le cristal a grandi avec des agents de coloration rose, et une « trempe thermique » ultérieure entraîne la perte progressive ou le gain de contaminants pour générer la zonation de couleur

Sources : www.geologyin.com/2021/07/watermelon-tourmaline-what-is.html, Tollefson - 2017

3- L'eau de formation des bassins sédimentaires - Utilisation d'une base de données mondiale 1/2

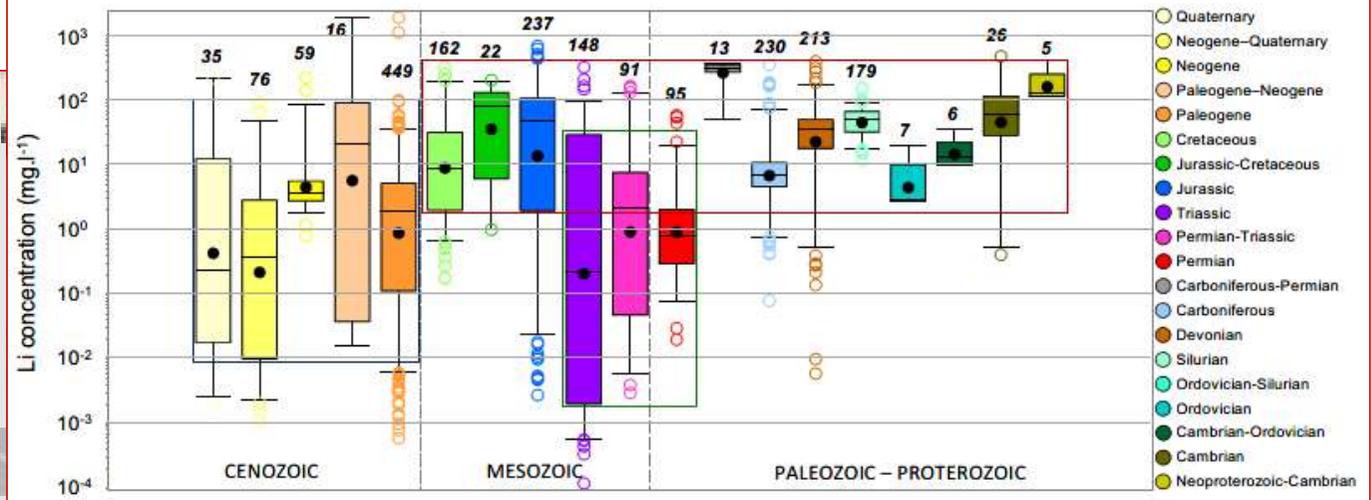


Carte du monde montrant l'emplacement des bassins sédimentaires utilisés dans la compilation des données. Les points rouges sont des eaux de formation sédimentaires. Les cercles verts sont des saumures de bassins fermés (salars et lacs salés).

Dugamin et al. - 2021

Concentration en lithium dans les eaux de formation des bassins sédimentaires du monde entier en fonction de l'âge des réservoirs (les nombres en noir & italique font référence à la quantité de données – points noirs = moyenne)

Dugamin et al. - 2021

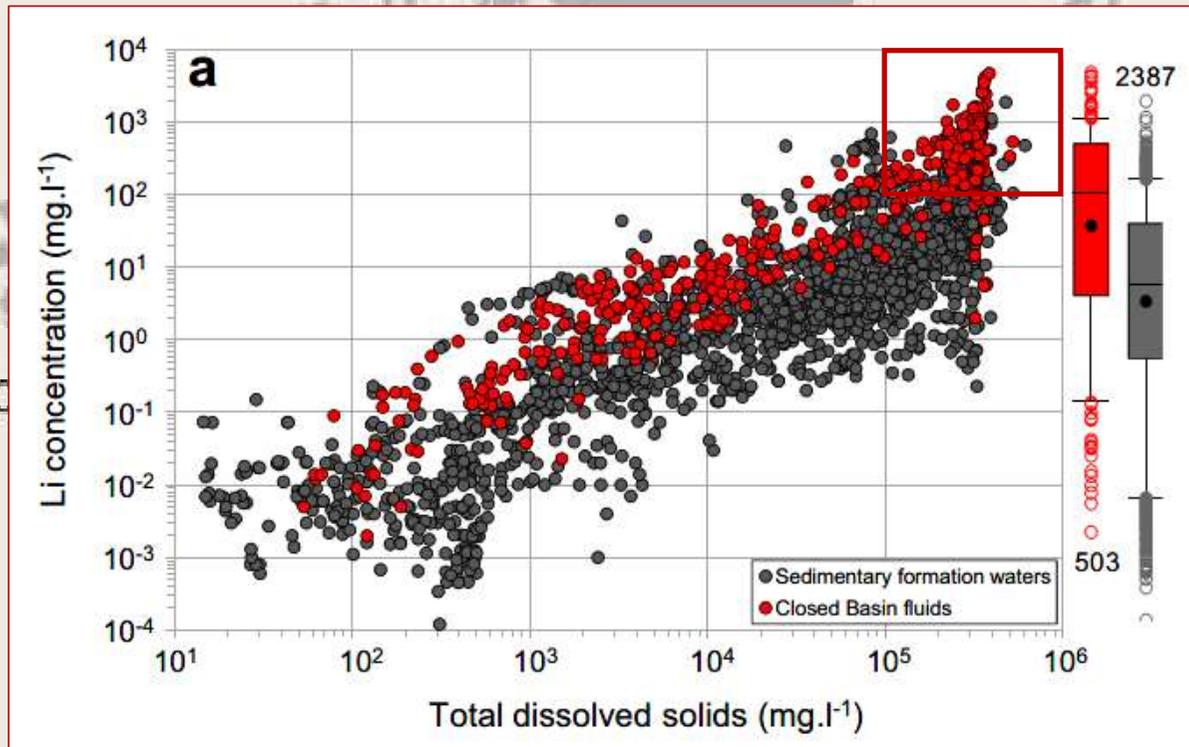


Les ressources en Li (R_{Li} en Mtonnes) de certains réservoirs sélectionnés ont été estimées à l'aide de deux paramètres principaux :

- 1) le volume d'eau dans le réservoir, estimé en considérant la surface (S en km^2), l'épaisseur (E en m) et la porosité (P , exprimée entre 0 and 1) des réservoirs
- 2) la densité de l'eau (D , soit fournie dans des publis, soit fixée à 1 g.cm^{-3} par défaut) et la concentration en Lithium (C in $mg.l^{-1}$)

→ l'équation suivante a donc été utilisée : $R_{Li} = S \times E \times P \times D \times C$

Utilisation d'une base de données mondiale 2/2



Concentration en lithium dans les eaux de formation des bassins sédimentaires et des saumures de bassins fermés dans le monde en fonction des solides dissous totaux

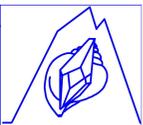
Dugamin et al. - 2021

Analyse systématique de la concentration en lithium dans environ 3000 échantillons d'eaux souterraines de 48 bassins sédimentaires dans le monde :

→ **les plus fortes concentrations en lithium ($> 10^2$ mg.l⁻¹) se trouvent principalement dans les eaux à haute salinité (Solides dissous totaux $> 10^5$ mg.l⁻¹) et sont dans la même gamme que les saumures des salars les plus riches**

Des estimations prudentes basées sur le volume de fluide et la concentration en lithium dans certains réservoirs sélectionnés indiquent que ces ressources en lithium sont comparables à celles des salars et des mines de roches dures (0.1–10 Mtonnes Li)

→ **Le lithium des eaux souterraines des bassins sédimentaires pourrait constituer une ressource potentielle significative pour les prochaines décennies**



Canada

Le traitement

China

Chile

Argentina

Australia

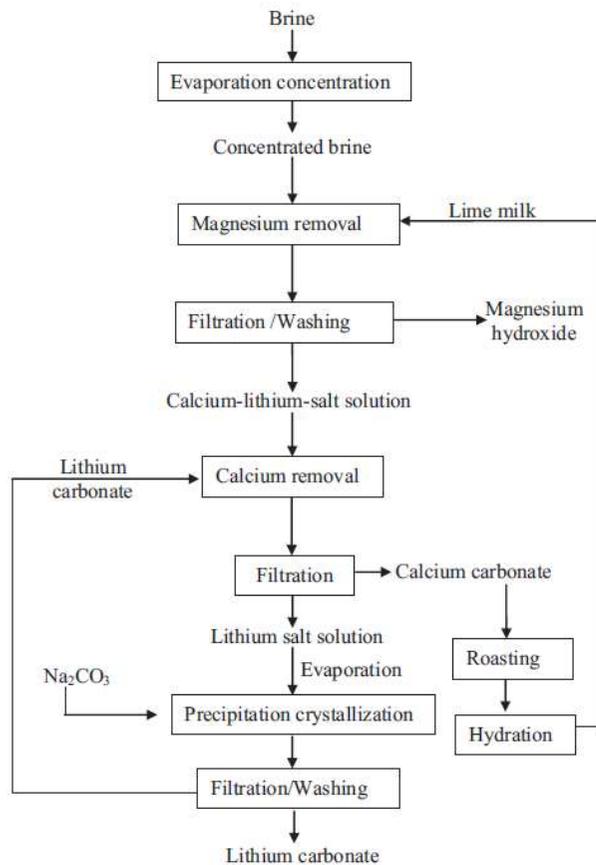


Procédés de traitement

Un des problèmes majeurs pour l'extraction et la production de lithium à partir de minéraux lithinifères est la diversité de formes minéralogiques (cf. Porteurs minéralogiques du Lithium).

→ nécessité de procédés d'extractions variés, ayant des coûts différents

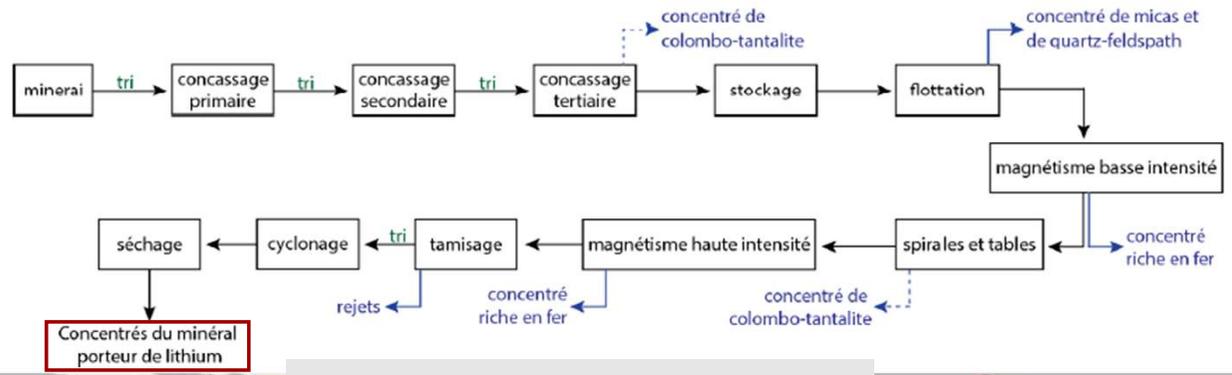
1- Procédés de traitement du lithium des saumures (Meshram – 2014)



Traitement consommateur de grandes quantités d'eau :
Au Chili, SQM (une des deux entreprises autorisées à exploiter le désert d'Atacama où sont extraits 26% de la production mondiale) indique puiser en 2022 près de 400.000 litres d'eau par heure pour les besoins de son usine
(La Tribune Oct. 2022)

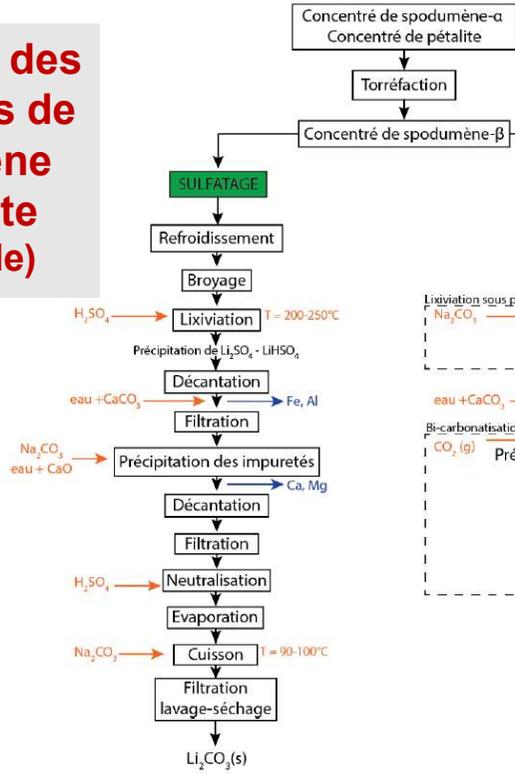


2- Procédés de traitement de roches dures (Gloaguen, BRGM – 2018)



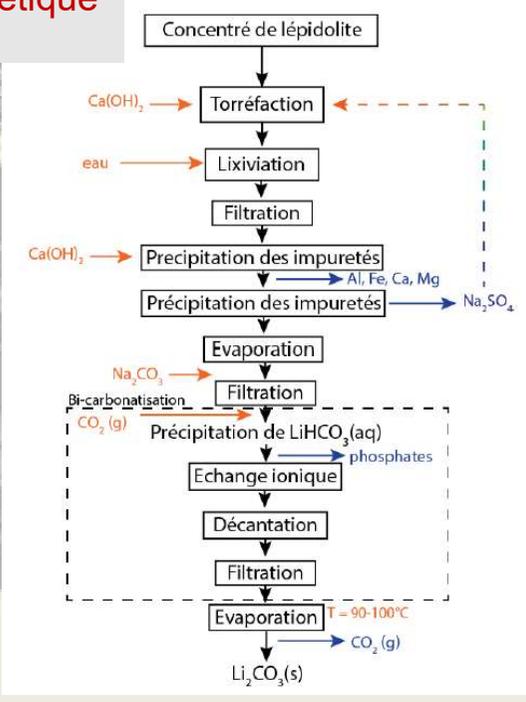
concentration

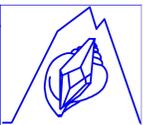
Traitement des concentrés de spodumène et pétalite (voie acide)



Processus coûteux du fait de leur forte consommation énergétique (La Tribune Oct. 2022)

Traitement des concentrés de lépidolite (voie basique)





Canada

U.S.

En Europe

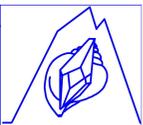
China

Chile

Argentina

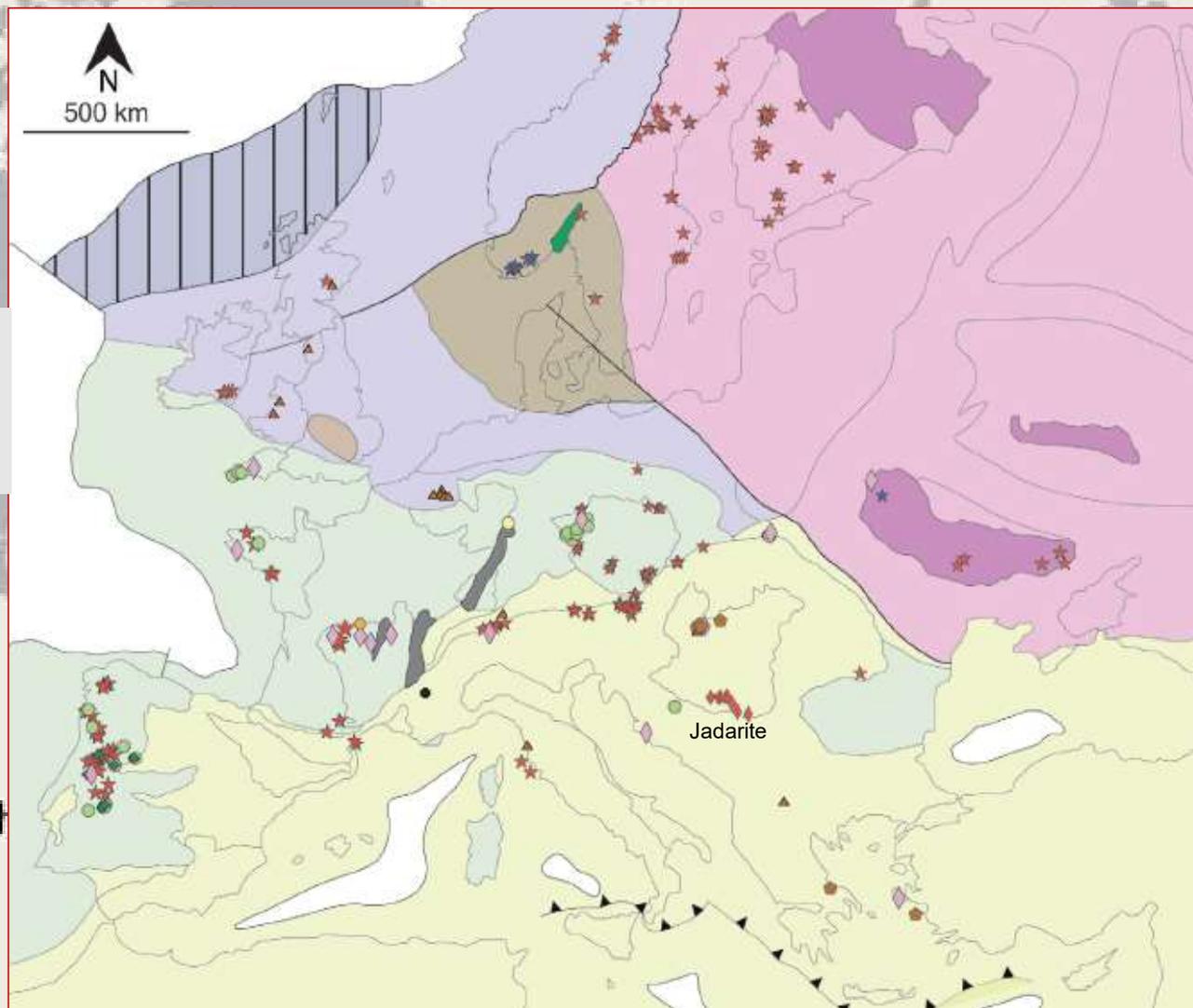
Australia





Carte tectonique simplifiée de l'Europe avec présence de lithium (dans des roches dures)

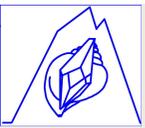
(Gourcerol et al. – 2019)



Légende

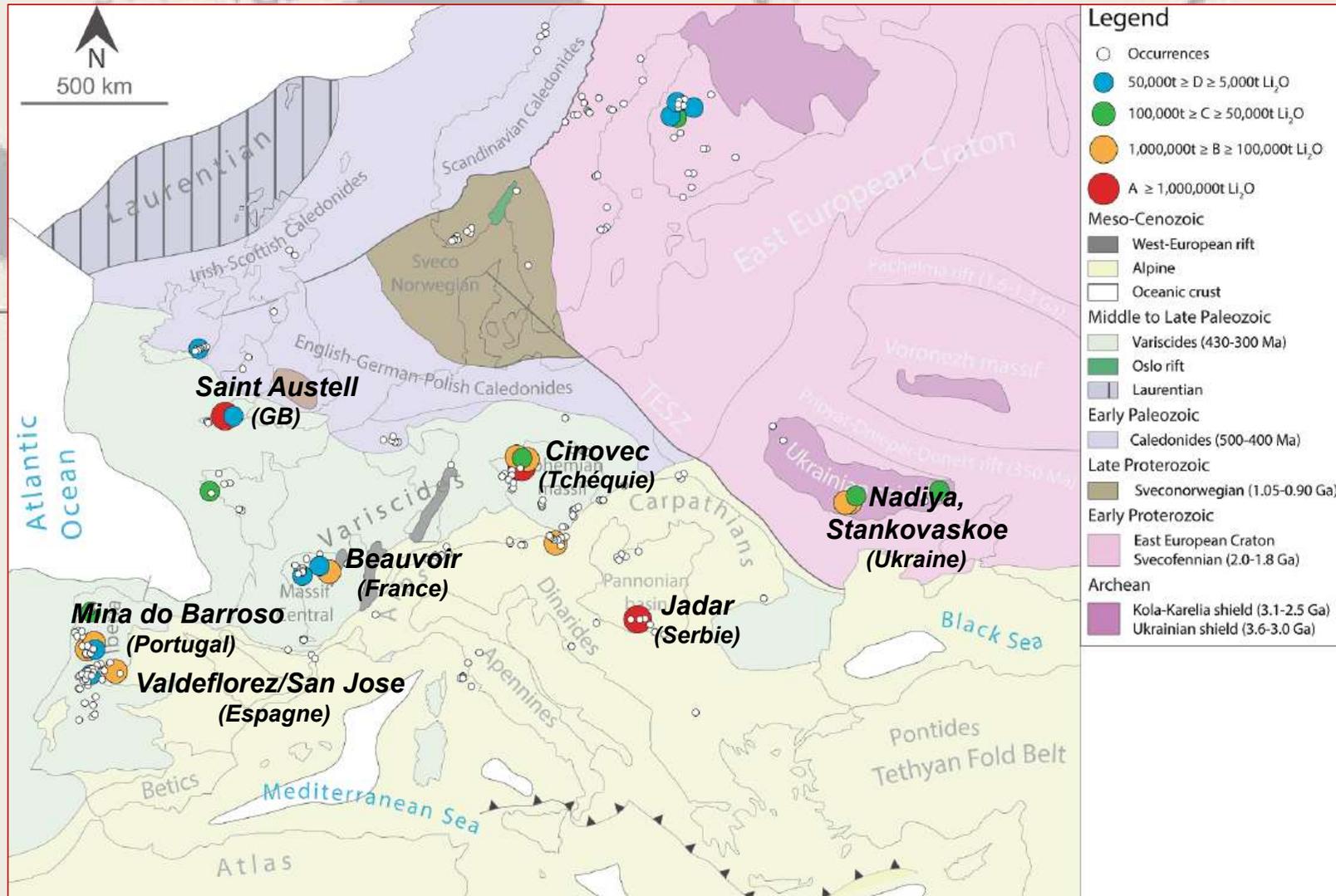
- ◆ Granite à métaux rares
- ★ Pegmatites LCT
- ★ Pegmatite NYF-LCT
- Greisen
- Gîte à lithium de type MVT
- Gîte à lithium de type bauxite
- ▲ Gîte à lithium de type Mn-(Fe)
- ◆ Veines de quartz-montebrazite
- Tosudite
- Indice de cookéite
- Méso-Cénozoïque
- Rift ouest-européen
- Orogène Alpin
- Croûte océanique
- Paléozoïque moyen à supérieur
- Orogène Varisque (430-300 Ma)
- Rift d'Oslo
- Orogène Laurentien
- Paléozoïque inférieur
- Calédonides (500-400 Ma)
- Protérozoïque inférieur
- Svéconorvégien (1,05-0,90 Ga)
- Protérozoïque inférieur
- Craton est-européen
- Svécofennien (2,0-1,8 Ga)
- Archéen
- Bouclier Kola-Karélie (3,1-2,5 Ga)
- Bouclier Ukrainien (3,6-3,0 Ga)

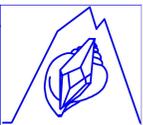
Le lithium est bien représenté dans diverses roches liées à plusieurs cycles orogéniques (du Précambrien au Miocène)



Carte des gisements de lithium en Europe

(Gourcerol et al. – 2019)





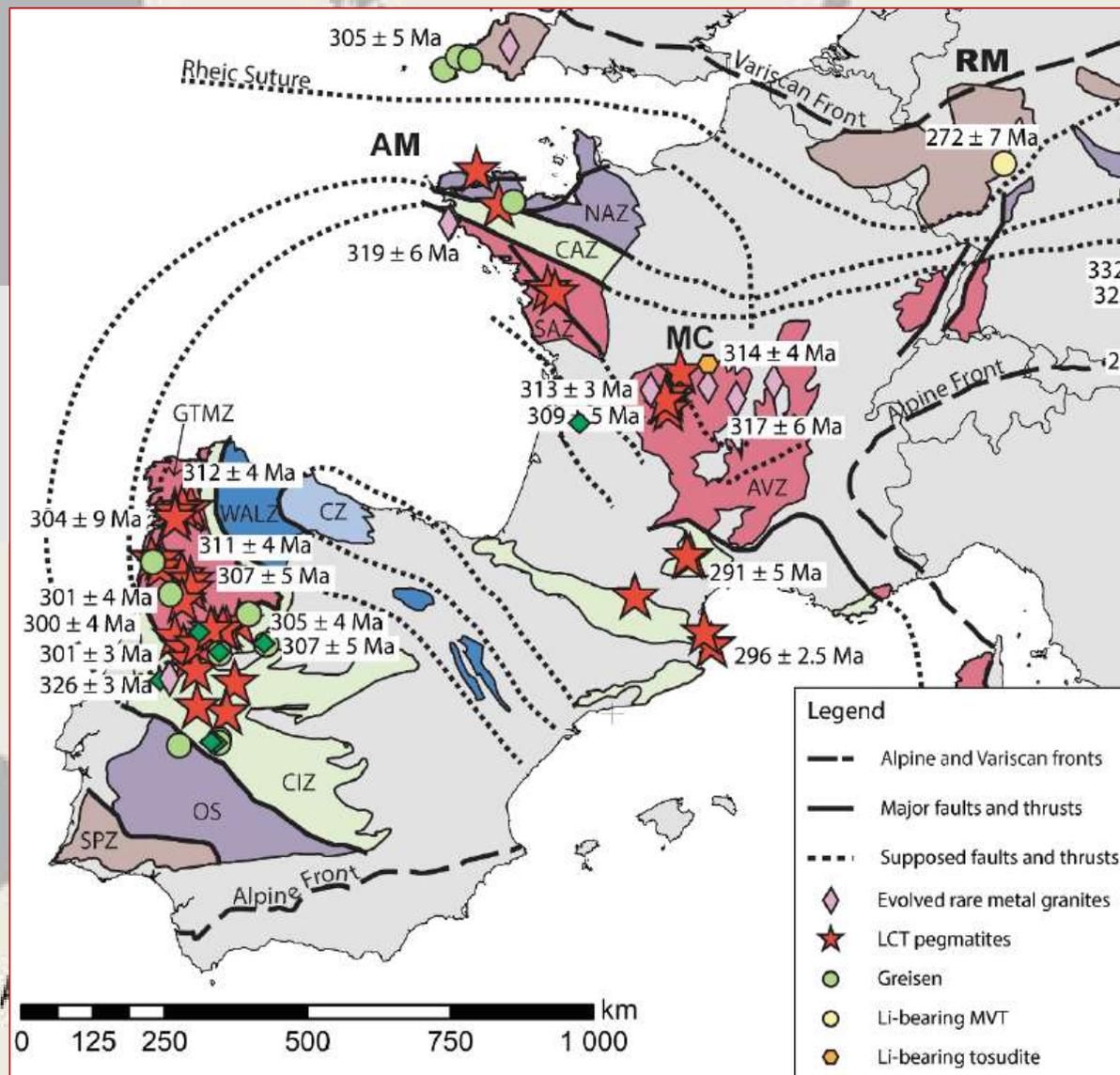
Age de mise en place des granites lithifères en Europe de l'Ouest

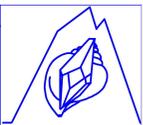
(Gourcerol et al. – 2019)

Mise en place liée à l'**orogénèse Hercynienne**
(Dévonien à Permien, ~ de -400 à -250 Ma)

AM = Massif Armoricain
MC = Massif Central
RM = Massif Rhénan

Chile





Canada

Au Sud des Pyrénées

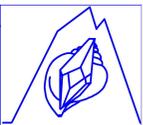
China

Chile

Argentina

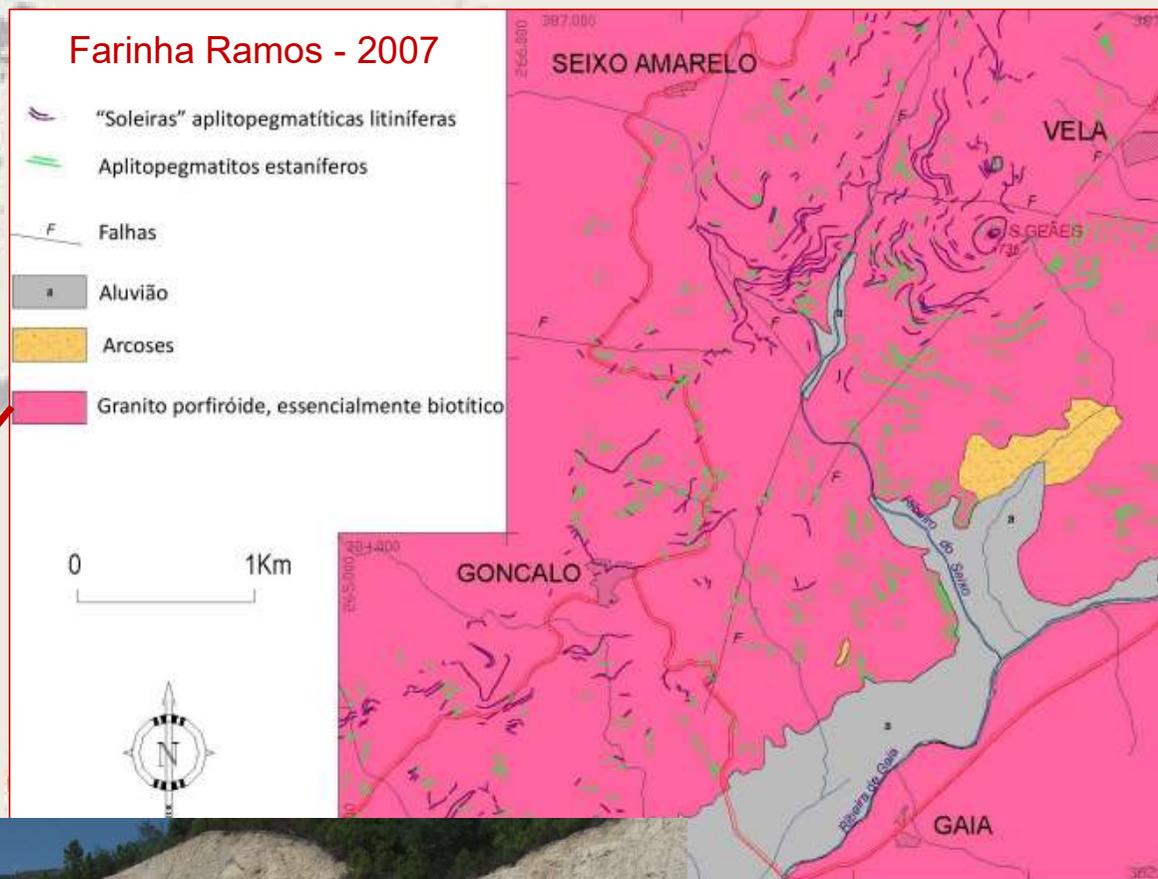
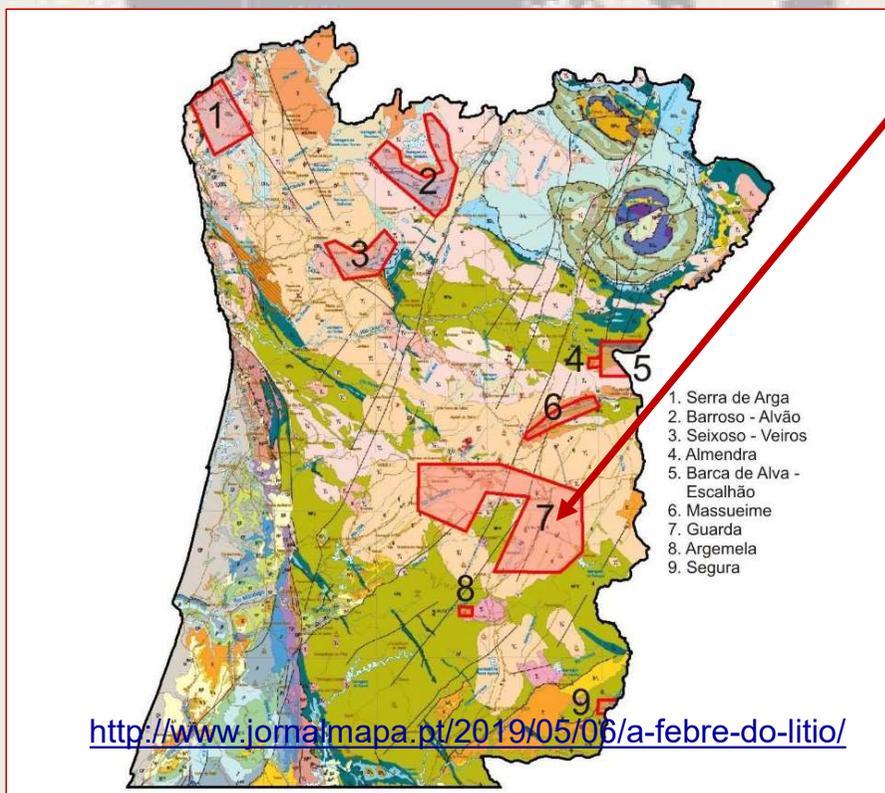
Australia





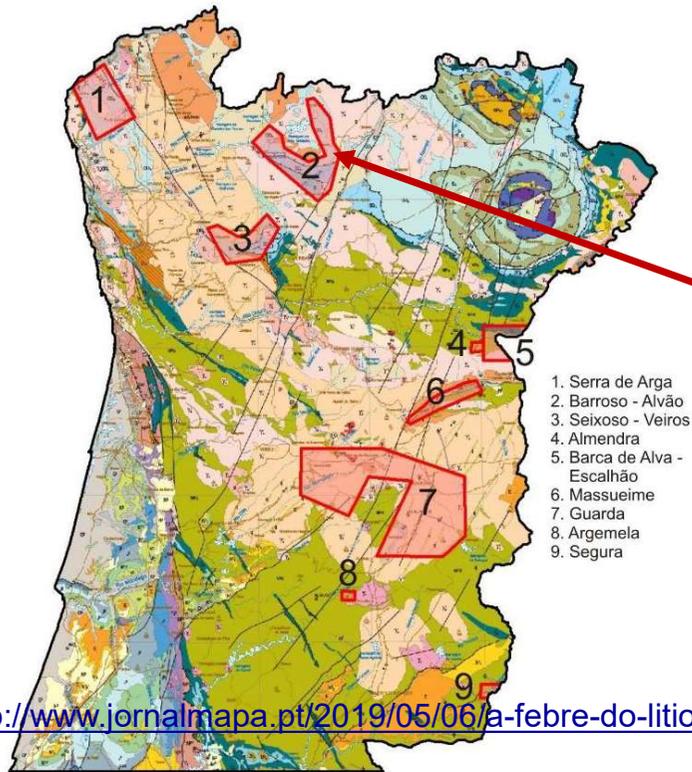
Production au Nord du Portugal (Mine Alvarrões, Seixo Amarelo)

Grupo Mota exploite actuellement la mine **Alvarrões Lepidolite** (Guarda) où il produit environ 20000 tonnes par an de minéraux de lithium (principalement lépidolite)



Aspect des pegmatites
(VISA Consultores – 2018)

Grands projets au N Portugal



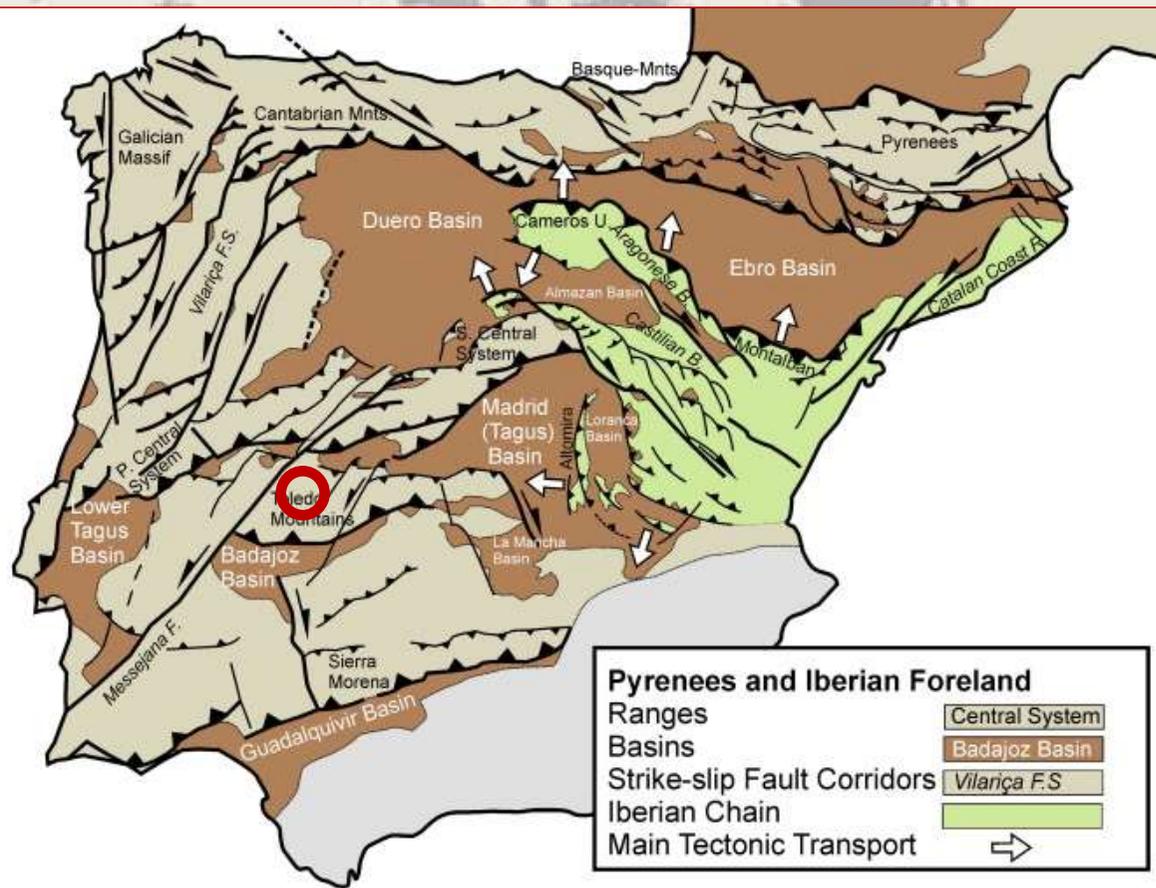
Savannah Resources (GB) espère ouvrir "la première mine majeure de lithium en Europe" en 2020 à Boticas. Ils estiment que les gisements de **Mina do Barroso** contiennent 20 millions de tonnes de minerai avec une teneur en lithium de 1,04%.

Lusorecursos (P) affirme également être assis sur « le plus grand gisement de lithium en Europe » à Montalegre : 30 millions de tonnes de minerai avec une teneur de 1,09 % qu'ils prévoient commencer à extraire en 2020



Pegmatite avec albite, quartz, spodumène du secteur de Barroso-Alvão (Gloaguen - 2020)

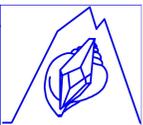
Grand projet en Espagne (Estremadura)



San José de Valdeflórez (Spain)

- Le gisement est situé dans la zone ibérique centrale du massif hercynien, qui comprend 4 unités géologiques distinctes (roches magmatiques, sédiments précambriens, dépôts paléozoïques et quaternaires).
- Le corps minéralisé de San Jose est localisé dans les sédiments paléozoïques du synclinal de Caceres, avec minéralisation associée à l'abondance de batholites granitiques. C'est également un gisement d'étain.
- Le projet de San Jose contiendrait des réserves probables de 37,2 millions de tonnes. Tecnología Extremeña Del Lito (TEL) [joint venture entre Infinity Lithium (75%) et Valoriza Minería (25%)] le développe.

<https://www.mining-technology.com/projects/san-jose-lithium-project-extremadura/>



Canada

U.S.

En France

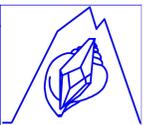
China

Chile

Argentina

Australia





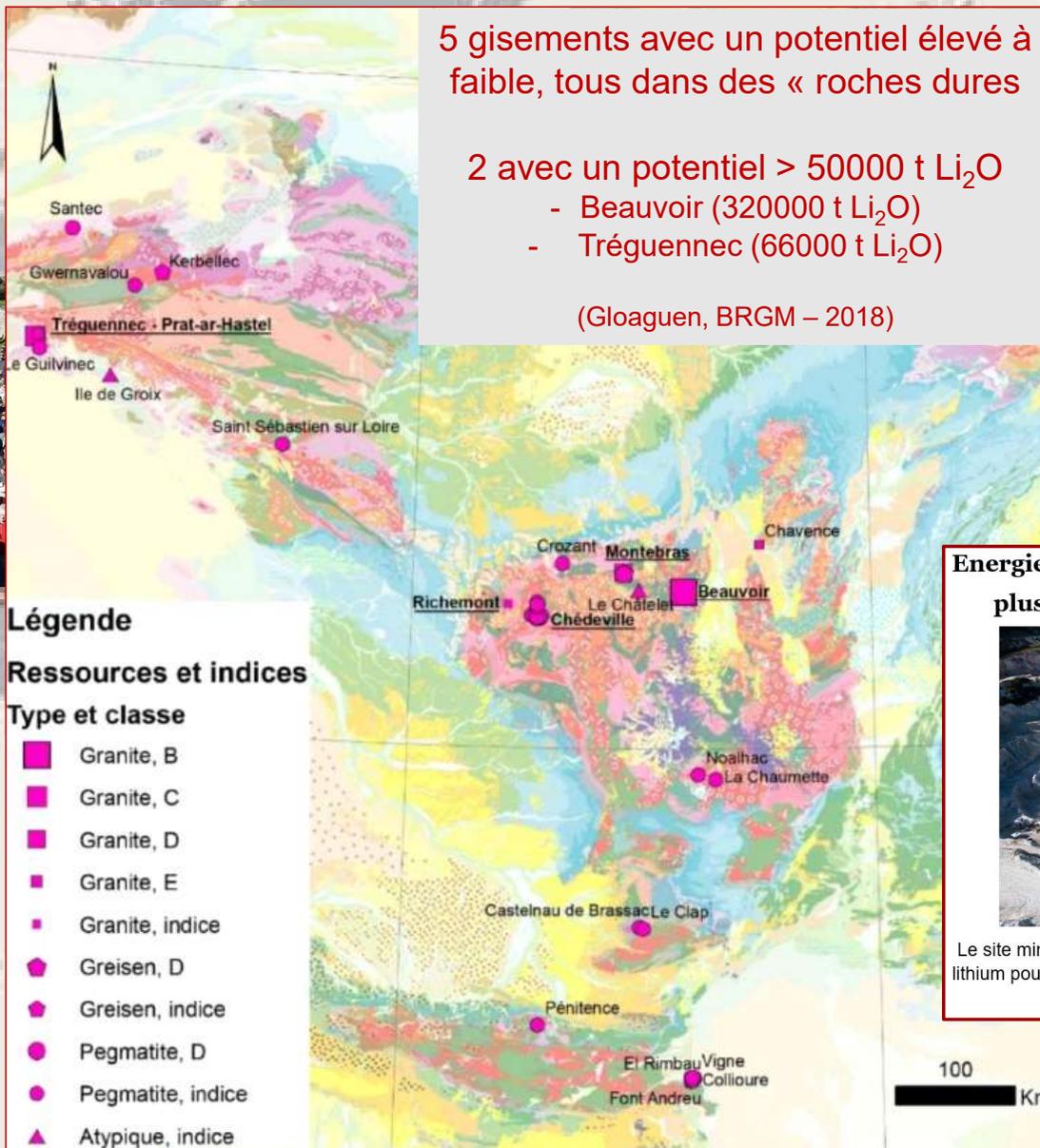
Principales ressources & occurrences de lithium en France

5 gisements avec un potentiel élevé à faible, tous dans des « roches dures »

2 avec un potentiel > 50000 t Li₂O

- Beauvoir (320000 t Li₂O)
- Tréguennec (66000 t Li₂O)

(Gloaguen, BRGM – 2018)



Lithium à Tréguennec environ 600 personnes mobilisées contre un éventuel projet d'extraction (Ouest-France – 26 fev 2022)



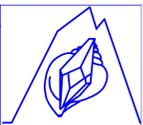
Pegmatite à lépidolite (mica lithinifère violacé) échantillonné dans une ancienne carrière près de Chédeville (Source : © 2019 P. Thomas - ENS)

Energie : le groupe Imerys exploitera en France l'une des plus grandes mines d'Europe de lithium d'ici 2027



Le site minier sera situé à Beauvoir, dans le Massif central : un million de tonnes de lithium pourraient en être extraits sur une trentaine d'années. © Crédit photo : Imerys

Par Sud-Ouest.fr avec AFP - Publié le 24/10/2022



Coupe transversale des dépôts de lithium de Beauvoir

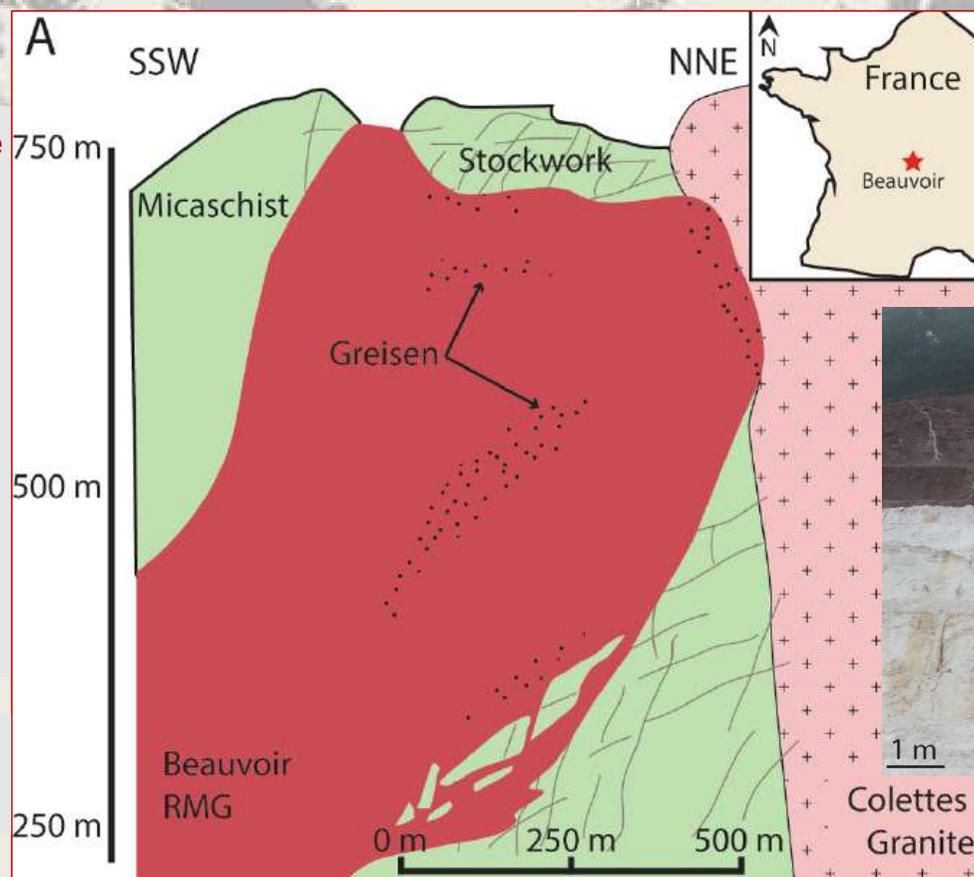
(modifié de Cuney et Autran, 1987)

Les zones contenant du lithium sont identifiées en rouge

Greisen = Roche plutonique formée essentiellement de quartz et de micas souvent enrichis en Li (muscovite, lépidolite)

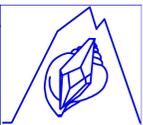
Ces derniers sont formés par destruction des feldspaths (phénomène pneumatolytique = circulation de fluides à l'état de vapeur dans des fractures avec apport de Li, départ de Na) en bordure des massifs de granite

RMG (Rare-metal granite) = **granite à métaux rares**



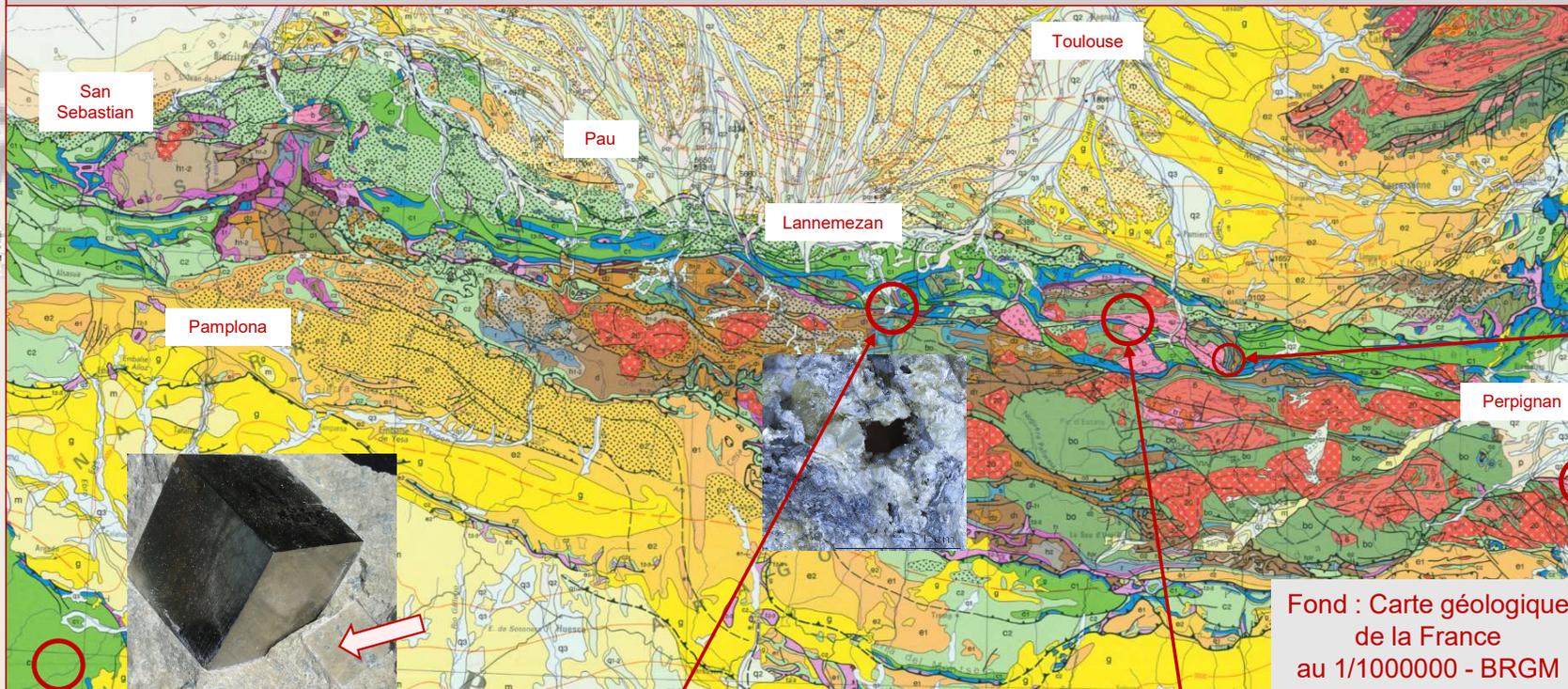
Greisen et stockwork
Gourcerol et al. – 2019





Et dans les Pyrénées ? Pas beaucoup de minéraux lithifères !

Rien de signalé dans les granites des Eaux-Chaudes, de Cauterets, du Néouvielle, de la Maladetta pourtant tous liés à l'orogénèse Hercynienne ! Pourquoi ???



Pas de Li signalé à Luzenac (?)
Source : Mindat

Pyrites de la Rioja, avec cookéite
Photo : Legendre

Cookéite = phyllosilicate de la famille des chlorites
 $(Al_2Li)Al_2(AlSi_3O_{10})(OH)_8$

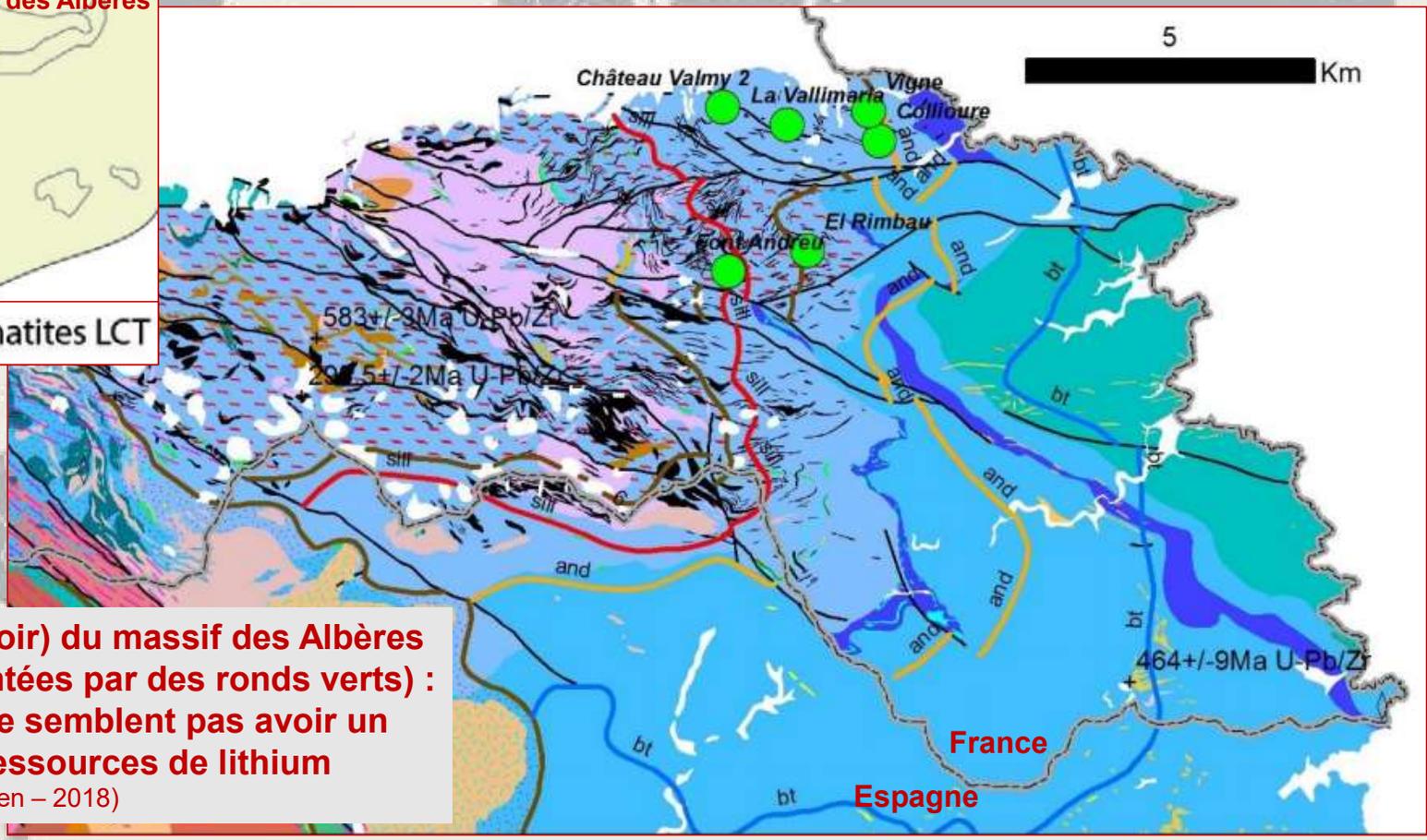
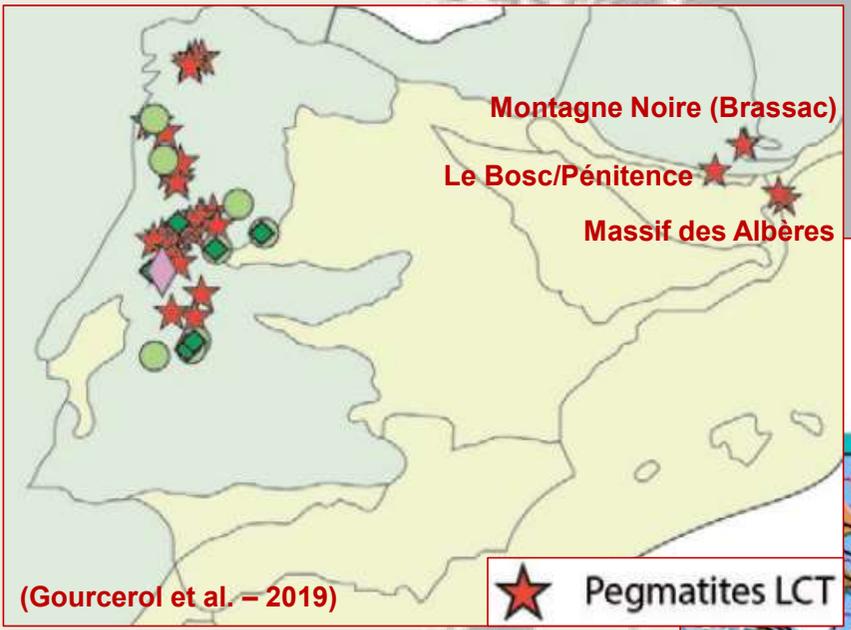
Cookéite à Couledoux (près des marbres de Saint-Béat)
Photo : Descouens - Mindat

Li-phosphates de Li à Pénitence (ferriscklerite, triphylite)
Source : Mindat

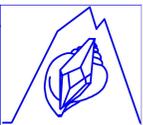
Pegmatites-aplites avec Li-phosphates du "massif des Albères"
Source : Gloaguen - 2018



Quelques indices dans les Pyrénées orientales



Pegmatites-aplites (en noir) du massif des Albères (pegmatites à Li représentées par des ronds verts) : Ces pegmatites LCT ne semblent pas avoir un potentiel comme ressources de lithium
(Gloaguen – 2018)



Pyrites de Navajún & Ambas Aguas (Rioja) 3/3



Cookéite = phyllosilicate de la famille des chlorites
 $\text{LiAl}_4(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_8$

photos : Legendre



Estudio por SEM y TEM de interstratificados cookeita-paragonite en metapelitas de bajo grado de la Cuenca de Cameros

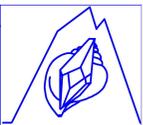
Esta clorita constituye una delgada lámina, con un espesor desde varias micras a < 3 milímetros, que se dispone alrededor de cristales de pirita.

Mata et al. – 2000

Argentina

	Ck.	Ck-Pg n=17	Ck- Pg n=8
Si	3.12	3.26	3.63
Al(IV)	0.88	0.74	0.37
Al(VI)	3.92	2.58	2.86
Mg	0.02	0.23	0.14
Fe	0.02	0.05	0
Na	—	0.27	0.34
K	0.00	0.09	0.05
Ca	0	0.14	0.07
? Li	n.d.	—	—
T(VI)	3.96	2.86	3
Int.	0	0.60	0.46

Resultados del análisis por AEM para la cookeita y el interestratificado cookeita-paragonita. Fórmula teórica de la paragonita: $\text{Na Al}_2 (\text{Al Si}_3) \text{O}_{10} (\text{OH})_2$ Fórmula teórica de la cookeita: $\text{Li Al}_4 (\text{Al Si}_3) \text{O}_{10} (\text{OH})_8$, Fórmula teórica de la saliotita: $\text{Na}_{0.5} \text{Li}_{0.5} \text{Al}_3 (\text{Al Si}_3) \text{O}_{10} (\text{OH})_5$



Merci de votre attention

Canada

U.S.

China

Chile

Argentina

Australia



Photo Wikipédia