



HAL
open science

Les saumures géothermales : une nouvelle ressource en lithium ?

Bernard Sanjuan Sanjuan, Blandine Gourcerol, Romain Millot

► **To cite this version:**

Bernard Sanjuan Sanjuan, Blandine Gourcerol, Romain Millot. Les saumures géothermales : une nouvelle ressource en lithium ?. Géochronique, 2020, Sur la route du Lithium, n°156, 7 p. hal-03357068

HAL Id: hal-03357068

<https://brgm.hal.science/hal-03357068>

Submitted on 28 Sep 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Les saumures géothermales : une nouvelle ressource en lithium ?

Dans le domaine de la géothermie, le lithium (Li) est reconnu comme un élément dont la concentration croît avec la température, à l'instar de la plupart des éléments alcalins (potassium, rubidium et césium). Si de nombreuses eaux géothermales indiquent des concentrations de Li élevées allant jusqu'à 90 mg/l à travers le monde, peu possèdent des concentrations supérieures à cette valeur, et encore moins à 150 mg/l. Cette valeur est le seuil minimal estimé à partir duquel l'extraction de cet élément des eaux géothermales pourrait devenir industriellement intéressante à l'aide des technologies extractives disponibles à ce jour.

Dans l'état actuel des connaissances, les seules eaux géothermales, qui dépassent une concentration de Li de 150 mg/l, sont relativement rares ; ce sont des saumures (eaux dont la salinité est supérieure à 35 g/l, salinité moyenne de l'eau de mer), avec des salinités comprises entre 60 et 590 g/l. Celles du site géothermique de Salton Sea, en Californie (USA) possèdent des salinités jusqu'à 320 g/l et atteignent des températures de réservoir comprises entre 300 et 360°C. Elles figurent parmi les plus connues dans le monde, et peuvent contenir jusqu'à 300 mg/l de Li. On peut aussi citer des saumures de salinité très élevée, mais de basse et moyenne température, comme la saumure du bassin du Qaidam, en Chine, où une concentration record de Li (983 mg/l) a été rapportée pour une salinité de 402 g/l, ou des saumures profondes de la plateforme sibérienne, en Russie, dont les concentrations de Li sont comprises entre 162 et 415 mg/l pour des salinités respectives de 396 à 590 g/l, ou encore des saumures de champs pétroliers aux USA (concentration de Li de 370 mg/l pour une salinité de 336 g/l).

Une étude bibliographique aussi exhaustive que possible des fluides riches en lithium des champs géothermiques et pétroliers à travers l'Europe, vient d'être menée, dans le cadre du projet européen EuGeLi (European Geothermal Lithium, cofinancé par l'European Institute of Technologies-Raw Materials). Ce projet a permis de compiler, pour la première fois, les principales données géologiques, géochimiques et hydrogéologiques pour les eaux géothermales dont la concentration de Li était supérieure à 15 mg/l et de constituer une base de données consolidée à l'échelle européenne. De cette étude bibliographique, il ressort que cinq régions européennes localisées en Italie, en Allemagne et en France, hébergent des saumures géothermales profondes, dont les concentrations de Li varient de 150 à 480 mg/l (fig. 1) pour des températures en profondeur de 120 à 380°C et des salinités des saumures de 56 à 520 g/l (tabl. 1). À noter l'existence de saumures de type NaCl et MgCl₂ dans des dépôts de sel (halite, potasse, carnallite) du bassin du Permien supérieur (Zechstein), situé au nord de l'Allemagne

(mines de sel d'Asse, Gorleben, Morsleben...). Ces saumures contiennent des concentrations de Li jusqu'à 490 mg/l, mais dont les salinités très élevées (≥ 290 g/l), les températures basses ($< 50^\circ\text{C}$) et le milieu salifère, les rendent peu favorables à une exploitation géothermique.

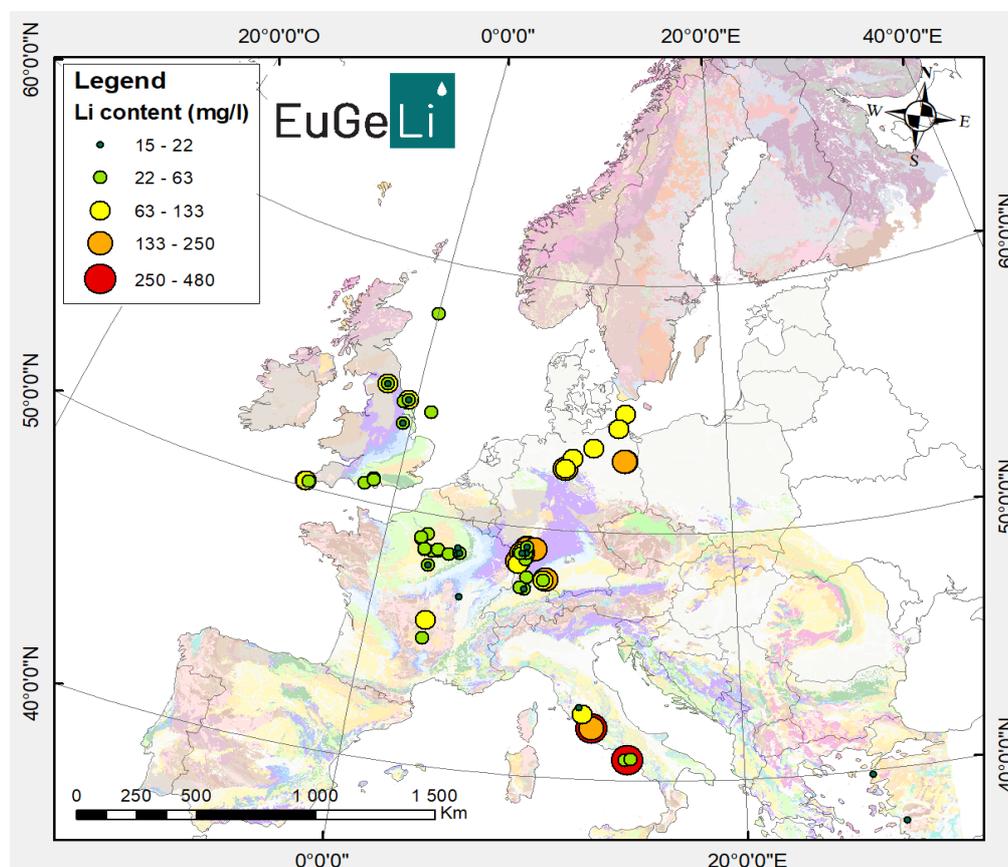


Fig. 1. – Carte de l'Europe indiquant les sites où les concentrations de Li ≥ 15 mg/l, analysées dans les fluides des forages géothermiques, pétroliers et miniers. Cette carte a été réalisée dans le cadre du projet européen EuGeLi.

Localisation du site	Profondeur du réservoir (m)	Roches réservoir	T _{mesurée} (°C)	T _{estimée réservoir} (°C)	Salinité du fluide (g/l)	pH	Na (g/l)	Cl (g/l)	Li (mg/l)
Campi Flegrei (Italie)	2699	Séries volcano-sédimentaires	350 - 380	380	516			314	480
Cesano (Italie)	3219	Séries volcano-sédimentaires (Trias)	350	350	350 - 390	7,9 - 8,5	60 - 80	28 - 43	220 - 380
Groß Schönebeck (Bassin du Nord de l'Allemagne)	4309 - 4400	Grès et volcanites (Rotliegend, Permien Inférieur)	150	220	212 - 269	5,5		128 - 167	180 - 201
Cronenbourg (Fossé rhénan, France)	2870	Formation sédimentaire du Buntsandstein (Trias)	140	200 - 250	104	6,7	32	62	210
Bruchsal (Fossé rhénan, Allemagne)	2542	Formation sédimentaire (Trias - Permien)	120	200	121	5,1	35	74	159
Rittershoffen, Soultz (Fossé rhénan, France)	2580 - 5000	Granite (Carbonifère) - Buntsandstein (Trias)	160 - 200	200 - 250	99 - 101	5,0 - 6,3	28	59	173 - 190
Landau, Insheim (Fossé rhénan, Allemagne)	3044 - 3600	Granite (Carbonifère) - Buntsandstein (Trias)	160 - 165	200 - 250	106 - 107	5,0 - 5,2	28 - 30	64 - 65	168 - 182
Bassin molassique (SO de l'Allemagne)	1914 - 1976	Calcaire (Muschelkalk Supérieur)	67 - 94	210	55 - 62	6,4 - 6,8	19 - 22	30 - 33	143 - 162
Mine de South Crofty (Cornouailles, Royaume-Uni)	690	Granite Cammenellis, batholite Carnubien - Permien (290 Ma)	52	50 - 70	19	6,5	4,3	11,5	125
Mine de sel d'Asse (Nord de l'Allemagne)	500 - 1000	Sel (halite, potasse, carnallite,...) Zechstein (Permien supérieur)	28 - 35	30 - 50	290 - 375		1,1 - 50	170 - 270	100 - 190
Mine de sel de Gorleben (Nord de l'Allemagne)	500 - 1000	Sel (halite, potasse, carnallite,...) Zechstein (Permien supérieur)	30 - 50	30 - 50	≈ 390		≈ 125	≈ 200	100 - 490

Tabl. 1. – Principales caractéristiques des saumures géothermales européennes les plus riches en Li, ainsi que celles des eaux de mines (d'après le projet EuGeLi).

En Italie, les saumures se trouvent sur les sites géothermiques volcano-sédimentaires de Campi Flegrei, en Campanie, et de Cesano, dans le Latium, non loin du fameux site de Larderello, en Toscane, alors que pour l'Allemagne et la France, les sites géothermiques du Fossé rhénan, du Bassin du nord de l'Allemagne et du Bassin molassique du sud-ouest de l'Allemagne, sont localisés dans des bassins sédimentaires profonds reposant sur un socle cristallin, constitué principalement de granite. Malheureusement, les forages géothermiques des deux régions italiennes, réalisés dans les années 70-80 n'étant pas assez producteurs, ont été bouchés et ne sont plus disponibles, tandis que la plupart des forages profonds des autres régions sont accessibles, avec des débits de production qui varient généralement de 100 à 300 m³/h.

En ce qui concerne les concentrations de lithium comprises entre 90 et 150 mg/l, on trouve, bien évidemment, plus de sites dans le monde, comme par exemple, les bassins chinois du Qaidam, du Sichuan, du Qiajiang et du Jitai, où les concentrations de Li dans des saumures de salinité très élevée (320-380 g/l) sont comprises entre 90 et 110 mg/l, ou bien la plateforme sibérienne, en Russie, avec des concentrations de Li de 90 à 150 mg/l, dans des saumures de forte salinité (272-516 g/l). Par contre, dans l'étude européenne (projet EuGeLi), on ne citera que le site minier de South Crofty, en Cornouailles, au Royaume-Uni, où l'eau profonde, d'origine météorique, qui n'est pas une saumure (salinité d'environ 19 g/l), circule dans le granite, et acquiert, par interaction avec ce dernier, à des températures de 50-70°C, une concentration de Li de 125 mg/l, étonnamment élevée par rapport aux autres eaux plus salées et plus chaudes. La source principale du Li est attribuée à la dissolution de biotite par les auteurs. Certaines saumures des mines de sel d'Allemagne du Nord évoquées précédemment, à très forte salinité et faible température, présentent aussi des concentrations de Li dans cette gamme de concentrations.

Cette étude européenne a également montré qu'à l'exception des sites miniers, toutes les eaux avec des concentrations de Li ≥ 90 mg/l sont portées à des températures de réservoir supérieures à 120°C, indiquent des salinités ≥ 56 g/l et possèdent des concentrations de sodium et de chlorure supérieures à 18 et 25 g/l, respectivement (fig. 2). En dessous de 120°C, même si les eaux ont des salinités élevées, comme dans le Bassin parisien ou les champs pétroliers de mer du Nord, les concentrations de Li sont en dessous du seuil de 90 mg/l (fig. 2), contrairement à celles de certaines saumures chinoises, russes et américaines citées auparavant, dont les températures sont pourtant aussi inférieures à 120°C. Des eaux géothermales portées à haute température ($\geq 250^\circ\text{C}$), mais avec des salinités de l'ordre de 10 à 20 g/l, comme celles du Tatio, au Chili, ou de Wairakei, en Nouvelle-Zélande, peuvent contenir des concentrations de Li de 10 à 35 mg/l.

Parfois même, des fluides à salinité élevée (≥ 60 g/l) et haute température ($\geq 225^\circ\text{C}$), comme ceux du rift d'Asal, à Djibouti, et de Baja California Peninsula, au Mexique, affichent également des concentrations de Li plutôt basses (13-16 mg/l).

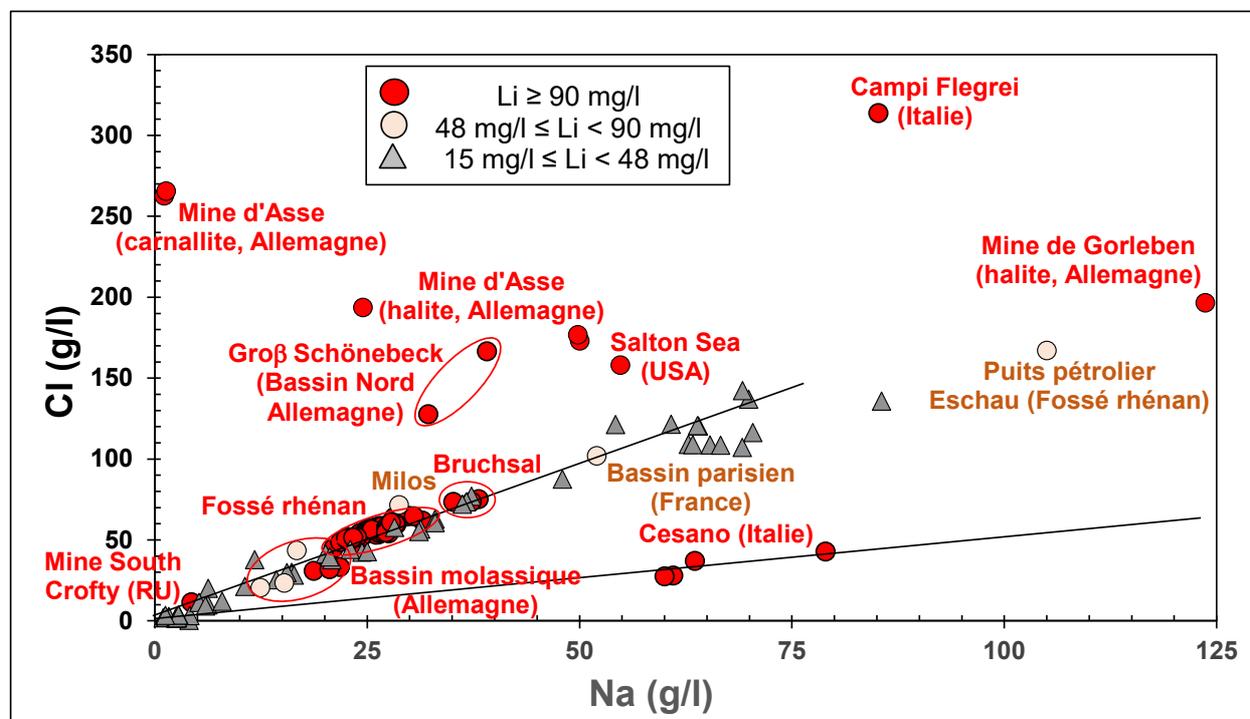


Fig. 2. – Diagramme chlore/sodium, sur lequel sont reportées les teneurs de Li pour toutes les eaux géothermales de la base de données européenne (réalisation dans le cadre du projet EuGeLi). Les eaux de mines riches en Li sont également représentées.

Toutes ces observations viennent confirmer le fait que les concentrations de Li dans les eaux géothermales ne dépendent pas seulement de la température et de la salinité des fluides, mais aussi de la nature de la roche réservoir. Pour les saumures géothermales dont la température est supérieure à 120°C , ces observations concordent avec l'existence de plusieurs relations thermométriques Na-Li (fig. 3) définies de manière empirique pour estimer la température des réservoirs en fonction non seulement du rapport Na/Li, mais aussi des deux autres paramètres (salinité des fluides et nature de la roche réservoir).

Les éléments chimiques non réactifs des saumures, tels que le chlore et le brome, et une importante part du sodium, peuvent avoir plusieurs origines, dont les deux principales semblent être le résultat de :

- processus d'évaporation d'eau de mer, allant au moins jusqu'à la précipitation d'halite (NaCl), avec très probablement des cycles de dissolution et de précipitation de ce

minéral, suivant les périodes sèches et humides (mélange avec des eaux d'origine météorique) et les cycles de transgression-régression marine, comme pour les saumures géothermales du Fossé rhénan, en France et en Allemagne, ou celles des bassins molassiques et du Nord de l'Allemagne, par exemple ;

- processus d'évaporation d'eau douce continentale et de dissolution d'halite, suivant des cycles de périodes sèches et humides, comme pour les saumures géothermales de Salton Sea, aux USA.

Pour toutes les saumures portées à des températures $\geq 120^{\circ}\text{C}$, la plupart des espèces réactives majeures, telles que Na, K, Ca, Mg, HCO_3 et SO_4 , sont contrôlées par des processus hydrothermaux d'interaction eau-roche-gaz et résultent de réactions chimiques à l'équilibre, à la température du réservoir. Ces réactions sont généralement régies par la dissolution des plagioclases et du feldspath potassique, suivie par l'albitisation de ces minéraux, la dissolution des micas et des biotites et la précipitation de minéraux argileux tels que les smectites (jusqu'à $150\text{-}200^{\circ}\text{C}$), l'illite ($150\text{-}250^{\circ}\text{C}$), puis la chlorite ($\geq 200^{\circ}\text{C}$) ou de sels comme l'anhydrite (CaSO_4). Pour toutes ces eaux, le rapport Na/K est systématiquement contrôlé par l'équilibre chimique existant entre le feldspath potassique et l'albite à la température du réservoir, ce qui permet d'estimer ou de confirmer, à l'aide du géothermomètre intégrant ce rapport, la température du réservoir.

Les systèmes géothermiques de haute-température ($\geq 200^{\circ}\text{C}$) sont généralement associés à des milieux volcaniques relativement jeunes ($< 1\text{ Ma}$), dont la source de chaleur est fournie par des intrusions de composition communément rhyolitique à andésitique ou basaltique. Dans ces systèmes, le fluide géothermal profond est de type Na-Cl et l'influence magmatique (présence de roches volcaniques et dégazage du magma), ainsi que les processus d'interaction eau-roche-gaz à haute-température, sont probablement les principales origines primaires du lithium. Les saumures portées à de très hautes températures ($300\text{-}380^{\circ}\text{C}$), en milieu volcano-sédimentaire, comme celles des sites géothermiques de Cesano et des Campi Flegrei, en Italie, Salton Sea, aux USA, ou Milos, en Grèce, suivent bien les relations thermométriques Na-Li, qui avaient été définies pour les milieux volcaniques (fig. 3).

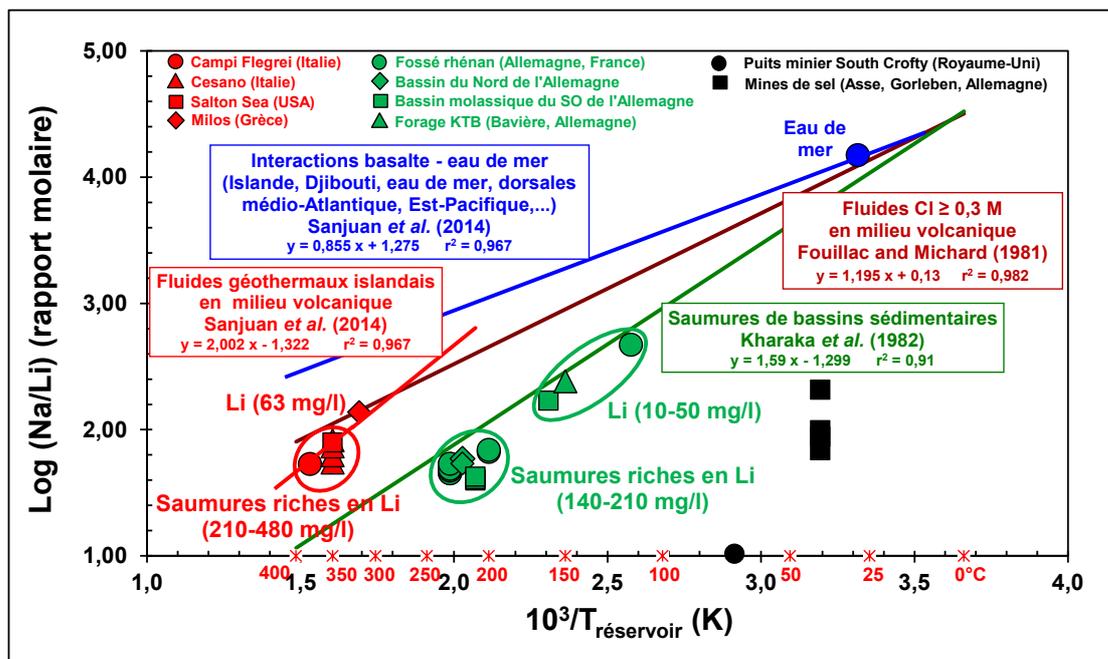


Fig. 3. – Positionnement des saumures géothermales ($T \geq 120^{\circ}\text{C}$) les plus riches en lithium dans un diagramme $\text{Log}(\text{Na}/\text{Li})$ en fonction de $1000/T_{\text{réservoir}}(\text{K})$ par rapport aux principales relations thermométriques Na-Li existant dans la littérature pour ce type d'eau (le rapport Na/Li est un rapport molaire, $T_{\text{réservoir}}$ est la température estimée des réservoirs géothermiques des saumures en utilisant le géothermomètre Na-K). Les eaux de mine ($T \leq 70^{\circ}\text{C}$) ne suivent pas ces relations thermométriques.

Les systèmes géothermiques de haute-température sans source de chaleur magmatique associée sont moins communs et plus profonds (bassins tectono-sédimentaires tels que les fossés d'effondrement, par exemple). Néanmoins, les saumures de ces bassins, dont les sédiments reposent généralement sur un socle cristallin (granite, par exemple), peuvent indiquer des concentrations de Li similaires à celles observées en milieu volcanique, et à des températures plus basses (tabl. 1). C'est le cas des saumures géothermales du Fossé rhénan ou du bassin du Nord de l'Allemagne, qui se trouvent, respectivement, dans les formations de grès du Trias (Buntsandstein) et du Permien (Rotliegend), formées à partir du démantèlement du socle, en grande partie granitique. C'est aussi le cas des saumures profondes du Fossé rhénan qui proviennent du socle granitique, mais dont la composition chimique et les valeurs isotopiques de lithium et de strontium suggèrent que ces saumures auraient plutôt été produites dans les formations de grès du Trias, à des températures de l'ordre de $200\text{-}250^{\circ}\text{C}$. Étant donné le gradient géothermique estimé dans cette région à $50\text{-}60^{\circ}\text{C}/\text{km}$, ces saumures se seraient formées au centre du fossé, là où les formations sédimentaires sont les plus profondes ($\geq 4\text{ km}$), et auraient ensuite migré vers les bordures ouest du fossé, à la fois dans les formations sédimentaires et dans le socle granitique, à travers un système complexe de failles NW-SE et NE-SW. On sait que ce type de roches (granites, pegmatites, grès...) peuvent contenir d'importantes concentrations de Li.

Toutes ces saumures suivent à peu près la relation thermométrique Na/Li définie pour les saumures profondes de bassins sédimentaires (fig. 3).

Les concentrations de Li, dans les saumures géothermales à $T \geq 120^{\circ}\text{C}$, semblent être principalement contrôlées par la présence de minéraux argileux car cet élément s'incorpore facilement dans leurs couches octaédriques. D'après des données de la littérature, ainsi que de considérations thermodynamiques tirées des relations thermométriques Na-Li et de données de fractionnement isotopique de Li, les principales sources de cet élément semblent être la dissolution des micas et des biotites. Dans certains cas, une partie de ce lithium pourrait être aussi remobilisé par la précipitation d'illite, car le lithium peut facilement se substituer au magnésium (rayon de taille équivalente) dans les sites octaédriques de ce type de minéraux. Pour les saumures issues du Fossé rhénan, la source principale de Li serait la dissolution des micas des grès du Buntsandstein. Le socle granitique qui contient aussi de tels minéraux pourrait aussi y contribuer, mais à un moindre degré, comme le suggèrent des travaux expérimentaux d'interaction saumure-granite, qui ont été menés en laboratoire jusqu'à des températures de 200°C .

Les concentrations de Li des saumures géothermales (15-500 mg/l) sont, en général, moins élevées que celles des *salars* (200-5 000 mg/l), provenant de l'évaporation de grands lacs salés, exploités en surface, dans la cordillère des Andes, au Chili, en Bolivie et en Argentine, et sur le plateau tibétain, en Chine. Si les coûts associés à ce dernier type d'exploitation sont relativement bas, il existe, néanmoins, plusieurs inconvénients : la lenteur du processus basé sur l'évaporation naturelle (jusqu'à 2 ans), la dépendance aux conditions climatiques, un taux de rendement de seulement 50 % et l'éloignement de ces ressources pour les marchés européens.

De plus, en ce qui concerne les saumures géothermales, elles constituent une source de chaleur qui est également exploitable et peut les rendre compétitives, sans compter les avantages de la proximité de ces ressources. Si les valeurs des concentrations de Li de ces saumures ne semblent pas être le facteur qui peut bloquer une exploitation pour extraire cet élément, il faut maintenant s'intéresser à évaluer le volume de ces masses d'eau, à mieux comprendre leur origine et leur circulation profonde en milieu fracturé, ainsi que la source de leur alimentation en Li, pour donner une estimation aussi précise que possible des ressources en lithium de ces saumures. C'est une information clé si l'on veut progresser dans le développement de ce type d'exploitation.

B. Sanjuan, B. Gourcerol, R. Millot

BRGM