



HAL
open science

Le lithium dans les eaux géothermales du Fossé rhénan : de la découverte à la modélisation de la ressource

Antonin Richard, Elza Dugamin, Michel Cathelineau, Marie-Christine Boiron,
Frank Despinois, Jeanne Vidal, Laurent Nicolas, Ricardo Perez, Albert Genter

► To cite this version:

Antonin Richard, Elza Dugamin, Michel Cathelineau, Marie-Christine Boiron, Frank Despinois, et al.. Le lithium dans les eaux géothermales du Fossé rhénan : de la découverte à la modélisation de la ressource. *Géologues*, 2024, 221, pp.39-44. hal-04621542

HAL Id: hal-04621542

<https://hal.univ-lorraine.fr/hal-04621542v1>

Submitted on 12 Jul 2024

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.

Le lithium dans les eaux géothermales du Fossé rhénan : de la découverte à la modélisation de la ressource

Antonin Richard¹, Elza J.M. Dugamin², Michel Cathelineau³, Marie-Christine Boiron⁴, Frank Despinois⁵, Jeanne Vidal⁶, Laurent Nicolas⁷, Ricardo Perez⁸, Albert Genter⁹

Article publié dans la revue *Géologues*, sous la référence :

Richard, A., Dugamin, E.J.M., Cathelineau, M., Boiron, M.-C., Despinois, F., Vidal, J., Nicolas, L., Perez, R., Genter, A. (2024). Le lithium dans les eaux géothermales du Fossé rhénan : de la découverte à la modélisation de la ressource. Géologues, 221, 39-44.

Les eaux géothermales du Fossé rhénan contiennent du lithium dans des concentrations qui rendent possible une co-production d'électricité ou chaleur et de lithium, concept séduisant dans un contexte de transition énergétique. Ici, nous résumons les principales étapes de découverte de la ressource en lithium depuis les années 1980, les avancées récentes sur la compréhension des processus d'enrichissement en lithium dans les eaux géothermales, et enfin les enjeux liés à l'exploration et à la modélisation des réservoirs et de la ressource.

Introduction

Les « minerais liquides », notamment les eaux de formation des bassins sédimentaires, pourraient contribuer significativement à répondre à la demande mondiale croissante en lithium (Dugamin et al., 2021 ; Gourcerol et al., 2024). Le couplage avec la géothermie et le développement de procédés d'extraction directe du lithium (DLE) permettent d'envisager une production plus locale que celle des salars, et plus bas-carbone que celle des mines en roche dure (Vera et al., 2023). Cependant, dans cette filière émergente, les stratégies d'exploration du lithium géothermal ne sont pour le moment pas fondées, comme dans les industries pétrolières ou minières, sur une compréhension fine du « système lithium ». Cette compréhension passe notamment par l'identification de la source des eaux lithinifères, des roches sources de lithium, ainsi que des processus d'interactions fluides-roches et de transferts de fluides en lien avec la thermicité et la déformation. Ce constat a motivé de nombreux travaux de recherche, notamment dans le Fossé rhénan (Fig. 1), dont les résultats alimentent à leur tour la modélisation des réservoirs et la stratégie d'exploration. Cet article rend compte de cette synergie entre recherches fondamentales et opérationnelles, depuis les premières études dans les années 1980, jusqu'aux travaux en cours.

¹ Université de Lorraine, CNRS, GeoRessources – antonin.richard@univ-lorraine.fr

² Université de Lorraine, CNRS, GeoRessources – elza.d.ed@gmail.com

³ Université de Lorraine, CNRS, GeoRessources – michel.cathelineau@univ-lorraine.fr

⁴ Université de Lorraine, CNRS, GeoRessources – marie-christine.boiron@univ-lorraine.fr

⁵ TotalEnergies – frank.despinois@totalenergies.com

⁶ Lithium de France – jeanne.vidal@lithiumdefrance.com

⁷ Lithium de France – laurent.nicolas@lithiumdefrance.com

⁸ Lithium de France – ricardo.perez@lithiumdefrance.com

⁹ Electricité de Strasbourg – albert.genter@es.fr

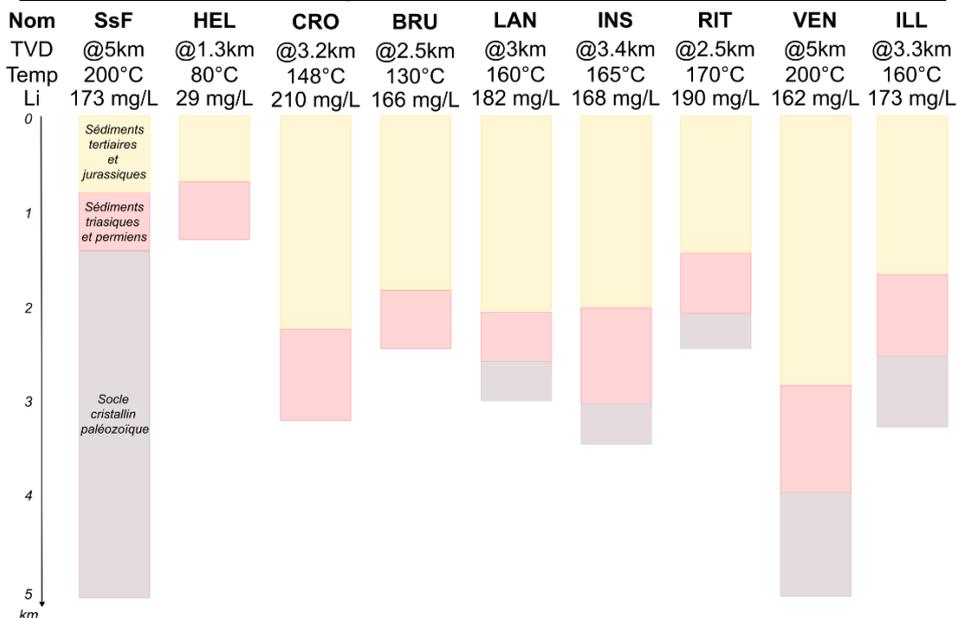
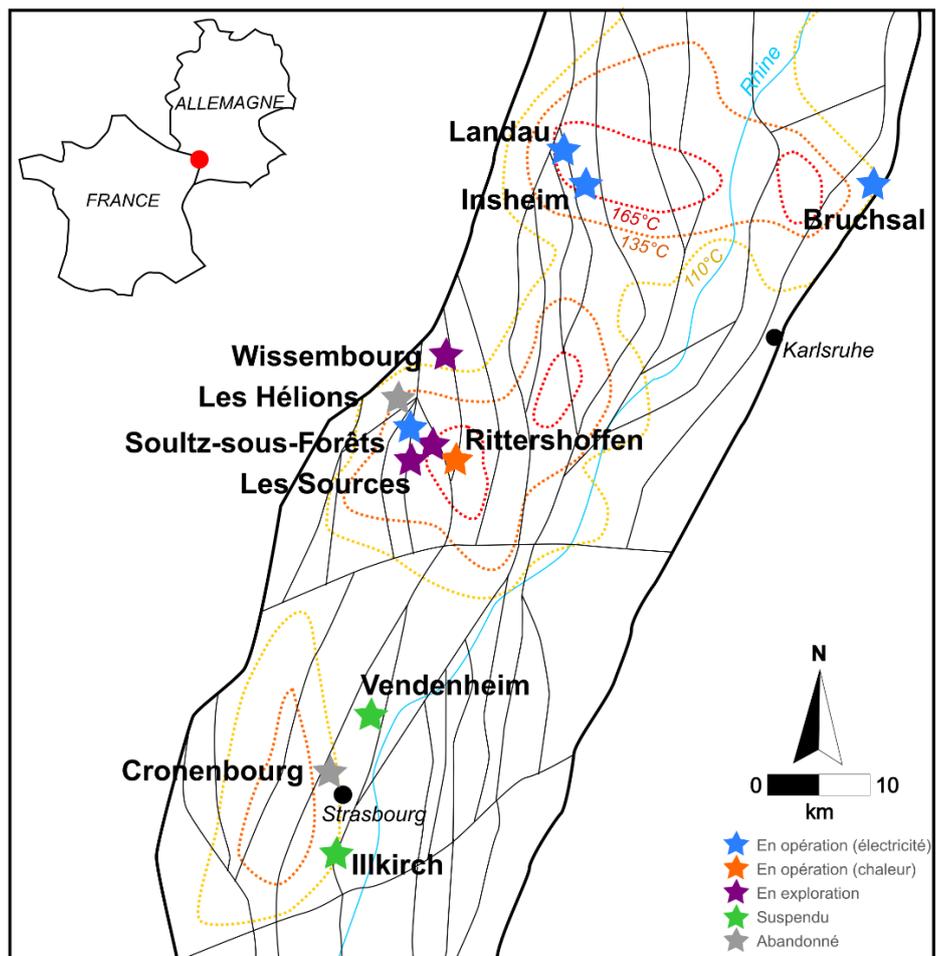


Figure 1. Carte des projets dans la partie centrale du Fossé rhénan. Les isothermes à 2 km sont indiquées d'après Baillieux et al. (2013) et la trace des failles principales au toit du socle d'après le géoportail GeORG (GeORG Team, 2017). La température et teneur en Li des fluides sont issues de Pauwels et al. (1991), Sanjuan et al. (2016), Bosia et al. (2021). Les profondeurs des puits sont exprimées en profondeur verticale totale (TVD). SsF : Soultz-sous-Forêts, HEL : Les Héliions, CRO : Cronembourg, BRU : Bruchsal, LAN : Landau, INS : Insheim, RIT : Rittershoffen, VEN : Vendenheim, ILL : Illkirch.

Historique de la découverte du lithium géothermal dans le Fossé rhénan

Les teneurs élevées en lithium, entre 100 et 400 mg/L, mises en évidence dans les années 1970 dans le champ géothermique de Salton Sea en Californie, ont inspiré les chercheurs français à s'intéresser à cet élément. En effet, les premiers travaux sur la connaissance du lithium géothermal dans le Fossé rhénan datent des années 1980. Une première analyse géochimique a été réalisée sur un échantillon de fluide géothermal prélevé à la suite des essais de production du forage d'exploration géothermique de Cronembourg au nord de Strasbourg (Housse, 1984). Ce forage, qui avait atteint la profondeur de 3220 m dans les grès attribués au Permien, a produit un fluide ayant une salinité totale de 105 g/L (ce qui permet de qualifier ce fluide de « saumure ») avec une concentration élevée en lithium de 210 mg/L (Fritz, 1980). La température au fond du puits a été mesurée à 148°C et les zones perméables provenaient essentiellement des grès du Buntsandstein fissurés (2982-3028 m). Les débits estimés à 20 m³/h ont été jugés trop faibles pour permettre la poursuite de ce projet. Une seconde caractérisation géochimique du fluide géothermal de Cronembourg a été réalisée dans le cadre d'un projet de recherche mené par le BRGM sur l'extraction du lithium des saumures (Pauwels et al., 1990). La concentration de cet élément mesurée dans les laboratoires du BRGM a été de 220 mg/l pour une salinité totale de 103 g/L. Des analyses en lithium des eaux du Trias alsacien donnent des valeurs respectives de 29,6 mg/L pour le Muschelkalk/Buntsandstein du forage des Hélicons à Merckwiller et de 141,6 mg/l pour l'ancien forage pétrolier 4616 de Soultz-sous-Forêts (Pauwels et al., 1991) (Fig. 1).

En parallèle à ces données hydrogéochimiques, une estimation des ressources en lithium a été réalisée par le BRGM sur un secteur de 900 km² autour de la zone de Soultz-sous-Forêts (Pauwels et al., 1991). Les réservoirs géothermiques fracturés considérés à l'époque sont ceux des formations clastiques et calcaires du Muschelkalk (épaisseur 170 m) et les grès du Buntsandstein (épaisseur 450 m), y compris le Permien gréseux. Le socle cristallin fracturé n'avait pas été pris en compte. S'inspirant des travaux sur les géothermomètres Na/Li (Fouillac et Michard, 1981 ; Kharaka et al., 1982), la détermination d'une bonne corrélation spatiale, à partir de la température du réservoir mesurée dans des puits profonds et les concentrations en sodium, a permis d'en estimer les concentrations en lithium. Ces calculs ont utilisé pour calibration les concentrations en lithium des puits de Soultz (4616, GPK1) et celui de Cronembourg. Il en résulte qu'une prédiction de la ressource en lithium des réservoirs des deux formations a été rendue possible grâce à cette approche empirique. Malgré la compartimentation en blocs de ces formations séparées par des failles normales à fort rejet vertical et la connaissance réduite des paramètres permettant de quantifier leur part exploitable, l'estimation proposée de leur ressource utile en place varie entre 300 000 et 2 200 000 de tonnes de lithium métal selon différentes variantes pour les formations du Muschelkalk et du Buntsandstein. L'étude conclut qu'environ un million de tonnes serait disponible dans ces réservoirs potentiels du Trias moyen et inférieur d'Alsace du Nord, confirmant l'importance du gisement à l'échelle européenne (Pauwels et al., 1991).

Côté allemand du Fossé, plusieurs projets de géothermie profonde ont été réalisés pour atteindre le Permo-Trias gréseux ou le socle cristallin dans le Palatinat (Landau, Insheim) et dans le Bad Wurtemberg (Bruchsal). En parallèle, côté alsacien, plusieurs forages ont été réalisés à Rittershoffen, Vendenheim et Illkirch. Tous ces puits se caractérisent par la présence de saumures ayant des concentrations en lithium significatives autour de 180 mg/L, qui sont parmi les plus riches d'Europe (voir les résultats du projet EuGeLi pour la synthèse du potentiel pour le lithium géothermal à l'échelle européenne (Sanjuan et al., 2022, Gourcerol et al., 2024)). D'après leurs caractéristiques géochimiques, ces saumures suivent à peu près la relation

thermométrie Na/Li définie pour les saumures profondes de bassins sédimentaires (Kharaka et al., 1982).

Sources et processus d'enrichissement en lithium en dans les saumures

Les leçons de l'analyse d'une base de données à l'échelle mondiale

Dans le but de développer la valorisation des espèces métalliques présentes dans les saumures de bassin, il est nécessaire d'établir un bilan des teneurs en éléments valorisables dans ces eaux et de mieux comprendre les mécanismes d'enrichissement. Dans le cadre de la thèse d'Elza Dugamin à GeoRessources (Université de Lorraine), financée par One Tech / TotalEnergies, une base de données a été réalisée comprenant des températures et compositions chimiques et isotopiques pour des eaux de formations des bassins sédimentaires (3700 analyses) et des inclusions fluides ayant préservé des eaux de formations anciennes (1700 analyses) de 90 bassins sédimentaires du monde entier, à partir de données tirées de la littérature (1974-2020) (Dugamin, 2022).

Les résultats de l'exploitation de cette base de données montrent que les concentrations en lithium atteignent fréquemment plusieurs dizaines à centaines de mg/L. Ces concentrations sont très nettement supérieures à celle de l'eau de mer (0,2 mg/L) et sont parfois comparables à celles que l'on trouve dans les salars andins (jusqu'à env. 1000 mg/L) où le lithium est exploité. Les concentrations en lithium sont en première approximation corrélées à la salinité des eaux de formation (Fig. 2).

Ce constat amène les questions suivantes : (i) Quels sont les mécanismes de concentration en métaux dans les fluides de bassins ? (ii) Quels sont les rôles respectifs de l'enrichissement primaire (i.e. pendant la formation du fluide) versus secondaire (i.e. par interaction fluide-roche) pour les métaux dans les fluides de bassins ? (iii) Quels sont les grands réservoirs de roches sources de métaux dans les bassins ?

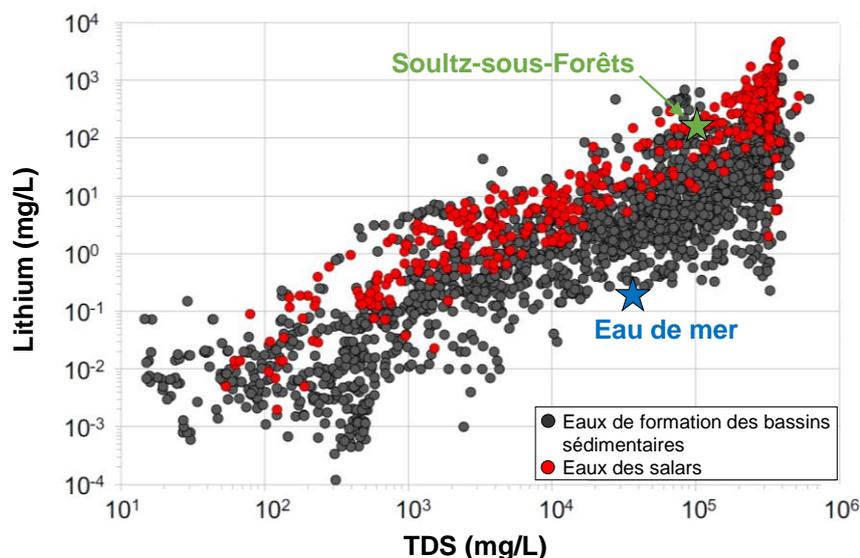


Figure 2. Concentration en lithium (en mg/L) versus salinité (en mg/L ; TDS = solides totaux dissous) dans les eaux de formation des bassins sédimentaires à l'échelle mondiale et comparaison avec les eaux des salars. Modifiée d'après Dugamin et al. (2021). Composition des saumures de Soultz-sous-Forêts d'après Sanjuan et al. (2016). Composition de l'eau de mer d'après Fontes and Matray (1993).

Le constat dressé ci-avant ouvre la question des processus d'enrichissement en lithium dans les saumures des bassins sédimentaires. La figure 3 permet de mettre en évidence les grands pôles de composition, ainsi que les mélanges entre ces pôles, d'après l'analyse de la base de données sur une sélection de 13 bassins (Dugamin *et al.*, 2023). Les grands pôles sont l'eau de mer, les saumures résultant de l'évaporation de l'eau de mer, les saumures enrichies en lithium (saumures lithinifères) et les eaux douces.

Les saumures lithinifères semblent être au moins en partie liées à l'évaporation de l'eau de mer, ayant dépassé le stade de saturation vis-à-vis de la halite, allant jusqu'à la saturation vis-à-vis de la bischofite. Cependant, ces saumures lithinifères ont des concentrations en lithium supérieures d'un ordre de grandeur à celle de l'eau de mer évaporée. Des interactions entre ces saumures et les différents porteurs de lithium dans les bassins, voire les socles sous-jacents, permettent aux fluides d'acquérir les concentrations en lithium les plus élevées. Les interactions fluides-roches sont liées à la migration de ces saumures lors de l'enfouissement ou d'épisodes tectoniques compressifs et extensifs. La préservation de ces saumures lithinifères n'est possible que lorsqu'elles ne sont pas diluées par des eaux de recharge de plus faible salinité.

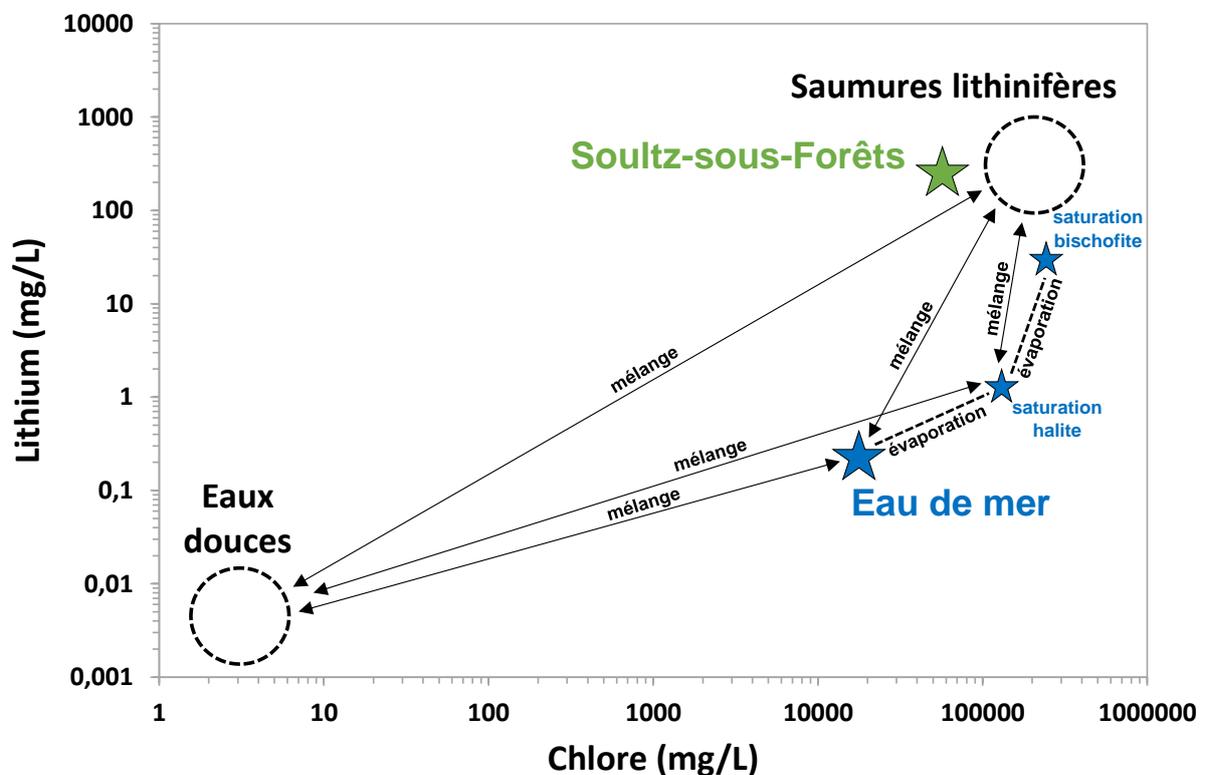


Figure 3. Grands pôles de composition (chlore versus lithium en mg/L), ainsi que les mélanges mis en évidence entre ces pôles, d'après l'analyse détaillée de 13 bassins (modifiée d'après Dugamin *et al.* (2023)). Composition des saumures de Soultz-sous-Forêts d'après Sanjuan *et al.* (2016). Composition de l'eau de mer pendant l'évaporation d'après Fontes and Matray (1993).

Vers une compréhension du « système lithium » dans le Fossé rhénan

Certains travaux tendent à accorder davantage d'importance aux roches sédimentaires comme source de lithium. Sanjuan *et al.* (2022) suggèrent que les concentrations en lithium dans les saumures géothermales à $T > 120^{\circ}\text{C}$ sont principalement contrôlées par la présence de micas et de minéraux argileux car cet élément s'incorpore facilement dans leurs couches

octaédriques. Ces auteurs évoquent, comme source principale de lithium, la dissolution des micas des grès du Buntsandstein, dont les teneurs, mesurées à Bruchsal, varient entre 20 et 80 ppm (Kölbel *et al.*, 2023). Par ailleurs, des travaux expérimentaux d'interaction saumure-granite indiquent que le socle granitique pourrait également y contribuer par la présence de biotite, muscovite et chlorite (Drüppel *et al.*, 2020).

D'autres travaux ont permis de mettre en évidence la forte mobilité du lithium dans le socle. La réalisation de forages géothermiques de Soultz-sous-Forêts a permis la prise d'échantillons sous forme de carottes ou de cuttings. Les premières données sur la concentration en lithium proviennent d'analyses géochimiques en roche totale faites dans des faciès de monzogranite sain ou fortement hydrothermalisé d'échantillons de carottes du forage GPK1 de Soultz. On trouve en moyenne 37 ppm de lithium pour les faciès de monzogranite sain et 25 ppm en moyenne pour les faciès de granite hydrothermalisé (Genter, 1989). Des études minéralogiques approfondies sur les carottes du sondage EPS1 ont mis en évidence une concentration de lithium dans la roche atteignant localement 1447 ppm (Ledéseret *et al.*, 1999). Ensuite, très localement de la tosudite a été mise en évidence par de la diffraction de rayons X dans ce forage (Bartier *et al.*, 2008). Des cartographies mono-élémentaires sur échantillons de carottes via la technique LIBS (spectrométrie d'émission atomique de plasma induit par laser) ont mis en évidence que le lithium était principalement stocké dans les biotites primaires des faciès sains de monzogranite (Genter *et al.*, 2024). Dans les faciès hydrothermalisés de granite, ces cartographies sont plus contrastées avec des faciès complètement lessivés en lithium tandis que d'autres montrent des enrichissements significatifs (Glaas *et al.*, 2022).

Les travaux de la thèse d'Elza Dugamin se sont concentrés sur le cas du système de Soultz-sous-Forêts (forages EPS-1 et GPK-3), à travers l'analyse des métaux dans des inclusions fluides et les roches et minéraux du bassin et du socle cristallin par analyses sur roche totale et analyses in situ par LA-ICP-MS (spectrométrie de masse à plasma induit par couplage inductif par ablation au laser), en comparant notamment la composition du granite sain et altéré (Fig. 4). Le but était d'établir un bilan des transferts en métaux liés aux interactions saumures-granite de l'Oligocène à l'Actuel. L'analyse géochimique des inclusions fluides et minéraux témoignant d'interactions saumures-granite a permis de montrer que l'enrichissement en lithium des fluides du réservoir géothermal de Soultz-sous-Forêts résulte de la série d'événements suivants (Dugamin *et al.*, 2024) :

(1) L'évaporation de l'eau de mer au cours du Trias est responsable des dépôts d'évaporites. Les saumures ainsi formées ont pu s'infiltrer dans le granite sous-jacent lors des premiers stades de la sédimentation triasique. De plus, ces saumures ont pu être piégées dans la microporosité des évaporites, avant d'en être expulsées au cours du Mésozoïque et du Cénozoïque lorsque ces dernières ont été enfouies sous la couverture sédimentaire et/ou soumises à la formation du rift.

(2) L'évaporation de l'eau de mer entraîne une concentration en lithium jusqu'à environ 1 mg/L lorsque la saturation en halite est dépassée. Ce processus d'enrichissement initial est important (facteur 10) par rapport à l'eau de mer. Cependant, cet enrichissement précoce ne peut expliquer la teneur actuelle en Li des eaux géothermales, proche de 150 mg/L, et celle des inclusions fluides (jusqu'à 1000 mg/L ; Fig. 4). Un processus supplémentaire d'interaction fluide-roche doit expliquer le facteur d'enrichissement observé de 2-3 ordres de grandeur par rapport à la saumure évaporitique.

(3) Les analyses montrent que le socle granitique sain et le granite altéré par illitisation contiennent 30-40 ppm de lithium (valeurs proches de celles de Genter, 1989), alors que les faciès altérés présentant une forte carbonatation contiennent 10-20 ppm de lithium. Les analyses montrent également que la teneur en lithium des minéraux ferromagnésiens (biotite et chlorite) peut atteindre 800 ppm. Lors des interactions saumures-granite, le lithium et les métaux qui l'accompagnent ont été libérés dans les saumures. La dissolution des phases porteuses et leur remplacement par une association illite-dolomite libèrent le lithium, à des températures de 130 à 160°C pour des profondeurs de 2 à 5 km. Une fois libérés, les métaux sont partiellement piégés lors de la cristallisation de minéraux néoformés tels que le quartz, l'illite et la tosudite. La quantité relativement faible de minéraux néoformés et leur faible teneur en lithium signifient que la majeure partie du lithium est transférée vers le fluide du réservoir. La convection thermique a favorisé le renouvellement des solutions et le mélange entre les saumures lithinifères et les fluides météoriques issus des reliefs et infiltrés le long des failles bordières du rift. Le taux de mélange entre les saumures lithinifères et ces fluides de recharge contrôle *in fine* la salinité et la concentration en lithium des eaux géothermales.

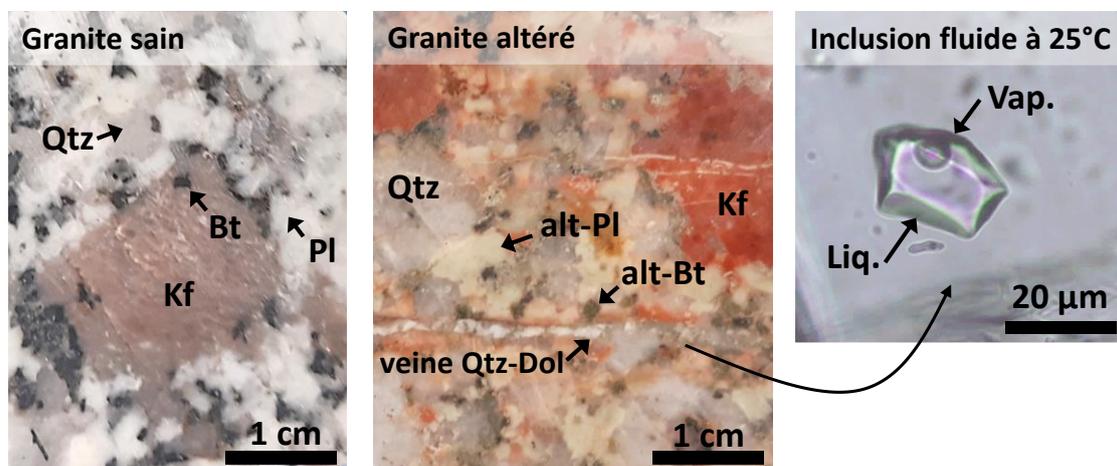


Figure 4. Comparaison entre faciès sain (gauche) et altéré (centre) du granite de Soultz-sous-Forêts. Les inclusions fluides analysées (droite) proviennent de veines de quartz-dolomite des faciès altérés. Kf: feldspath potassique; Pl: plagioclase; Bt: biotite; Qtz: quartz; Dol: dolomite; alt-Pl: plagioclase altéré et remplacé par illite; alt-Bt: biotite altérée et remplacée par assemblage dolomite-illite ; Liq. : phase liquide ; Vap. : phase vapeur. Modifiée d'après Dugamin et al. (2024).

Exploration du réservoir et enjeux de la modélisation de la ressource lithium

De la campagne d'exploration au modèle géologique

Les projets de co-production d'électricité ou chaleur et de lithium en cours de développement dans le Fossé rhénan visent la ressource circulant dans les zones d'endommagement de failles à l'interface entre la couverture sédimentaire et le socle. Lorsque les réservoirs ciblés présentent des lithologies adaptées et sont à des profondeurs adéquates, les projets s'appuient sur la production d'une imagerie 3D du réservoir à l'aide de la méthode de sismique réflexion (Toubiana et al., 2021). Cette imagerie 3D permet d'avoir une information sur la géométrie des structures faillées et la profondeur des différentes formations du sous-sol. En revanche, elle ne renseigne pas sur les circulations de saumures au sein de ces structures. Des méthodes géophysiques non sismiques peuvent alors être déployées comme l'électromagnétisme à source contrôlée (ou CSEM pour Controlled Source ElectroMagnetic)

dont les anomalies conductrices peuvent renseigner sur les circulations de fluides géothermaux (Darnet et *al.*, 2023). Ce sont ces données géophysiques qui, une fois interprétées, constituent les données d'entrée pour la création d'un modèle 3D structural du réservoir qui permettra d'élaborer les trajectoires jusqu'aux cibles identifiées ou encore comme base pour la modélisation dynamique du réservoir. Par ailleurs, des modèles de type « machine learning » pourraient permettre de prédire les concentrations en lithium dans les saumures en se fondant sur des bases de données hydrogéochimiques (Despinois et *al.*, 2021, Attanasi et *al.*, 2024).

Les défis de la modélisation du réservoir

Le développement des outils numériques de plus en plus performants facilite l'intégration de données géologiques, géophysiques et géochimiques aux modèles structuraux 3D pour produire des modèles de réservoir 2D ou 3D de plus en plus robustes. Des modèles Thermo-Hydro-Mécaniques (THM) couplés simulent les écoulements des fluides dans le réservoir et leurs effets en termes de pression et de température. Dans le contexte du Fossé rhénan, la difficulté se situe au niveau de la représentation des réservoirs faillés (Wynants-Morel et *al.*, 2024). Une approche double milieu permet également de rendre compte de la contribution des matrices et des fractures dans ces réservoirs fracturés mais peut allonger considérablement les temps de calcul (Delorme, 2015). Dans la mesure où les failles et les fractures jouent un rôle critique dans les écoulements, les modèles géomécaniques privilégient des représentations discrètes de ces objets (Wang et *al.*, 2022). Au stade de l'exploration, les modèles de réservoir sont particulièrement intéressants pour évaluer les comportements de ce dernier lors d'une future exploitation et évaluer le meilleur scénario en termes d'exploitation des ressources. Dans le cas du lithium géothermal, la modélisation de la distribution de la salinité et de la concentration en lithium dans la saumure ou encore des effets géochimiques de la réinjection de fluides appauvris en lithium dans le réservoir reste un enjeu majeur pour le développement des projets.

Les défis de la modélisation de la ressource

Une première approche de la modélisation de la ressource peut s'appuyer sur des modèles considérant le lithium comme un traceur inerte dans le fluide. Ils négligent les effets de température et donc de masse volumique et viscosité, afin d'étudier les effets de dilution dus à la réinjection d'un fluide froid appauvri en lithium dans le réservoir (Sonnenthal et *al.*, 2024). Ces modèles sont des outils stratégiques dans l'implantation des puits pour l'exploitation durable de la ressource lithium (O'Sullivan et *al.*, 2024) et la certification de cette dernière. Les modèles préliminaires basés sur une concentration moyenne de 176 mg/L dans le fluide exploité à un débit de 150 m³/h, prédisent une production de 230 tonnes de lithium par an et par puits de production soit approximativement 1200 tonnes de Li₂CO₃ équivalent (Sanjuan et *al.*, 2022). Sur la base des performances du doublet géothermique de Rittershoffen (débit de 300 m³/h) et d'une concentration analogue en Li, Fries et *al.* (2022) envisagent une production de 2000 tonnes de Li₂CO₃ équivalent par an.

D'autres approches permettraient d'évaluer les mécanismes d'enrichissement et de recharge de la ressource, à la fois locaux (interactions fluide-roche) et régionaux (prise en compte des boucles de convection à l'échelle du Fossé) (Lemgruber-Traby et *al.*, 2023). L'intégration d'outils de modélisation de transport réactif et de données thermodynamiques des minéraux clés dans la libération du lithium devraient contribuer à une meilleure compréhension de la distribution du lithium au sein des formations géologiques des réservoirs. Cependant ces modèles doivent être enrichis par des bases de données thermodynamiques des minéraux

porteurs ou encore par des expériences de lixiviation du lithium dans des échantillons de roches réservoir (Drüppel *et al.*, 2020). Ces modèles numériques et leur répliquabilité ne pourront être validés qu'à partir d'un calage et d'une extraction à l'échelle industrielle sur plusieurs mois.

Conclusion et perspectives

Les nombreux travaux réalisés depuis les années 1980 ont permis de nombreuses avancées sur la compréhension du « système lithium », qui trouvent leurs applications dans les stratégies actuelles d'exploration et de modélisation de la ressource. La forte activité actuelle d'exploration dans le Fossé rhénan et les nombreux travaux de recherche en cours et à venir, financés entre autres par l'ANR (dont le projet ciblé « Fossé rhénan » du PEPR), le BRGM, l'ADEME et les acteurs industriels et universitaires, laissent augurer de nombreux développements conceptuels et méthodologiques.

On pourra mentionner par exemple le fait que des méthodes électriques telles que la tomographie de résistivité électrique, qui ont fait leur preuve dans des contextes volcaniques, sont actuellement mises en œuvre par une équipe du laboratoire GeoRessources (Université de Lorraine) dans le contexte du Fossé rhénan (Cosme *et al.*, 2023). Par ailleurs, des caractérisations chimique et isotopique du lithium sur échantillons de granite du socle et de grès du Buntsandstein sont en cours de réalisation pour mieux étayer la source de cet élément et les principaux processus d'enrichissement dans les saumures par le BRGM. Une caractérisation des minéraux porteurs à l'aide d'un LIBS portatif de terrain s'inscrit également dans le développement de méthodologies de caractérisation routinières adaptées aux besoins opérationnels d'un projet industriel. Enfin, des travaux en cours à l'Université de Strasbourg tentent de comprendre le lien entre les changements paléoclimatiques et environnementaux et l'enrichissement en lithium dans les évaporites dans le but de développer une stratégie d'exploration du lithium dans les bassins de rift continentaux.

Bibliographie

- Attanasi, E.D., Coburn, T.C., Freeman, P.A., 2024. Machine learning approaches to identify lithium concentration in petroleum produced waters. *Mineral Economics*, sous presse, <https://doi.org/10.1007/s13563-023-00409-8>.
- Baillieux, P., Schill, E., Edel, J.-B., Mauri, G., 2013. Localization of temperature anomalies in the Upper Rhine Graben: insights from geophysics and neotectonic activity. *International Geology Review* 55, 1744-1762.
- Bartier, D., Ledésert, B., Clauer, N., Meunier, A., Liewig, N., Morvan, G., Addad, A. 2008. Hydrothermal alteration of the Soultz-sous-Forêts granite (Hot Fractured Rock geothermal exchanger) into a tosudite and illite assemblage. *European Journal of Mineralogy* 20, 131-142.
- Bosia C., Mouchot J., Ravier G., Seibt A., Janichen S., Degering D., Scheiber J., Dalmais E., Baujard C., Genter A., 2021. Evolution of brine geochemical composition during operation of EGS geothermal plants (Alsace, France). 46th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, California, Stanford University.
- Cosme, P. Geraud, Y, Diraison, M., Richard, A., Vidal, J., 2023. Heterogeneity of Geological Models and Reservoir Properties in the Context of Basin Floor - Basement Interaction. Fourth EAGE Global Energy Transition Conference and Exhibition, European Association of Geoscientists & Engineers, Paris.
- Darnet, M., Soubeyrand, D., Roche, P., Vidal, J., Bretaudeau, F., Beauois, F., François, B., 2023. Characterizing Geothermal and Lithium Resources in the Upper Rhine Graben

- (France) with Active Electromagnetic Methods. Fourth EAGE Global Energy Transition Conference and Exhibition, European Association of Geoscientists & Engineers, Paris.
- Delorme, M., 2015. Ecoulements en milieux fracturés : vers une intégration des approches discrètes et continues. Thèse de Doctorat, Université de Toulouse.
- Despinois, F., Porlan, A., Dugamin E., 2021. Lithium & metal recovery in saline aquifers for CO₂ storage. *Géologues* 211, 70-74.
- Dugamin, E.J.M., Richard A., Cathelineau, M., Boiron M.-C., Despinois, F., Brisset A., 2021. Groundwater in sedimentary basins as potential lithium resource: a global prospective study. *Scientific Reports* 11, 21091.
- Dugamin, E.J.M., 2022. Facteurs contrôlant les concentrations en métaux dans les eaux de formation des bassins sédimentaires. Thèse de doctorat, Université de Lorraine.
- Dugamin, E.J.M., Cathelineau M., Boiron M.-C., Richard A., Despinois F., 2023. Lithium enrichment processes in sedimentary formation waters. *Chemical Geology* 635, 121626.
- Dugamin, E.J.M., Boiron M.-C., Cathelineau M., Richard A., Peiffert C., Lebreton A., Banks D.A., Despinois, F., 2024. Brine-granite interaction and lithium leaching in a continental rift (Soultz-sous-Forêts, Rhine Graben, France). *Lithos* 478-479, 107604.
- Drüppel, K., Stober, I., Grimmer, J.C., Mertz-Kraus, R., 2020. Experimental alteration of granitic rocks: Implications for the evolution of geothermal brines in the Upper Rhine Graben, Germany. *Geothermics* 88, 101903.
- Fontes, J.C., Matray, J.M., 1993. Geochemistry and Origin of Formation Brines from the Paris Basin, France 1. Brines associated with Triassic salts. *Chemical Geology* 109, 149-175.
- Fouillac, C., Michard, G., 1981. Sodium/lithium ratio in water applied to geochemistry of geothermal reservoirs. *Geothermics* 10, 55-70.
- Fries, D., Lebouil, S., Maurer, V., Martin, C., Baujard, C., Ravier, G., Boguais, R., Amari, S., 2022. Lithium extraction through pilot scale tests under real geothermal conditions of the Upper Rhine Graben. *European Geothermal Congress 2022*, Berlin.
- Fritz, B., 1980. Géothermie Cronenbourg, analyses d'eaux. Centre de Sédimentologie et Géochimie de la Surface, Strasbourg, France.
- Genter A., 1989. Géothermie Roches Chaudes Sèches : le granite de Soultz-sous-Forêts (Bas-Rhin, France): fracturation naturelle, altérations hydrothermales et interaction eau-roche. Thèse de Doctorat, Université d'Orléans.
- Genter, A., Baujard, C., Dalmais, E., Glaas, C., Maurer, V., Ravier G., 2024. EGS development in Europe based on operational geothermal projects. In *EGS: the future energy-road ahead*, Taylor and Francis, CRC Press, UK.
- GeORG Team, 2017. EU-Projekt GeORG - Geoportal. URL <http://www.geopotenziale.org/home?lang=3>.
- Glaas, C., Genter, A., Devismes, D., Ravier, G., 2022. Lithium occurrences in the deep fractured crystalline reservoirs of the Upper Rhine Graben. *International Conference Groundwater, key to the Sustainable Development Goals*, Paris.
- Gourcerol, B., Sanjuan, B., Millot, R., Rettenmaier, D., Jeandel, E., Genter, A., Bosia, C., Rombaut, A., 2024. Atlas of lithium geothermal fluids in Europe. *Geothermics* 119, 102956.
- Housse, B.A., 1984. Reconnaissance du potentiel géothermique du Buntsandstein à Strasbourg-Cronenbourg, *Géothermie Actualités*, 1.
- Kharaka, Y.K., Lico, M.S., Law-Leroy M., 1982. Chemical geothermometers applied to formation waters, Gulf of Mexico and California basins. *AAPG Bulletin* 66, 588-595.
- Kölbel, L., Kölbel, T., Herrmann, L., Kaymakci, E., Ghergut, I., Poirel, A., Schneider, J., 2023. Lithium extraction from geothermal brines in the Upper Rhine Graben: A case study of potential and current state of the art. *Hydrometallurgy* 221, 106131.

- Ledésert, B., Berger, G., Meunier, A., Genter, A., Bouchet, A., 1999. Diagenetic-type reactions related to hydrothermal alteration in the Soultz-sous-Forêts Granite, France. *European Journal of Mineralogy* 11, 731-741.
- Lemgruber-Traby, A., Bossennec, C., Béthune, G., Souque, C., Divies, R., van der Vaart, J., Bär, K., Sass, I., 2023. Basin-scale 3D modelling of the northern Upper Rhine Graben: insights into basement fault-related geothermal flow pathways. *Geoenergy* 1, geoenergy2023-002.
- O'Sullivan, J., Naod, A., Popineau, J., Renaud, T., Riffault, J., O'Sullivan, M., 2024. Investigating ReInjection Strategies to Optimise Lithium Production from the Salton Sea Geothermal Field. 49th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, California.
- Pauwels, H., Brach, M., Fouillac, C., 1990. Lithium recovery from geothermal waters of Cesano (Italy) and Cronenbourg (Alsace, France). 12th New Zealand Geothermal Workshop, 117-123.
- Pauwels, H., Lambert, M., Genter, A., 1991. Valorisation des fluides géothermaux contenant du lithium en vue d'une production industrielle. Rapport public BRGM-IMRG R 33547.
- Sanjuan, B., Millot, R., Innocent, C., Dezayes, C., Scheiber, J., Brach, M., 2016. Major geochemical characteristics of geothermal brines from the Upper Rhine Graben granitic basement with constraints on temperature and circulation, *Chemical Geology* 428, 27-47.
- Sanjuan, B., Gourcerol, B., Millot, R., Rettenmaier, D., Jeandel, E., Rombaut, A., 2022. Lithium-rich geothermal brines in Europe: An up-date about geochemical characteristics and implications for potential Li resources, *Geothermics* 101, 102385.
- Sonnenthal, E., Spycher, N., Araya, N., O'Sullivan, J., Dobson, P., Humphreys, J., Brounce, M., McKibben, M., 2024. Lithium Evolution and Reservoir Sustainability in the Salton Sea Geothermal Reservoir from Reactive-Transport Modeling. 49th Stanford Geothermal Workshop, Stanford, California.
- Toubiana, H., Salaun, N., Mitschler, J.-B., Gigou, Guillaume, Carrière, X., Richard, A., Maurer, V., 2021. Designed 3D Seismic Imaging to Better Understand Geothermal Faulted Reservoir, an Upper Rhine Graben Case History. *World Geothermal Congress 2020+1*, Reykjavik.
- Wynants-Morel, N., Vidal, J., Soubeyrand, D., 2024. Including Permeability Anisotropy in Fault Zones Models Helps Coping with Both Geothermal Reservoir Storage Estimation and Induced Seismicity. 49th Stanford Geothermal Workshop, Stanford, California.
- Vera, M. L., Torres, W. R., Galli, C. I., Chagnes, A., Flexer, V. (2023). Environmental impact of direct lithium extraction from brines. *Nature Reviews Earth & Environment* 4, 149-165.
- Wang, C., Wu, K., Scott, G., Akisanya, A.R., Gan, Q., 2022. Explicit Incorporation of Discrete Fractures Into Pore Network Models. *Water Resources Research* 58, e2021WR031731.