



(ID Modèle = 454913)

Ineris - 220811 - 2759811 - v2.0

17/01/2024

Risques associés à l'extraction du lithium contenu dans les fluides géothermiques

## **PRÉAMBULE**

Le présent document a été réalisé au titre de la mission d'appui aux pouvoirs publics confiée à l'Ineris, en vertu des dispositions de l'article R131-36 du Code de l'environnement.

La responsabilité de l'Ineris ne peut pas être engagée, directement ou indirectement, du fait d'inexactitudes, d'omissions ou d'erreurs ou tous faits équivalents relatifs aux informations utilisées.

L'exactitude de ce document doit être appréciée en fonction des connaissances disponibles et objectives et, le cas échéant, de la réglementation en vigueur à la date d'établissement du document. Par conséquent, l'Ineris ne peut pas être tenu responsable en raison de l'évolution de ces éléments postérieurement à cette date. La mission ne comporte aucune obligation pour l'Ineris d'actualiser ce document après cette date.

Au vu de ses missions qui lui incombent, l'Ineris, n'est pas décideur. Les avis, recommandations, préconisations ou équivalents qui seraient proposés par l'Ineris dans le cadre des missions qui lui sont confiées, ont uniquement pour objectif de conseiller le décideur dans sa prise de décision. Par conséquent, la responsabilité de l'Ineris ne peut pas se substituer à celle du décideur qui est donc notamment seul responsable des interprétations qu'il pourrait réaliser sur la base de ce document. Tout destinataire du document utilisera les résultats qui y sont inclus intégralement ou sinon de manière objective. L'utilisation du document sous forme d'extraits ou de notes de synthèse s'effectuera également sous la seule et entière responsabilité de ce destinataire. Il en est de même pour toute autre modification qui y serait apportée. L'Ineris dégage également toute responsabilité pour chaque utilisation du document en dehors de l'objet de la mission.

Nom de la Direction en charge du rapport : DIRECTION SITES ET TERRITOIRES

Rédaction : GOMBERT Philippe - PIQUE SYLVAIN

Vérification : POULARD FREDERIC; BOLVIN CHRISTOPHE

Approbation : Document approuvé le 17/01/2024 par DUPLANTIER STEPHANE

## Table des matières

1. Objectifs.....	6
2. Lithium : applications et ressources .....	6
3. Enjeux liés au lithium géothermique .....	8
3.1. Au niveau mondial .....	8
3.2. En Europe .....	9
3.3. En France.....	10
4. Technologies d'extraction .....	12
4.1. Présentation .....	12
4.2. Concentration et précipitation.....	13
4.3. Extraction solide/liquide .....	14
4.3.1. Principe .....	14
4.3.2. Extraction sur adsorbants organiques.....	14
4.3.3. Extraction sur adsorbants inorganiques.....	15
4.4. Extraction liquide/liquide .....	15
4.4.1. Principe .....	15
4.4.2. Choix des solvants.....	15
4.4.3. Équipements.....	16
4.5. Séparation électrochimique.....	16
5. Cadre réglementaire actuel de la filière.....	16
6. Retour d'expérience des accidents / incidents .....	17
6.1. Rappel sur les risques associés à l'exploitation géothermique.....	17
6.2. Retour d'expérience sur les risques associés aux procédés d'extraction .....	18
7. Identification des potentiels de danger.....	21
7.1. Potentiels de dangers associés aux substances.....	21
7.1.1. Dangers associés à la saumure .....	21
7.1.2. Dangers associés aux composés du lithium .....	22
7.1.3. Dangers associés aux adsorbants.....	24
7.2. Potentiels de dangers associés au procédé d'extraction du lithium.....	24
7.2.1. Centrale géothermique.....	24
7.2.2. Dispositif d'extraction du lithium .....	25
8. Conclusion .....	25
8.1. Points importants à retenir .....	25
8.2. Potentiels de dangers associés au procédé d'extraction de lithium.....	26
8.3. Proposition d'axe d'approfondissement.....	27
9. Références bibliographiques .....	27
10. Annexes.....	28
10.1. Projets de recherche scientifique français .....	28
10.1.1. Présentation du projet Therma'Li.....	28
10.1.2. Présentation du projet EuGeLi.....	28
10.2. Projets de démonstrateurs en cours en Europe.....	29
10.2.1. En Allemagne .....	29

10.2.2.	En Italie .....	31
10.2.3.	En France .....	31
10.2.4.	Au Royaume-Uni.....	32
10.3.	Projets de démonstrateurs en cours aux États-Unis .....	32
10.4.	Comptes-rendus d'entretiens et de visites.....	33
10.4.1.	Compte-rendu d'entretien avec Lithium de France.....	33
10.4.2.	Compte-rendu de visite des sites d'extraction et de production de lithium géothermique de Vulcan Energy en Allemagne.....	34
10.4.3.	Compte-rendu d'entretiens avec Électricité de Strasbourg et Eramet.....	36

## Table des figures

Figure 1.	Différentes applications du lithium (d'après Yu et al., 2022) .....	6
Figure 2.	Schéma conceptuel de l'origine géologique des principales sources économiques de lithium mondial en 2019 ( <a href="https://www.mineralinfo.fr/">https://www.mineralinfo.fr/</a> ).....	7
Figure 3.	Répartition des réserves de lithium actuellement extractibles (Yu et al., 2022).....	7
Figure 4.	Principaux gisements de lithium géothermique dans le monde (source: Jade Cove Partners) .....	8
Figure 5.	Distribution et abondance du lithium dans les saumures géothermiques en Europe d'après le projet de recherches EuGeLi (Stringfellow et Dobson, 2021) .....	9
Figure 6.	Permis Exclusifs de Recherches (PER), tous minéraux confondus, en cours de validité et en instruction en métropole en 2021 ( <a href="https://www.mineralinfo.fr/fr/ressources-minerales-france-gestion/potentiel-du-sous-sol-francais">https://www.mineralinfo.fr/fr/ressources-minerales-france-gestion/potentiel-du-sous-sol-francais</a> ).....	11
Figure 7.	Schéma de la chaîne de production du lithium géothermique (Vulcan Energy, 2023) .....	12
Figure 8.	Schéma du procédé d'extraction du lithium dans les saumures superficielles (Khalil et al., 2022).....	12
Figure 9.	Schéma de l'extraction directe et du raffinage du lithium des saumures profondes (Kölbel et al., 2023) .....	13
Figure 10.	Différentes types d'adsorbants permettant l'extraction directe du lithium (Yu et al., 2022) ..	13
Figure 11.	Schéma de principe d'un cycle d'adsorption et désorption en colonnes (Chagnes, 2022)..	14
Figure 12.	Exemple de structure d'une membrane polymère (Stringfellow et Dobson, 2021).....	14
Figure 13.	Exemple d'un cycle d'adsorption et de désorption de lithium sur des adsorbants inorganiques (Atta Mends et Pengbo, 2023).....	15
Figure 14.	Exemple d'extraction du lithium par solvants liquide/liquide (acide phosphorique de di-2-ethylhexyl et kérosène dilué) (Atta Mends et pengbo, 2023).....	15
Figure 15.	Récupération du lithium par séparation électrochimique (Atta Mends et Pengbo, 2023)....	16
Figure 16.	Nature et proportion des principaux événements redoutés (à gauche) et des phénomènes dangereux ou impactant (à droite) dans l'accidentologie des opérations de géothermie profonde (Gombert et al., 2017).....	18
Figure 17.	Nombre d'accidents recensés dans la base ARIA par type de métal extrait.....	18
Figure 18.	Schéma de principe du procédé EuGeLi (Hauet, 2019).....	29
Figure 19.	Installations de VER en Allemagne et en France .....	31
Figure 20.	Schéma conceptuel des gîtes d'extraction de chaleur et de lithium en Cornouailles (Cornish Lithium).....	32

## Résumé

Le lithium est un métal stratégique dont la production est actuellement entre les mains de quelques pays dans le monde. Pourtant, des ressources existent dans de nombreux pays, dont la France, que ce soit sous forme solide (minéraux de certaines roches) ou dissoute (saumures). Sur la base d'une analyse bibliographique et du résultat d'entretiens avec les principaux intervenants français, le présent document fait le point sur les techniques et les risques potentiels liés à l'extraction du lithium à partir des saumures géothermiques, avant leur réinjection dans le réservoir profond. En France, ce type de saumures se trouve surtout dans le fossé rhénan et dans le Massif Central. C'est pourquoi l'exemple de la partie allemande du fossé rhénan, où des usines d'extraction de lithium géothermique sont en cours de construction, est intéressant pour préfigurer l'arrivée prochaine de ces techniques et procédés sur le sol français. Ce document présente successivement les enjeux liés au lithium, un recensement des projets d'extraction de lithium géothermique, une description des technologies employées, l'identification succincte du cadre réglementaire applicable, une analyse du retour d'expérience sur l'accidentologie des sites géothermiques et des procédés d'extraction de métaux, et une première identification des potentiels de danger. Ces derniers sont principalement des secousses sismiques induites et la perte de confinement de la saumure. Cependant, les technologies pouvant être utilisées sont diverses entre les extractions par précipitation, par voie solide/liquide ou liquide/liquide, ou par séparation électrochimique. Aussi, cette première étude – qui ne tient pas compte de l'étape finale de purification du lithium qui se fera, après son extraction, hors de la centrale géothermique – devra être complétée et approfondie, notamment par d'autres visites de sites.

## Abstract

Lithium is a strategic metal whose production is currently in the hands of a few countries around the world. However, resources exist in many countries, including France, in both solid form (minerals in certain rocks) and dissolved form (brines). Based on an analysis of the literature and interviews with the main French players, this document reviews the techniques and potential risks involved in extracting lithium from geothermal brines before reinjecting them into the deep reservoir. In France, this type of brine is found mainly in the Rhine Graben and the Massif Central. This is why the example of the German part of the Rhine Graben, where geothermal lithium extraction plants are currently under construction, is an interesting foreshadowing of the imminent arrival of these techniques and processes on French territory. This document successively presents the challenges associated with lithium, a list of geothermal lithium extraction projects, a description of the technologies used, a brief identification of the applicable regulatory framework, an analysis of feedback on the accidentology of geothermal sites and metal extraction processes, and an initial identification of potential hazards. These are mainly induced seismic shocks and loss of brine containment. However, the technologies that can be used are diverse, ranging from extraction by precipitation, solid/liquid or liquid/liquid methods, to electrochemical separation. This initial study – which does not take into account the final stage of lithium purification, which will take place outside the geothermal power plant after extraction – needs to be supplemented and extended, in particular by other site visits.

## Pour citer ce document, utilisez le lien ci-après :

Institut national de l'environnement industriel et des risques, , Verneuil-en-Halatte : Ineris - 220811 - v2.0, 17/01/2024.

## Mots-clés :

Lithium ; Géothermie ; Extraction ; Saumure ; Alsace ; Allemagne.

# 1. Objectifs

La présente note s'inscrit dans l'objectif 1 du Contrat d'objectifs et de performance 2021-2025 de l'Ineris, intitulé « Maîtriser les risques liés à la transition énergétique et à l'économie circulaire ». Son objectif est de qualifier les risques supplémentaires potentiellement induits par l'extraction du lithium contenu dans les fluides géothermiques<sup>1</sup> par rapport aux risques propres à la filière géothermique classique.

Pour ce faire, un recensement à l'international des différents processus d'extraction de lithium d'origine géothermique a été réalisé afin d'identifier les substances, les équipements et les modes d'exploitation envisagés. Ce recensement s'est basé sur une synthèse bibliographique, sur la rencontre des principaux professionnels de ce secteur, en France, ainsi que sur la visite d'un site démonstrateur en Allemagne.

On présente ici une première analyse du cadre réglementaire, du retour d'expérience et des potentiels de dangers associés à l'extraction du lithium contenu dans les fluides géothermiques.

## 2. Lithium : applications et ressources

Le lithium est un métal qui est principalement utilisé de nos jours pour la fabrication des piles et batteries (notamment celles des véhicules électriques), pour la réalisation de verres et de céramiques et, minoritairement, pour divers autres usages (médicaments, graisses/lubrifiants, métallurgie, caoutchoucs, thermoplastiques, aluminium, etc.) (Figure 1). En France, sa consommation actuelle est de 950 t/an mais les besoins futurs s'établissent entre 300 % et 800 % de cette valeur, selon le scénario de croissance retenu, uniquement pour le secteur de la mobilité (ADEME, 2022).

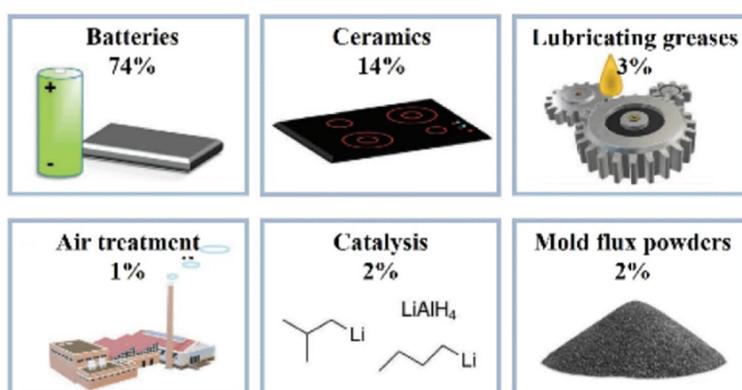


Figure 1. Différentes applications du lithium (d'après Yu et al., 2022)

C'est un élément relativement abondant sur terre mais présent le plus souvent à faible concentration, de l'ordre de 20 ppm (soit 20 g/t) dans les roches de l'écorce terrestre et de 0,2 ppm (soit 0,2 mg/L) dans les océans. Son exploitation nécessite donc la recherche de gîtes où il se trouve naturellement concentré, ce qui est le cas dans trois principaux types d'environnements géologiques (Figure 2) :

- les saumures continentales, qu'elles soient superficielles (salars<sup>2</sup>, à raison de 60 à 1250 ppm) ou souterraines (saumures géothermiques ou associées à des gisements d'hydrocarbures, jusqu'à 400 ppm) ;
- les pegmatites, roches filoniennes au sein des massifs granitiques, où des minéraux comme le spodumène ou la lépidolite en renferment jusqu'à 70 ppm ;
- les argiles altérées par des fluides hydrothermaux au sein de dépôts sédimentaires.

<sup>1</sup> L'adjectif « géothermique », qui se réfère à des sites exploités, a été préféré ici à « géothermal », qui concerne des sites naturels, pour des raisons d'homogénéité d'écriture, et parce qu'on traite principalement de sites exploités ou exploitables.

<sup>2</sup> lacs salés partiellement asséchés, présents en Amérique du Sud (Bolivie, Pérou, Chili, Argentine...) et au Tibet.

Schéma conceptuel de l'origine géologique des principales sources économiques de lithium mondiales en 2019

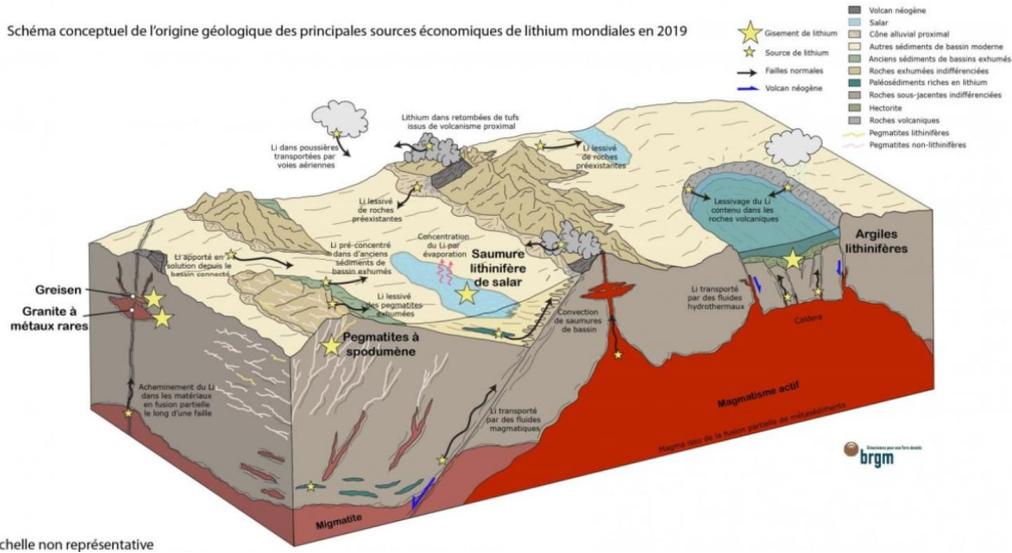


Figure 2. Schéma conceptuel de l'origine géologique des principales sources économiques de lithium mondial en 2019 (<https://www.mineralinfo.fr>)

Les ressources mondiales de lithium sont estimées à 86 Mt et ses réserves exploitables à 21 Mt (Stringfellow et Dobson, 2021). Sa production mondiale<sup>3</sup> a fortement augmenté depuis ces dernières décennies, atteignant 82 kt en 2020, en provenance :

- pour 55 % de pegmatites ou de roches lithifères, production essentiellement concentrée en Australie (4 exploitations) et en Chine (1 exploitation) ;
- pour 45 % de salars avec une exploitation en Argentine, une autre au Chili et deux en Chine (dont une au Tibet) ; il existe également d'autres petites exploitations au Brésil, au Portugal, aux États-Unis et au Zimbabwe.

Cependant, pour satisfaire la croissance de la demande mondiale, cette production devrait atteindre 216 kt/an en 2030 d'après Borie (2020), et jusqu'à 373 kt/an en 2050 d'après la Banque Mondiale (Stringfellow et Dobson, 2021). A partir de 2025, sa production à partir de saumures devrait d'ailleurs dépasser celle issue de minerais rocheux : c'est ce qui explique que plusieurs projets de recherches et de démonstrateurs d'extraction de lithium géothermique soient en cours dans le monde, certains étant déjà au stade pré-industriel (cf. Annexes).

On notera que la Chine ne dispose que de 7 % des réserves mondiales de lithium (Figure 3), qu'elle n'en produit que 13 % mais que, du fait d'une stratégie économique agressive et efficace, elle raffine actuellement 60 % de la production mondiale de ce métal<sup>4</sup>.

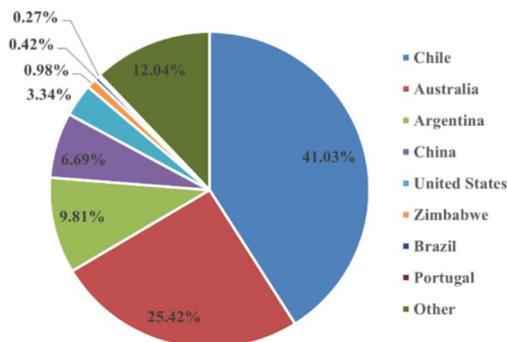


Figure 3. Répartition des réserves de lithium actuellement extractibles (Yu et al., 2022)

<sup>3</sup> Le lithium est majoritairement utilisé sous la forme de carbonate ( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ) qui en renferme 187 kg/t, ou d'hydroxyde ( $\text{LiOH}$ ) qui en renferme 289 kg/t.

<sup>4</sup> [https://perspective.usherbrooke.ca/bilan/servlet/BMAAnalyse/3397#:~:text=La%20Chine%20a%20mis%20en,la%20production%20mondiale%20\(14\)](https://perspective.usherbrooke.ca/bilan/servlet/BMAAnalyse/3397#:~:text=La%20Chine%20a%20mis%20en,la%20production%20mondiale%20(14)) (consulté le 06/11/2023).

En France, les besoins actuels sont d'environ 15 kt/an et les réserves en lithium sont principalement localisées dans les formations suivantes (Hauet, 2019) :

- les micas lithinifères du granite de Beauvoir à Échassières (Allier) ; Imerys, qui exploite actuellement une carrière à ciel ouvert sur ce site pour la production de kaolin<sup>5</sup>, a déposé un permis d'exploitation de lithium par mine souterraine ; le potentiel serait de 34 kt/an d'hydroxyde de lithium, soit près de 10 kt/an de lithium, ce qui en ferait l'une des plus grosses mines d'Europe pour ce métal (Davesne, 2022) ;
- le gisement géothermique du fossé rhénan, notamment à Soultz-sous-Forêts où une production de carbonate de lithium de 3,8 kt/an/puits géothermique est possible (soit 0,7 kt/an de lithium) ;
- les minéralisations du granite de Tréguennec (Finistère) qui disposeraient de 66 kt de réserves.

Ainsi, en théorie, la production de la mine de Beauvoir et d'une dizaine de puits géothermiques du fossé rhénan suffirait à satisfaire les besoins actuels de la France.

### 3. Enjeux liés au lithium géothermique

#### 3.1. Au niveau mondial

Le lithium est relativement abondant dans plusieurs types de saumures, qu'elles soient de nature superficielle (salars) ou souterraine (fluides géothermiques, saumures associées aux gisements d'hydrocarbures) (Figure 4 ; Tableau 1). L'évaluation des ressources liées au lithium géothermique est en cours aux États-Unis, au Japon, en Nouvelle-Zélande et en Europe (Stringfellow et Dobson, 2021). Aux États-Unis, où 2000 sources chaudes et puits géothermiques ont été étudiés, 60 % ont montré la présence de lithium. Cependant, sa concentration n'est exploitable (>20 ppm) que dans moins de 2 % des cas, tous situés dans l'Imperial Valley (Californie) : Salton Sea est le site le plus prometteur avec des saumures qui renferment entre 90 et 440 ppm de lithium.

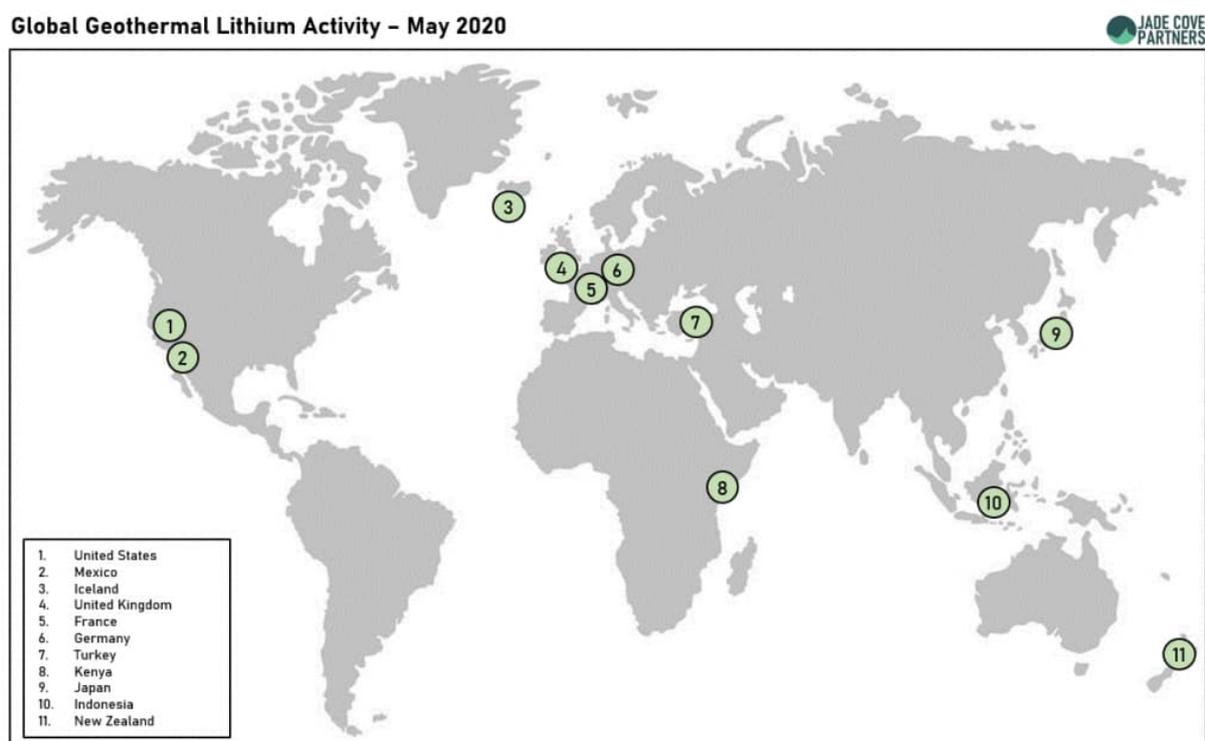


Figure 4. Principaux gisements de lithium géothermique dans le monde (source: Jade Cove Partners)

<sup>5</sup> Le kaolin est une argile issue de l'altération du granite.

Tableau 1. Concentrations moyennes en lithium de différentes saumures dans le monde (d'après Pauwels et al., 1991)

a) Saumures superficielles

	Li mg/l	Na g/l
Great Salt Lake (Utah)	60	70
Silver Peak (Nevada)	300	62
Searless Lake (Californie)	83	152
Salar de Uyuni (Bolivie)	250	91
Salar de Atacama (Chili)	1250	692
Mer Morte	20	30

b) Saumures profondes

	Sigle	Na g/l	Li mg/l	SiO <sub>2</sub> mg/l	Ca mg/l
ONIKOUBE	oni	1,45	1,3	694	201
HATCHOBARU	hat	1,75	12	809	42
OTHAKE	oth	1,04	4,7	480	28
ARIMA	ar	7,73	26	115	1110
SALTON SEA	ss	62	210	400	28000
SMACKOVER	sma	67	173		34534
BROADLANDS	bro	1,07	11	849	2,9
WAIRAKEI	war	1,2	12	641	23
CERRO PRIETO	cp	12,21	30	1123	473
EAU DE MER	sw	10,8	0,17	6,14	400

### 3.2. En Europe

Plusieurs projets de caractérisation du lithium dans les fluides géothermiques d'Europe sont en cours (Figure 5), notamment en Finlande, au Portugal, en Serbie, en Allemagne, en République Tchèque, en Autriche, au Royaume-Uni, en Irlande, en Espagne et en France (Hauet, 2019). Des permis miniers de coproduction géothermie/lithium sont en train d'être déposés et les projections montrent qu'en équipant simplement les centrales géothermiques déjà en opération, on pourrait couvrir 20 % des besoins européens en lithium (Koetzl, 2021).

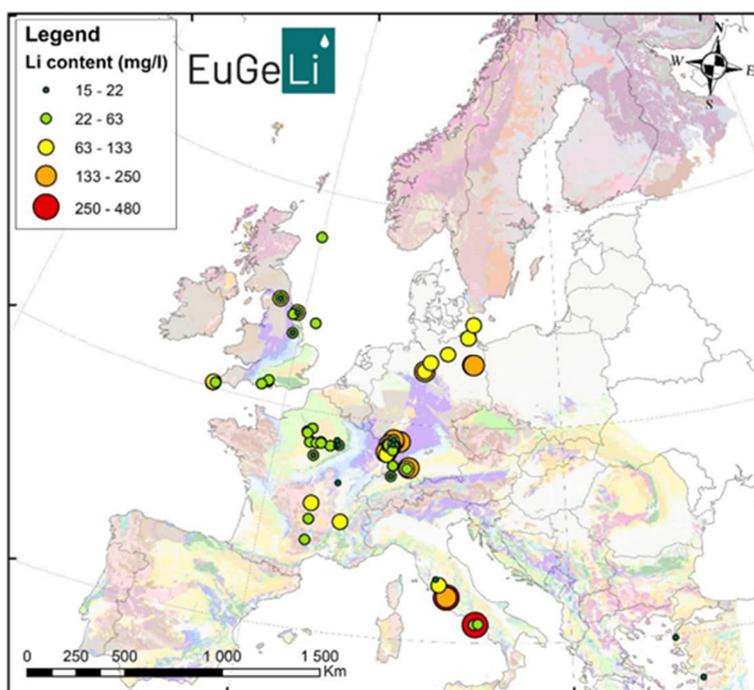


Figure 5. Distribution et abondance du lithium dans les saumures géothermiques en Europe d'après le projet de recherches EuGeLi (Stringfellow et Dobson, 2021)

Nous avons pris contact avec la société Vulcan Energy Resources qui construit actuellement un site d'extraction de lithium géothermique en Allemagne dans le fossé rhénan. Leur technologie d'extraction fait l'objet de tests depuis 2 ans sur le site des centrales géothermiques de Landau et d'Insheim, et sur celui d'une usine d'optimisation en construction à Landau. Cette dernière, qui correspond à un stade intermédiaire entre un site pilote et une usine industrielle, est destinée à former les opérateurs dans un environnement de production de lithium à échelle industrielle. En outre, un site de conversion est en construction dans la région de Francfort pour un démarrage de la production industrielle de lithium d'ici fin 2025. En avril 2023, nous avons ainsi pu visiter les sites de Karlsruhe, d'Insheim et de Landau (voir compte-rendu en Annexes, chapitre 10.4.2).

### 3.3. En France

L'existence de saumures profondes renfermant du lithium en France est connue depuis des décennies (Pauwells et al., 1991). Il s'agit notamment de saumures issues du Keuper et du Rhétien du Bassin de Paris (1 à 50 ppm), des roches cristallines profondes du Massif Central (30 à 80 ppm), et du Trias alsacien (30 à 160 ppm). En Alsace, on peut envisager la production de 1,5 kt/an de carbonate de lithium par site géothermique d'après Lithium de France, soit un total d'environ 8 kt/an d'après Fonroche<sup>6</sup>, correspondant approximativement à 10 % des besoins actuels de la France. Quelques permis miniers de coproduction de lithium géothermique sont en cours de dépôt ou d'instruction (Tableau 2), et les projections montrent que ce sont en fait 30 % des besoins actuels français qui pourraient être satisfaits en équipant simplement les centrales géothermiques existantes d'unités d'extraction de lithium (Koetzl, 2021).

Tableau 2. État des lieux des PER de lithium géothermique ou hydrogéologique<sup>7</sup> en France

Date	Intitulé	Minerai(s)	Bénéficiaire	Statut
20 décembre 2018	La Plaine du Rhin (67)	Li et substances annexes (Cs, Sr, B, Rb, Mn, Zn)	Fonroche	Demandé
16 janvier 2019	Limagne (63)	Li, Zn, Mn, Rb, Cs	GéoRhin	Demandé
4 avril 2022	Permis lithium d'Outre-Forêt (67)	Li et substances connexes	Électricité de Strasbourg	Accordé
2 août 2022	Les Poteries Minérales (67)	Li et substances connexes	Lithium de France	Demandé*
23 décembre 2022	Les Cigognes (67)	Li et substances connexes	Vulcan Energie France	Demandé*
29 décembre 2022	Permis lithium d'Illkirch (67)	Li et substances connexes	Électricité de Strasbourg	Accordé
1 <sup>er</sup> août 2023	Les sources alcalines (67)	Li et substances connexes	Lithium de France	Accordé
25 septembre 2023	Vinzelles (63)	Li et H <sub>2</sub> natif	Sudmine	Demandé
23 octobre 2023	Kachelhoffa minéral (68)	Li et substances connexes	Vulcan Energie France	Demandé

\* ces deux demandes sont localisées sur le même secteur géographique du département du Bas-Rhin.

De tous les paramètres qui gouvernent le partitionnement du lithium entre les roches et les fluides qui y circulent, le plus important semble être la température (Gloasgen et al., 2018). Ainsi, c'est une température supérieure à 120°C qui permet aux fluides géothermiques de dissoudre les micas lithinifères, particulièrement résistants à l'altération (Sanjuan et al., 2021). La teneur en lithium des roches encaissantes et les paramètres hydrodynamiques des réservoirs (porosité, perméabilité) jouent également un rôle. C'est ce qui explique que les fluides issus des gîtes géothermiques dits de basse température (<150°C), exploités principalement dans le Bassin de Paris pour la production de chaleur, ne renferment que peu de lithium (Pauwells et al. 1991) : 0,5 à 3 mg/l pour les formations jurassiques (Dogger) et 10 à 50 mg/l pour les formations triasiques un peu plus profondes. Dans l'état actuel des connaissances, les gîtes géothermiques français les plus intéressants sont ceux dits de haute température (>150°C) qui se trouvent principalement en Alsace et, pour partie, dans le Massif Central. En Alsace, une vaste zone de 180 km<sup>2</sup> a déjà été reconnue comme potentiellement intéressante entre Soultz-sous-Forêts et Strasbourg (Hauet, 2019). Son potentiel serait de l'ordre de 2 Mt de lithium pur, ce qui correspondrait à une réserve minière de classe mondiale.

<sup>6</sup> <https://www.20minutes.fr/economie/3062327-20210615-alsace-projet-pilote-redonne-espoir-extraire-lithium-region> (consulté le 09/01/2023).

<sup>7</sup> Lithium présent dans des saumures profondes non géothermiques (concerne les PER Limagne et Vinzelles)

Nous avons réalisé des entretiens par visioconférence avec deux des trois principaux acteurs français de la filière actuelle du lithium géothermique, à savoir le consortium Électricité de Strasbourg – Eramet et Lithium de France, et nous avons visité le site pilote du troisième, Vulcan Energy, en Allemagne :

- Électricité de Strasbourg – Eramet est un consortium entre un producteur d'énergie et une entreprise minière et métallurgique ; le premier dispose de plusieurs titres miniers de géothermie en Alsace (Soultz-sous-Forêts, Rittershoffen, Wissembourg), d'un PER en cours d'instruction (Terre d'Énergie) ainsi que de deux PER pour la production de lithium (Outre-Forêt et Illkirch) ; la seconde possède un savoir-faire en extraction de lithium à partir d'un salar argentin ; leur objectif commun est de construire un pilote de démonstration d'extraction directe de lithium fin 2023 sur le site de Rittershoffen, puis de produire ultérieurement au moins 10 kt/an de  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  (soit ~2 kt/an de lithium métal) ; le compte-rendu des entretiens réalisés en visioconférence avec ce consortium se trouve au chapitre 10.4.3, en annexe ;
- Lithium de France (LdF) cherche à évaluer les technologies d'extraction directe de lithium avant d'arrêter son choix, et à les tester via différents dispositifs expérimentaux afin d'en évaluer l'efficacité ; à cet effet, un pilote d'extraction a été implanté en Norvège avec la société EQUINOR ; LdF dispose en Alsace de deux PER Géothermie et d'un PER Lithium (Les Sources Alcalines) et a déposé un second PER Lithium (Les Poteries Minérales) en concurrence avec celui de Vulcan Energie France (VEF) ; LdF s'apprête à déposer une demande d'Autorisation Environnementale pour débiter les forages en 2024 ; il s'agira d'adosser la future production de lithium géothermique à celle de l'énergie géothermique à partir de 2026 ; le compte-rendu de l'entretien réalisé en visioconférence avec LdF se trouve au chapitre 10.4.1 en annexe ;
- Vulcan Energy construit actuellement une unité d'extraction de lithium géothermique du côté allemand du fossé rhénan, et prévoit une installation future du côté français ; à la suite d'un entretien en visioconférence, nous sommes allés visiter leur site allemand ; le compte-rendu de cette visite se trouve au chapitre 10.4.2 en annexe ; sa filiale française VEF a déposé deux projets de PER Lithium, celui des Cigognes (en concurrence avec celui de Lithium de France) et celui de Kachelhoffa mineral.

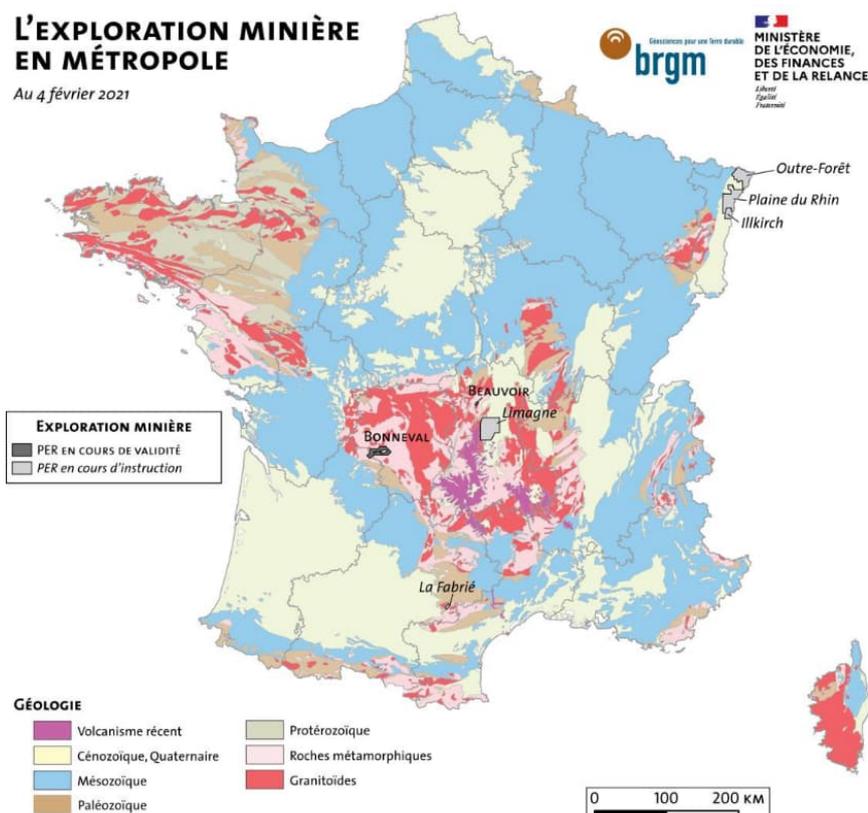


Figure 6. Permis Exclusifs de Recherches (PER), tous minéraux confondus, en cours de validité et en instruction en métropole en 2021 (<https://www.mineralinfo.fr/fr/ressources-minerales-france-gestion/potential-du-sous-sol-francais>)

*Note* : Les PER concernant le lithium sont ceux de Beauvoir (Allier), La Fabrié (Aude), Limagne (Puy-de-Dôme), Plaine du Rhin (Bas-Rhin), Outre-Forêt (Bas-Rhin) et Illkirch (Bas-Rhin)

## 4. Technologies d'extraction

### 4.1. Présentation

La chaîne de production du lithium géothermique se compose généralement de deux à trois usines distinctes (Figure 7) :

- la centrale géothermique qui produit la saumure et la met à disposition, après en avoir extrait la chaleur, avant de la réinjecter dans le réservoir géothermique ;
- l'usine d'extraction de lithium qui, couplée à la centrale géothermique, permet d'extraire le lithium sous forme de sel (hydroxyde ou carbonate) ;
- l'usine de raffinage qui produit du lithium de qualité batterie ; cette usine peut être accolée ou pas à la précédente.



Figure 7. Schéma de la chaîne de production du lithium géothermique (Vulcan Energy, 2023)

Les saumures géothermiques sont quant à elles des solutions complexes renfermant divers éléments qui peuvent interférer avec l'extraction du lithium, et notamment des métaux (Na, K, Mg, Ca, Sr, Ba, Fe, Pb, Zn), des métalloïdes (Mn, B, As) et de la silice (Stringfellow et Dobson, 2021). Leur composition détermine donc le choix du processus de production de lithium qui comprend des étapes de prétraitement, d'extraction pour concentrer le lithium, et de post-traitement destiné à éliminer ses impuretés. Les pratiques actuelles d'extraction du lithium à partir de saumures superficielles (salars) reposent principalement sur une longue période de concentration par évaporation solaire, suivie d'un raffinage chimique qui produit du carbonate de lithium ( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ). Ce processus prend plusieurs mois et nécessite de vastes surfaces et une importante consommation d'eau (Figure 8).

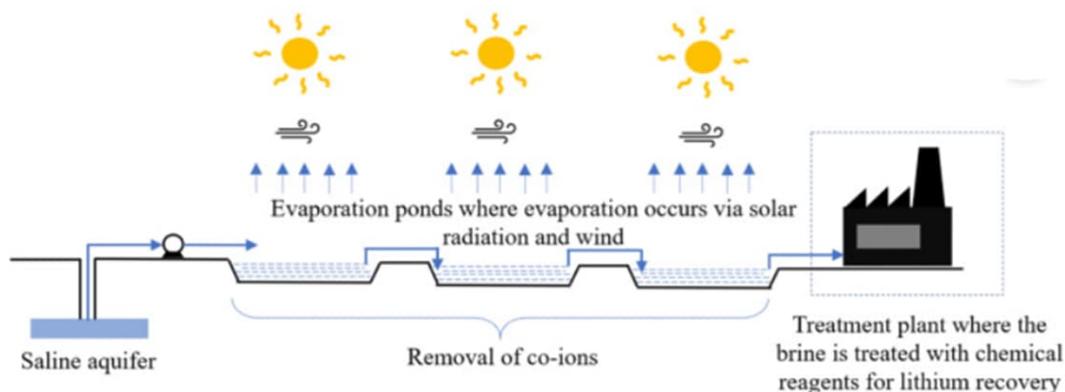


Figure 8. Schéma du procédé d'extraction du lithium dans les saumures superficielles (Khalil et al., 2022)

En ce qui concerne l'exploitation des saumures profondes moins concentrées en lithium, ce sont des procédés dits d'extraction directe du lithium (DLE pour Direct Lithium Extraction) qui sont à l'étude (Figure 9). Ils comprennent la précipitation, l'adsorption (selon des technologies bien établies telles que les résines échangeuses d'ions, ou sur la base de nouveaux adsorbants émergents comme les oxydes métalliques) et la séparation (à l'aide de solvants couramment utilisés pour l'extraction d'autres métaux

mais aussi de nouveaux solvants spécifiques au lithium, tels que les éthers couronnés<sup>8</sup>, voire de processus électrochimiques).

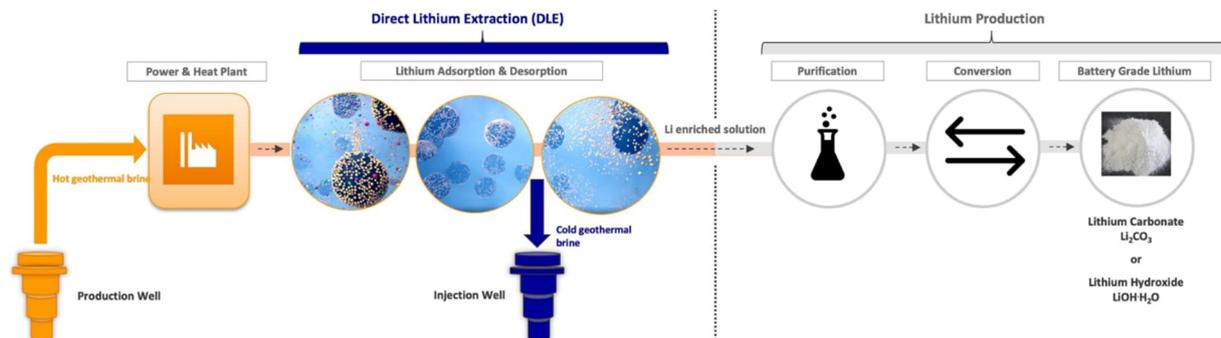


Figure 9. Schéma de l'extraction directe et du raffinage du lithium des saumures profondes (Kölbl et al., 2023)

Ces différentes techniques sont synthétisées sur la Figure 10 et présentées dans la suite du document.

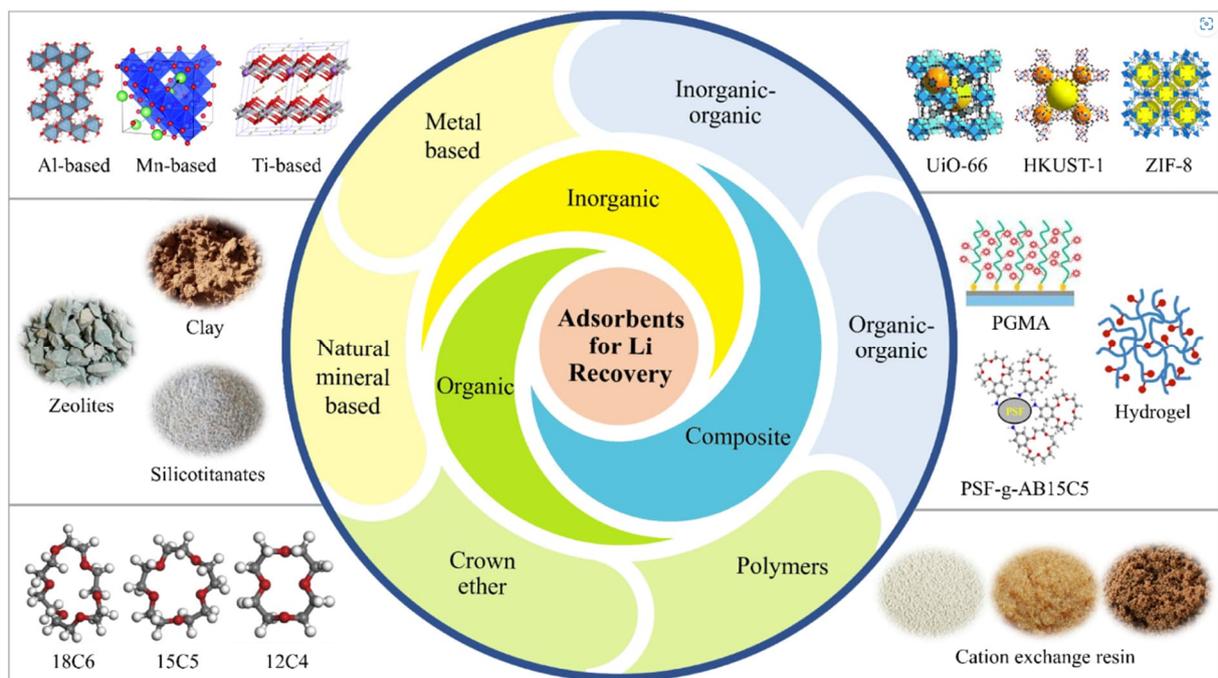


Figure 10. Différents types d'adsorbants permettant l'extraction directe du lithium (Yu et al., 2022)

## 4.2. Concentration et précipitation

Cette méthode est fondée sur l'abaissement de la solubilité de sels par ajout d'un réactif. Le lithium géothermique peut ainsi être récupéré par précipitation sur des sels d'aluminium tels que  $AlCl_3$  ou  $NaAlO_2$ . La récupération est accrue pour des pH basiques de l'ordre de 11,5 et pour des eaux géothermiques pauvres en calcium, ce qui nécessite d'extraire préalablement cet élément si ce n'est pas le cas. Toutefois, ces réactions de précipitation ne sont apparemment pas privilégiées pour l'extraction directe de lithium issu de saumures géothermiques, étant donné leur caractère non sélectif

<sup>8</sup> Composés cycliques disposant de plusieurs liaisons éther de type R-O-R' où R et R' sont des groupes ne contenant que des atomes de carbone et d'hydrogène, disposés en chaîne.

qui engendre de nombreux co-précipités (carbonates de calcium, hydroxydes de fer...). Le lithium qui serait ainsi extrait nécessiterait de ce fait une purification et un traitement post-extraction importants pour répondre aux exigences de la « qualité batterie » qui exige une pureté en sels de lithium supérieure à 99,5 %.

### 4.3. Extraction solide/liquide

#### 4.3.1. Principe

Mis en contact avec la saumure, certains matériaux à forte surface spécifique sont capables d'extraire par adsorption des espèces métalliques selon leur affinité. L'opération se déroule au sein de colonnes contenant le matériau d'adsorption qui se charge alors en ces métaux. Après un lavage destiné à éliminer les espèces métalliques qui ont le moins d'affinité pour ce matériau, vient une étape d'éluion qui cible le métal choisi, en l'occurrence le lithium. La colonne subit ensuite un nouveau lavage avant de recommencer un nouveau cycle d'adsorption (Figure 11).

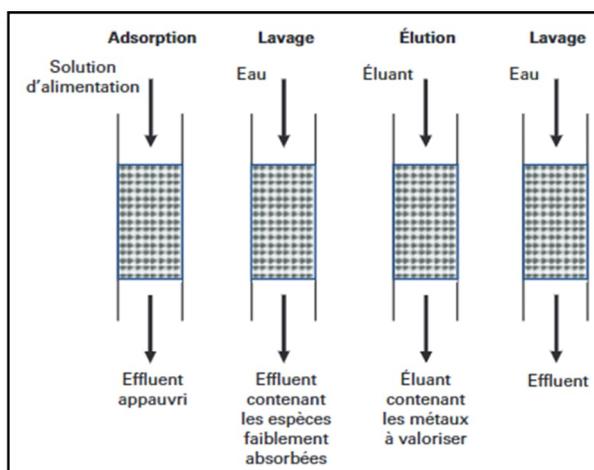


Figure 11. Schéma de principe d'un cycle d'adsorption et désorption en colonnes (Chagnes, 2022)

#### 4.3.2. Extraction sur adsorbants organiques

##### Résines échangeuses d'ions

L'utilisation de résines échangeuses à cations forts pour récupérer du lithium en solution est étudiée depuis les années 1970. Ces résines présentent toutefois une faible sélectivité pour les ions lithium et ne deviennent efficaces pour la DLE que lorsqu'elles sont imprégnées d'adsorbants inorganiques tels que  $Al(OH)_3$  (Stringfellow et Dobson, 2021).

##### Polymères à empreinte ionique et autres adsorbants organiques

Plusieurs chercheurs ont étudié l'utilisation de polymères organiques pour extraire sélectivement le lithium, de préférence aux autres ions métalliques. Cette sélectivité peut être conférée en incluant des sites réactifs ou des structures spécifiquement dimensionnées afin de permettre l'entrée préférentielle du lithium dans la membrane, et non celle des ions concurrents (Figure 12).

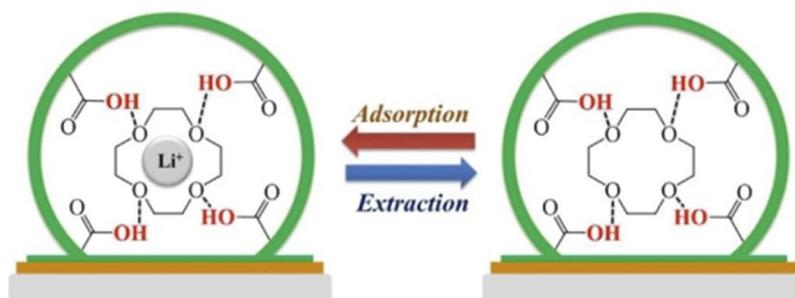


Figure 12. Exemple de structure d'une membrane polymère (Stringfellow et Dobson, 2021)

### 4.3.3. Extraction sur adsorbants inorganiques

Des solides cristallins inorganiques (hydroxydes ou oxydes d'aluminium, oxydes de manganèse, oxydes de titane...) se sont avérés être des adsorbants sélectifs du lithium. Ils sont d'ailleurs utilisés comme matériaux de cathode dans les batteries lithium-ion (Stringfellow et Dobson, 2021).

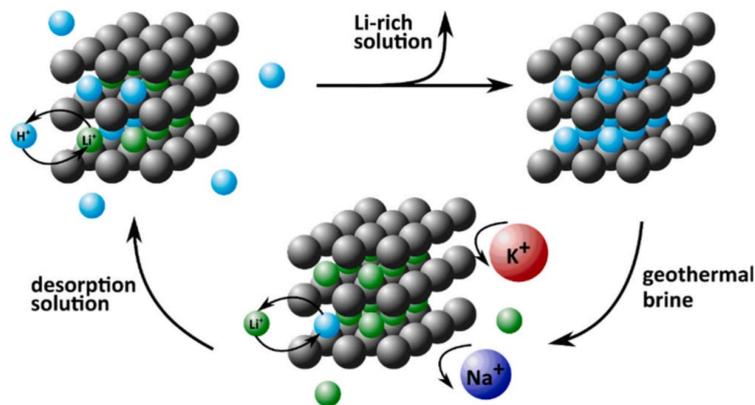


Figure 13. Exemple d'un cycle d'adsorption et de désorption de lithium sur des adsorbants inorganiques (Atta Mends et Pengbo, 2023)

## 4.4. Extraction liquide/liquide

### 4.4.1. Principe

L'extraction à l'aide de solvants liquide/liquide s'effectue en trois phases :

- une phase d'extraction du soluté de la solution où la saumure est mise en contact avec un solvant qui extrait préférentiellement un ou plusieurs solutés ;
- une phase de lavage par reflux du solvant, afin de laver le solvant de diverses impuretés ;
- une phase de réextraction du soluté à l'aide d'une solution de dés extraction ; le solvant épuisé en soluté est alors recyclé après une étape de lavage ou de reconditionnement.

### 4.4.2. Choix des solvants

Les solvants d'extraction du lithium à partir des saumures se répartissent globalement en trois catégories qui se chevauchent potentiellement : des éthers couronnés, des systèmes multi-composants (constitués d'un extractant, d'un agent synergique ou co-extractant, et d'un diluant), et des liquides ioniques. Les métaux extraits dans une phase organique non polaire sont généralement récupérés à l'aide d'un agent de décapage aqueux qui est le plus souvent une solution acide, telle que l'acide chlorhydrique (Figure 14).

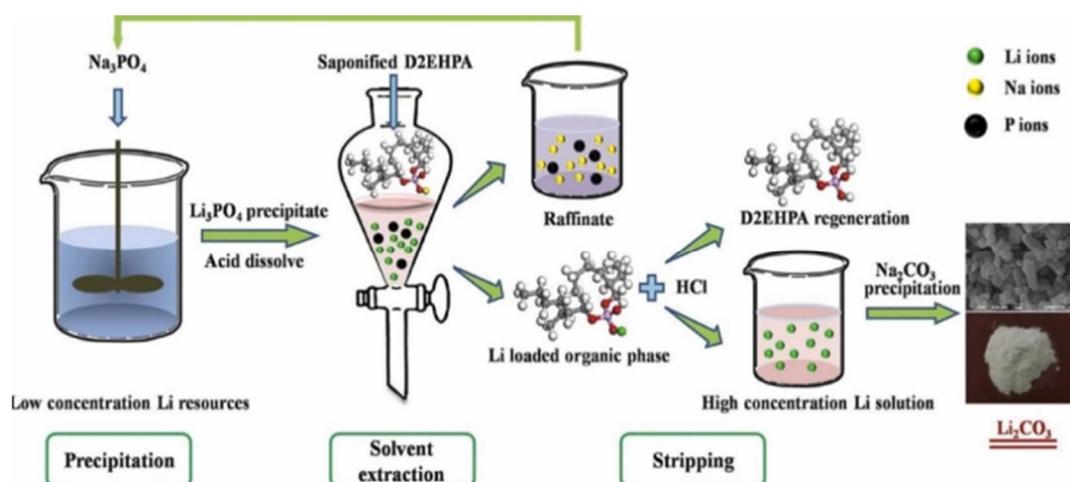


Figure 14. Exemple d'extraction du lithium par solvants liquide/liquide (acide phosphorique de di-2-ethylhexyl et kérosène dilué) (Atta Mends et pengbo, 2023)

### 4.4.3. Équipements

Divers équipements fonctionnant à contre-courant sont employés dans les opérations d'extraction liquide/liquide dont :

- les mélangeurs-décanteurs, composés d'un mélangeur qui assure la dispersion nécessaire au transfert de matière, et d'un décanteur pour la séparation de phase ; les mélangeurs peuvent être statiques, avec des garnissages, ou à agitation mécanique (pompe centrifuge) ; les décanteurs peuvent être gravitaires, centrifuges (cas des hydrocyclones) ou coalesceurs (par contact avec des parois solides ou par l'action d'un champ électrique) ;
- les extracteurs centrifuges qui exercent une force centrifuge accélérant la décantation ; ils peuvent être mono-étages ou multi-étages ;
- les colonnes gravitaires destinées à accroître l'aire interfaciale ; elles sont composées de garnissage pour augmenter la surface d'échange entre les liquides, ou de plateaux perforés qui permettent une meilleure séparation en créant des écoulements multiples ; en outre, des agitations mécaniques peuvent être installées dans les colonnes (disques rotatifs ou turbines).

### 4.5. Séparation électrochimique

Parmi les processus de séparation dit électrochimiques, l'électrodialyse utilise un champ électrique pour faciliter le mouvement des ions à travers une membrane semi-perméable (Figure 15). Pour l'extraction du lithium, elle nécessite une membrane sélective et comporte divers composants, tels que des anodes et des cathodes, similaires ou analogues à la technologie des batteries lithium-ion.

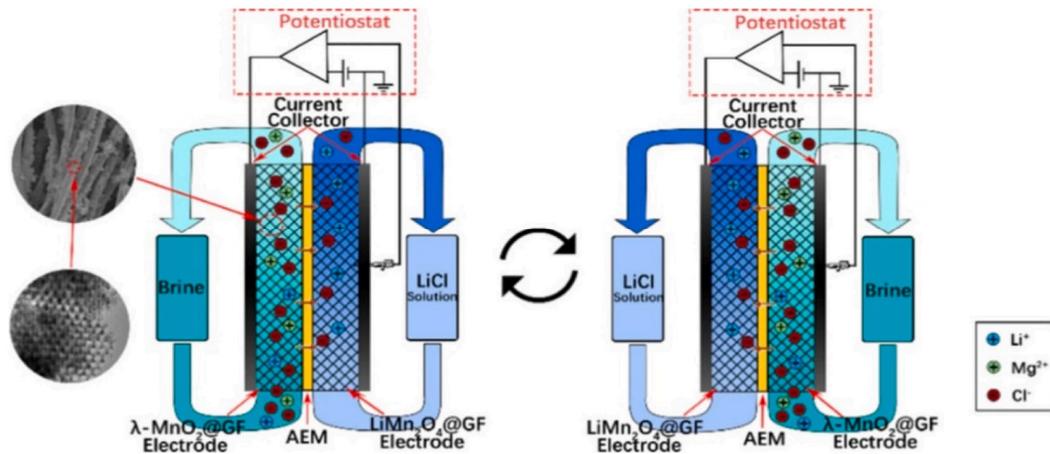


Figure 15. Récupération du lithium par séparation électrochimique (Atta Mends et Pengbo, 2023)

## 5. Cadre réglementaire actuel de la filière

La recherche et l'exploitation des gîtes géothermiques relèvent du régime légal des mines (code minier) qui impose d'obtenir de l'État<sup>9</sup> un titre minier (d'exploration ou d'exploitation), puis une autorisation d'ouverture de travaux miniers pour réaliser les forages nécessaires à la recherche ou à l'exploitation.

En ce qui concerne les rubriques de la nomenclature des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE) applicables aux installations géothermiques, une recherche a été menée par l'Ineris en octobre 2023 sur le site Géorisques. Elle a été réalisée sur la base des sites géothermiques existants de Soultz-sous-Forêts (Bas-Rhin, 2 MW électriques), de Bouillante (Guadeloupe, 15 MW électriques) et de Rittershoffen (Bas-Rhin, 24 MW thermiques). Il en ressort que ces sites géothermiques ne semblent pas couverts actuellement par les rubriques de la nomenclature ICPE. Toutefois, dans le futur, les installations qui mettent en jeu des procédés tels que cités dans le chapitre 4 pourraient être retenues comme des ICPE, en fonction des substances utilisées, de leur quantité, et/ou des activités ou procédés retenus (Chagnes, 2022).

<sup>9</sup> sauf dans le cas de la géothermie de minime importance, globalement définie par une profondeur de forage inférieure à 200 m et par une puissance thermique maximale inférieure à 500 kW.

## 6. Retour d'expérience des accidents / incidents

Les antécédents d'accidents recensés dans le monde, mettant en œuvre des produits ou des procédés comparables à ceux utilisés ou prévus dans les installations étudiées, ont fait l'objet d'une analyse des « événements redoutés » qui sont survenus : causes, conséquences et mesures compensatoires adoptées. Ce retour d'expérience a été réalisé en deux parties : sur les puits géothermiques puis sur les procédés d'extraction directe du lithium.

### 6.1. Rappel sur les risques associés à l'exploitation géothermique

Une analyse a été menée en 2017 par l'Ineris sur les opérations de géothermie profonde réalisées dans le monde (Gombert et al., 2017). La base de données constituée comprend 35 accidents ou incidents, survenus dans 13 pays depuis la fin des années 1980, correspondant à toutes les phases de vie d'une opération géothermique (exploration, test, exploitation). Ils sont synthétisés dans le Tableau 3.

Tableau 3. Accidents liés à la géothermie profonde recensés dans le monde (Gombert et al., 2017)

Identifiant	Date	Type d'activité	Pays	Lieu	Evènement survenu	Phénomène résultant	Nb morts	Nb blessés
Agua Shuca	13/10/1990	Géothermie profonde	Salvador	Sud Ouest de Ahuachapan	Eruption	Explosion Projection	25	35
Ahuachapan 1	été 1994	Géothermie profonde	Salvador	Ahuachapan	Fuite en surface	Rejet toxique Rejet écologique	plusieurs	plusieurs
Ahuachapan 2	année 1994	Géothermie profonde	Salvador	Ahuachapan	x	x	plusieurs	plusieurs
Bâle	08/12/2006	Géothermie profonde	Suisse	Bâle	Séisme	Secousses ressenties	x	x
Berlin 1	1993-1994	Géothermie profonde	Salvador	Usulután	Fuite en surface	Emission gazeuse	x	x
Berlin 2	16/09/2003	Géothermie profonde	Salvador	Usulután	Séisme	Secousses ressenties	x	x
Biliran	23/06/2014	Géothermie profonde	Philippines	Biliran	Dégazage massif	Emission gazeuse	x	8
Bouillante	04/02/2010	Géothermie profonde	France	Bouillante, Guadeloupe	-	Désordres géotechniques Subsidence	x	x
Coulommiers	année 1996	Géothermie profonde	France	Coulommiers	Fuite souterraine	Rejet écologique	x	x
Geysers	1980-2010	Géothermie profonde	Etats-unis	Nord Californie, 120 km au nord de San Francisco	Séisme	Secousses ressenties	x	x
Habanoero	mois de nov. 2012	Géothermie profonde	Australie	Cooper Bassin	Séisme	Secousses ressenties	x	x
Hengill	15/10/2011	Géothermie profonde	Islande	Hengill, sud ouest de l'Islande	Séisme	Secousses ressenties	x	x
Hilsprich	à partir de 2006	Géothermie superficielle	France	Lorraine	Dissolution incontrôlée	Subsidence	x	x
Innamincka	24/04/2009	Géothermie profonde	Australie	Innamincka	Fuite en surface	Rejet toxique Projection	x	x
Insheim	mois d'avril 2010	Géothermie profonde	Allemagne	Bavière	Séisme	Secousses ressenties	x	x
Japon	année 1998	Géothermie profonde	Japon	-	Fuite en surface	Rejet toxique	1	x
Kirchheim	année 2007	Géothermie superficielle	France	Alsace	Intusion d'eau dans une formation d'anhydrite	Surrection	x	x
Landau 1	15/08/2009	Géothermie profonde	Allemagne	Landau	Séisme	Secousses ressenties	x	x
Landau 2	13/03/2014	Géothermie profonde	Allemagne	Landau	-	Surrection	x	x
Lardarello	année 1985	Géothermie profonde	Italie	Lardarello	Fuite souterraine	Rejet écologique	x	x
Lochwiller	2008-2013	Géothermie superficielle	France	Alsace	Intusion d'eau dans une formation d'anhydrite	Surrection	x	x
Margamuki	07/05/2015	Géothermie profonde	Indonésie	Pangalengan ouest de Java	-	-	x	x
Meaux	année 2013	Géothermie profonde	France	Meaux	-	x	x	x
Neustadt-Glewe	année 1998	Géothermie profonde	Allemagne	Neustadt-Glewe	x	x	x	x
Puna 1	07/08/2014	Géothermie profonde	Hawaii	Honolulu	Fuite en surface	Rejet toxique	x	x
Puna 2	15/06/1991	Géothermie profonde	Hawaii	Honolulu	Eruption	Rejet toxique	x	1
Rotokawa	01/01/2010	Géothermie profonde	Nouvelle Zélande	Rotokawa	Séisme	Secousses ressenties	x	x
Saint Gall	20/07/2013	Géothermie profonde	Suisse	Saint Gall	Séisme	Secousses ressenties	x	x
Salton Sea	1981-2012	Géothermie profonde	Etats-unis	Californie	Séisme	Secousses ressenties	x	x
Soult-sous-Forêts	année 2003	Géothermie profonde	France	Alsace	Séisme	Secousses ressenties	x	x
Staufen	01/11/2007	Géothermie superficielle	Allemagne	Staufen	Intusion d'eau dans une formation d'anhydrite	Surrection	x	x
Svartsengi	1976-1999	Géothermie profonde	Islande	Svartsengi	Déplétion excessive du réservoir	Subsidence	x	x
Unterhaching	-	Géothermie profonde	Allemagne	Bavière	Séisme	Secousses ressenties	x	x
Warakei	1950 à 1997	Géothermie profonde	Nouvelle Zélande	Warakei	Déplétion excessive du réservoir	Subsidence	x	x
Zunil 1	05/01/1991	Géothermie profonde	Guatemala	Sud-Ouest du Guatemala, 8 km au sud de Quetzaltenango	Fuite en surface	Explosion Projection	23	oui

Les évènements redoutés les plus observés sont (Figure 16 à gauche) : la sismicité induite (34% des cas), les fuites en surface ou souterraines (23 %), les intrusions d'eau dans des formations gonflantes de type anhydrite (9 %), la subsidence liée à une déplétion excessive du réservoir géothermique (6 %), les éruptions en surface ou blow-out (6 %), les dégazages massifs en surface (3 %) ou les dissolutions incontrôlées de formations évaporitiques (3 %). On note en outre que, dans 17 % des cas, il n'existe pas de précision sur le type d'accident/incident signalé.

Les phénomènes dangereux ou impactant résultant le plus souvent de ces événements redoutés sont (Figure 16 à droite) : des secousses sismiques ressenties (dans 34 % des cas), des mouvements de terrain de type surrection ou subsidence (23 %), des rejets toxiques ou écotoxiques (20 %), des émissions gazeuses (6 %) et des explosions ou des projections (6 %). Comme précédemment, dans 11% des cas, le type de phénomène dangereux ou impactant n'a pas été précisé.

Il en résulte que l'exploitation des sites géothermiques présente des risques comparables à ceux d'autres activités liées au sous-sol, comme l'exploitation des hydrocarbures ou des stockages souterrains, mais relativement peu de risques spécifiques. Néanmoins, dans le cadre d'une analyse des risques liés aux procédés d'extraction directe du lithium, certains événements initiateurs particuliers seront probablement à prendre en compte : séismes, mouvements de terrain, effets dominos engendrés par des rejets de gaz potentiellement inflammables ou toxiques (H<sub>2</sub>S).



Figure 16. Nature et proportion des principaux événements redoutés (à gauche) et des phénomènes dangereux ou impactant (à droite) dans l'accidentologie des opérations de géothermie profonde (Gombert et al., 2017)

## 6.2. Retour d'expérience sur les risques associés aux procédés d'extraction

Pour réaliser ce retour d'expérience, l'Ineris a fait une recherche sur la base de données ARIA (Analyse, Recherche et Information sur les Accidents) du Ministère de la Transition écologique en novembre 2023. Cette recherche a tout d'abord ciblé l'extraction de lithium, puis elle a été étendue à celle d'autres métaux : zinc et cuivre. Nous avons retenu des incidents sur des procédés similaires à ceux exposés dans le chapitre 4. Au total, trois accidents/incidents ressortent sur la séparation électrochimique (ARIA n°45244, n°40183 et n°50460), et un sur la séparation liquide/solide (ARIA n°4593). Dans deux cas, les procédés ne sont pas spécifiés.

Une première analyse des procédés d'extraction a permis de retenir 6 événements représentatifs qui ont eu lieu sur une période qui s'étend de 1993 à 2014 (Figure 17).

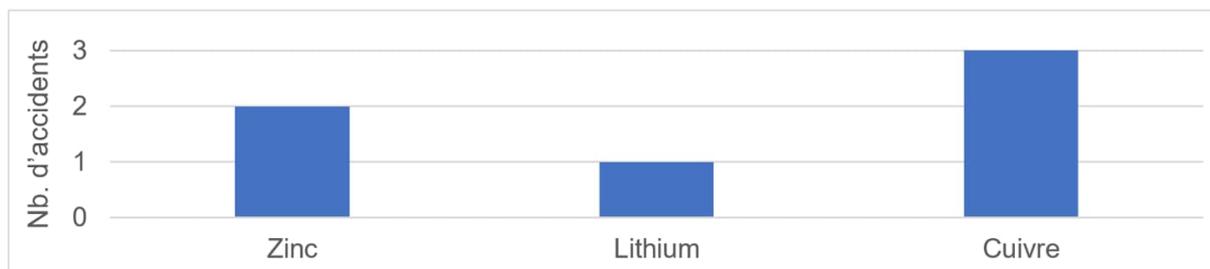


Figure 17. Nombre d'accidents recensés dans la base ARIA par type de métal extrait

Les causes associées à ces incidents sont des erreurs humaines (n°45244 et n°40183), des erreurs de dimensionnement (n°4593) et de l'usure (n°50460). Le principal événement redouté qui en a découlé est la perte de confinement qui peut être liée à un sur-remplissage (n°45244), à un rejet accidentel

(n°4593 et n°33381), ou à l'inflammation de combustibles (n°40183 et n°50460). Les phénomènes dangereux ou impactant qui en ont résulté sont en majorité des incendies (n°45244, n°40183, n°50460 et n°34576) mais également des pollutions (n° 33381 et n°45244) et une explosion (n°4593). Leurs conséquences ont été :

- humaines avec, dans la plupart des cas, des blessés voire des morts (11 dans le cas de l'explosion n°4593) ;
- environnementales avec des rejets polluants dans l'air et les eaux fluviales (n° 33381 et n°45244) ;
- économiques avec des préjudices pouvant atteindre 2 M€ (n° 50460),
- sociales avec la destruction d'une usine (n° 50460) ou du chômage technique (n° 34576 et n° 40183).

Les mesures mises en place pour limiter l'impact de ces conséquences sont :

- le déploiement de plans d'urgence avec l'intervention d'équipes de secours internes et externes au site (n° 50460 et n°45244) ;
- l'arrêt partiel ou total des installations (n°40183 et n°33381) ;
- le confinement de personnes (n°45244).

Les améliorations mises en place à l'issue de ces incidents ou accidents sont :

- l'ajout de barrières de sécurité (dispositif anti-débordement dans le cas n°45244) ;
- le remplacement ou l'amélioration d'équipement (n°45244 et n°33381) ;
- l'amélioration des mesures organisationnelles (n°40183).

*Tableau 4. Retour d'expérience sur les procédés d'extraction d'après la base ARIA*

Métal	N° incident	Nom	Date de survenue	Lieu	Détail
Lithium	N° 45244	Débordement d'une cuve de lithium	05/05/2014	France- 73 - SAINT-MARCEL	<p>Dans une usine chimique, un opérateur soutire du lithium (métal très réactif, PF : 180°C) dans une cuve d'électrolyse de chlorure de lithium quand un débordement se produit vers 14 h. Une nappe enflammée de 3 m<sup>2</sup> se forme au sol. Le lithium en fusion (450°C) coule par gravité le long de la paroi de la cellule et arrive au sous-sol, endommageant les flexibles de refroidissement à eau des connexions électriques de la cellule. L'eau inonde le sous-sol de la salle d'électrolyse et se vaporise. Cette vapeur est rejetée à l'extérieur par la ventilation forcée. L'épais nuage de vapeur d'eau qui s'est formé au-dessus de l'usine et les odeurs dégagées par la fonte de la bakélite tapissant le sous-sol de la salle d'électrolyse inquiètent les riverains. L'opérateur, légèrement brûlé, est évacué et les 13 autres opérateurs de l'unité sont confinés. L'exploitant déclenche le POI. Il prévient les secours et les mairies voisines. L'ensemble des cellules lithium et sodium est mis à l'arrêt. Les pompiers internes jettent de la poudre inerte sur la cellule accidentée et sur la nappe enflammée. Des bâches ignifugées protègent les cellules voisines. Le foyer est maîtrisé avant l'arrivée des pompiers. Les cellules d'électrolyse de sodium, ne pouvant être arrêtées plus de 2 h sous peine d'endommagement (6 h pour celles au lithium), sont redémarrées à 16 h malgré quelques reprises de feu vite maîtrisées. Le POI est levé vers 16h50. L'incident ne perturbe pas la production. Les pompiers sous ARI pompent l'eau répandue au sous-sol. Un employé est légèrement brûlé au dos par de la vapeur d'eau lors de la réparation d'une tuyauterie abîmée en vue du redémarrage des cellules au sodium, ce dernier engendrant des odeurs de chlore autour de l'usine pendant 1 h. Les 2 employés blessés sont évacués vers l'hôpital le plus proche. Un communiqué de presse est diffusé.</p> <p>Le soutirage du lithium depuis la cellule d'électrolyse se fait une fois par jour sous mise en pression d'argon (0,3 bar) du collecteur de métal après qu'il soit isolé de la cellule grâce à la fermeture d'une vanne. Bien que possédant un couvercle, la cellule n'est pas complètement fermée pour permettre des ajouts réguliers de matière première. Le jour de l'accident, l'opérateur a bien suivi la procédure mais n'a pas complètement fermé cette vanne (erreur de geste). La pression est alors remontée vers la cellule et a provoqué le débordement de lithium en fusion.</p> <p>Le procédé d'électrolyse au lithium est un procédé pilote relativement nouveau (mise en service datant de moins de 18 mois) et dont la mise au point a provoqué quelques accidents. L'exploitant rappelle aux opérateurs l'importance du respect de la procédure de soutirage. Il remplace les vannes présentes sur les trois cellules lithium par des modèles ¼ de tour ne présentant aucune ambiguïté quant à leur position ouverte ou fermée. L'inspection des installations classées demande à l'exploitant d'étudier les pistes d'amélioration de la sécurité suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- changement de technologie de flexible,</li> <li>- protection des flexibles,</li> <li>- pose de dispositif anti-débordement (verrouillage des capots, augmentation de</li> </ul>

Métal	N° incident	Nom	Date de survenue	Lieu	Détail
					la hauteur des parois de la cellule,...), - mise en place de gouttières le long des parois de la cellule pour collecter les éventuelles coulures, - mise en place d'un système de collecte des eaux (égout) au niveau du sous-sol.
Zinc	N°4593	Explosion dans une unité de raffinage de zinc	16/07/1993	FRANCE - 62 - NOYELLES-GODAULT	<p>Une explosion se produit vers 12h30 sur une colonne de vaporisation de cadmium d'une unité de raffinage de zinc par distillation fractionnée. Un nuage de vapeurs de zinc et de poudre d'oxyde de zinc (?) formant un brouillard blanc opaque se diffuse en quelques minutes dans l'atelier. Les 11 employés et sous-traitants travaillant au voisinage immédiat sont grièvement brûlés ; un soudeur est tué sur le coup, 9 autres personnes décèdent dans les minutes, heures et jours qui suivent, le seul survivant est brûlé à 90 %. Les dégâts matériels dans l'atelier sont limités.</p> <p>La colonne d'une hauteur de 13 m, remise à neuf avec un nouvel empilage de 59 plateaux de carbure de silicium et de nouveaux carneaux(conduits) a redémarré le 25 mai. La phase de production proprement dite débute le 24 juin, le régime ayant été maintenu en-dessous de la capacité nominale. La veille de l'accident vers 17 h, un grondement anormal avait alerté les opérateurs et un contrôle avait mis en évidence la montée en température du récupérateur de chaleur des fumées et son encrassement important. Le matin de l'accident, diverses interventions avaient été effectuées pour rétablir un état de fonctionnement normal.</p> <p>Des enquêtes administratives et de tiers-expert sont effectuées. L'origine de l'accident étant attribuée à une rupture de plateaux pouvant être due à un problème de qualité ou à des chocs thermiques lors du préchauffage ou lors de la 1ère alimentation de la colonne, l'installation est reconstruite en prenant des précautions particulières pour la réception des plateaux et le préchauffage, de nouveaux instruments de contrôle sont installés. Reconstituée en décembre 1993, la colonne redémarre en production le 17 janvier 1994 à débit réduit. Le 24 janvier, une nouvelle explosion se produit. Un sous-traitant circulant autour de l'installation dans la zone interdite après le 1er accident (secteur non condamné physiquement), est tué. A l'issue des enquêtes et expertises des 2 explosions, l'hypothèse retenue est l'engorgement de la colonne en raison d'un débit de soutirage du zinc insuffisant en bas de celle-ci (bouchage partiel du siphon d'évacuation du métal liquide ou viscosité trop élevée du zinc durant la phase de démarrage de la colonne ?). Le niveau de zinc liquide s'élevant dans la colonne, des dégagements de bulles de vapeurs de zinc provoquaient des vibrations entraînant la rupture des plateaux puis de la colonne avec émissions de vapeur et aérosol de zinc réagissant de façon explosive avec l'air de la chambre de combustion.</p> <p>Le 25 septembre 1997, le tribunal condamne le directeur de l'usine et le directeur des services généraux techniques à des peines de prison avec sursis et à 30 000 francs d'amende chacun ; la société est déclarée civilement responsable. Les différentes enquêtes révéleront l'absence de prise en compte du retour d'expérience issu d'autres accidents dans le monde et des défaillances organisationnelles patentées. L'usine cesse de fonctionner au début de l'année 2003</p>
Zinc	N° 40183	Incendie dans la salle d'électrolyse d'une usine de production de zinc	24/04/2009	FRANCE - 59 - AUBY	<p>Un feu se déclare vers 19 h au niveau du pont d'une cellule de la halle d'électrolyse d'une usine de production de zinc. Les fumées aspirées par le système d'aération de la salle sont rejetées à l'extérieur du bâtiment. Le chef de poste interrompt l'alimentation électrique de la halle conformément à la procédure prévue et les secours internes maîtrisent le sinistre. Les câbles électriques d'un automate sont endommagés ; la production est arrêtée durant 2 jours. Un arc électrique à la suite d'une erreur de programmation du pont lors de la manipulation des électrodes est à l'origine du sinistre. L'exploitant renforce le marquage des cellules, modifie des modes opératoires, interdit aux employés en intérim de programmer les ponts et revoit la procédure de contrôle des isolateurs de ces appareils de manutention. Le personnel est sensibilisé au risque par une note interne.</p>
Cuivre	N° 33381	Rejet accidentel d'effluents chargés en hydroxyde ou sulfate de cuivre	16/06/2006	FRANCE - 14 - DIVES-SUR-MER	<p>Un rejet d'effluents chargés en sulfate ou hydroxyde de cuivre est constaté vers 10 h dans un fossé collectant les eaux pluviales d'une zone industrielle et les eaux résiduaires traitées d'une entreprise de transformation du cuivre. Les rejets de l'établissement sont interrompus et l'activité d'une partie des installations est arrêtée ; des travaux de curage et de nettoyage du fossé sont effectués. Deux causes distinctes sont à l'origine de la pollution : un dysfonctionnement de la station interne de traitement des effluents (décanteur et filtre à sable saturés), l'absence d'étanchéité des fosses de récupération d'effluents aqueux (eaux de lavage, eaux de rinçage des cuves). Les fuites des fosses, collectées par un réseau de drainage enterré, se sont écoulées dans le réseau des eaux pluviales aboutissant au fossé. L'inspection des installations classées constate les faits. Les filtres sont changés et des travaux d'étanchéité sont réalisés.</p>

Métal	N° incident	Nom	Date de survenue	Lieu	Détail
Cuivre	N° 50460	Incendie dans une usine de traitement de surface	14/09/2005	ALLEMAGNE - DUISBOURG	<p>Un feu se déclare dans une unité d'électrodéposition d'une usine de traitement de surface. L'incendie se propage à l'ensemble du site. Les pompiers internes et externes interviennent. Un d'entre eux est blessé. Les bâtiments de l'usine sont détruits. Une partie des équipements a pu être sauvée. Les dégâts matériels s'élèvent à 2 000 000 EUR.</p> <p>L'incendie est dû à un échauffement dans un bain d'électrodéposition. L'usure des balais (de transmission du courant électrique) a provoqué l'abrasion du rouleau conducteur en cuivre. Cette abrasion a généré une surchauffe par friction et un échauffement dû à la résistance électrique générée par l'appauvrissement du contact électrique. Il en résulte un échauffement dans le bain. Cet échauffement peut avoir causé le départ de feu de 2 manières : soit en enflammant les conduites d'extraction des vapeurs, en matières plastiques, situées à proximité, soit en générant un arc électrique. Dans les deux cas, le départ de feu a entraîné l'inflammation de l'hydrogène présent dans les gaines d'extraction.</p> <p>Plusieurs incendie et explosions liées aux installations électriques ont eu lieu dans cette installation (ARIA 43384 et 19579)</p>
Cuivre	N° 34576	Incendie dans une usine de 1ère transformation du cuivre	15/05/2008	FRANCE - 62 - LENS	<p>Un feu se déclare vers 5 h dans un laboratoire de contrôle de 500 m<sup>2</sup> situé dans un bâtiment de 5 000 m<sup>2</sup> d'une usine de transformation du cuivre. Les pompiers éteignent l'incendie avec 2 lances à débit variable de 500 l/min. Aucun blessé n'est à déplorer mais la production est interrompue pendant 10 jours et 60 employés sont en chômage technique.</p>

## 7. Identification des potentiels de danger

### 7.1. Potentiels de dangers associés aux substances

Dans les saumures géothermiques, le lithium se trouve généralement en solution sous la forme de chlorure (LiCl). Les caractéristiques de cette substance sont présentées de manière générale dans les paragraphes qui suivent.

#### 7.1.1. Dangers associés à la saumure

##### Propriétés générales

La saumure est une solution aqueuse de sels dissous dont le principal est généralement le chlorure de sodium (Tableau 5). Elle renferme également des gaz dissous dont certains, en cas de dégazage, peuvent être asphyxiants ou toxiques voire inflammables (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, CO....).

*Tableau 5. Caractéristiques physicochimiques globales d'une saumure géothermique*

PROPRIETES	VALEURS
Nom	Saumure
Composition	Eau, chlorure de sodium majoritaire, sels divers, gaz dissous
État physique	Liquide généralement incolore, fréquente odeur d'H <sub>2</sub> S
Densité	Entre 1 et 1,2 (à saturation en NaCl)

##### Risques

La saumure en elle-même ne présente pas de danger d'incendie, d'explosion ou de toxicité aiguë. Elle peut toutefois causer une irritation lors d'une exposition prolongée.

En cas de déversement, des précautions sont à prendre pour empêcher sa migration dans les sols, les cours d'eau ou les aquifères superficiels. En effet, même si aucune mention de danger n'est associée à la saumure, une pollution de ces milieux est envisageable étant donné leurs concentrations naturelles en sels. Des mesures sont donc à prévoir telles que la mise en place de rétentions sous les réservoirs et réseaux de saumure.

Comme la saumure favorise la corrosion, la compatibilité des matériaux est à prendre en compte pour les réservoirs, lignes d'injection et compléments de puits, afin de limiter le risque d'épanchement en surface. Des alliages tels que l'acier inoxydable, notamment de type 316 L, sont à privilégier.

### 7.1.2. Dangers associés aux composés du lithium

Le lithium, principalement présent dans les saumures géothermiques sous forme de chlorure de lithium, est ensuite transformé en carbonate ou en hydroxyde de lithium pour les besoins industriels.

#### Chlorure de lithium

##### Propriétés générales

Le chlorure de lithium est un composé chimique de formule LiCl dont les caractéristiques générales sont rappelées dans le Tableau 6.

Tableau 6. Caractéristiques générales du chlorure de lithium<sup>10</sup>

PROPRIETES	VALEURS
Nom	Chlorure de lithium
Etat physique	Incolore à blanc, en cristaux ou poudre
Masse moléculaire	42,4 g/mol
Point d'ébullition	1360°C
Point de fusion	613°C
Densité relative (eau = 1)	2,1

Le chlorure de lithium est extrêmement hygroscopique. La solution aqueuse précipite en dessous de 100°C. Elle est corrosive pour les métaux. Dans l'industrie, le chlorure de lithium est utilisé comme électrolyte pour la production de sels fondus de lithium métal par électrolyse (Kirk-Othmer, 2005).

##### Risques

Le chlorure de lithium est incombustible. Quand il est chauffé, il se décompose toutefois en dégageant du chlore (INRS, 2021). Il présente en outre des risques toxiques (Tableau 7).

Tableau 7. Toxicité du chlorure de lithium<sup>11</sup>

Pictogramme issu du règlement CLP	Mentions de danger	
	H 302	Toxicité aiguë (orale)
	H 315	Corrosion cutanée/irritation cutanée
	H 319	Lésion oculaire grave/sévère irritation des yeux

Des valeurs limites d'exposition professionnelle ont été établies pour ce produit, et sont synthétisées dans le Tableau 8 (INRS, 2021).

Tableau 8. Valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP) établies pour le chlorure de lithium

NOM	DÉTAILS
<b>Composés inorganiques du lithium (à l'exception de ceux nommément cités)</b>	Commission MAK <sup>12</sup> - 2020 VLEP 8h (mg/m <sup>3</sup> ) : 0,2

<sup>10</sup> [https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p\\_lang=fr&p\\_card\\_id=0711](https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_lang=fr&p_card_id=0711) (consulté le 14/11/2023)

<sup>11</sup> FDS - Chlorure de lithium ≥99 % -ROTH -Dernière révision 22.10.2021

<sup>12</sup> MAK signifie « Maximale Arbeitsplatz-Konzentration », c'est-à-dire « Concentration maximale sur le lieu de travail ». Il s'agit des travaux d'une commission scientifique allemande mandatée en 2020 par la Communauté allemande de la recherche ou DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft).

## Carbonate de lithium

Le carbonate de lithium est un composé chimique de formule  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  dont les caractéristiques générales sont rappelées dans le Tableau 9.

Tableau 9. Caractéristiques générales du carbonate de lithium<sup>13</sup>

PROPRIETES	VALEURS
Nom	Carbonate de lithium
État physique	Poudre blanche
Masse moléculaire	73,9 g/mol
Point d'ébullition	1310°C
Point de fusion	613°C
Densité relative (eau = 1)	2,1

### Risques

Le carbonate de lithium se décompose en milieu acide avec dégagement de dioxyde de carbone. Il est incompatible avec le fluor avec lequel il réagit violemment en dégageant de la chaleur. Il présente en outre des risques toxiques (Tableau 10).

Tableau 10. Toxicité du carbonate de lithium<sup>14</sup>

Pictogramme issu du règlement CLP	Mentions de danger	
	H 302	Toxicité aiguë (orale)
	H 319	Lésion oculaire grave/sévère irritation des yeux

Des valeurs limites d'exposition professionnelle ont été établies pour ce produit et sont synthétisées dans le Tableau 11 (INRS, 2021).

Tableau 11. Valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP) établies pour le carbonate de lithium

NOM	DÉTAILS
<b>Composés inorganiques du lithium (à l'exception de ceux nommément cités)</b>	Commission MAK <sup>12</sup> - 2020 VLEP 8 h ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) : 0,2

## Hydroxyde de lithium

L'hydroxyde de lithium est un composé chimique de formule  $\text{LiOH}$  dont les caractéristiques générales sont rappelées dans le Tableau 12.

<sup>13</sup> [https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p\\_card\\_id=1109&p\\_version=1&p\\_lang=fr](https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_card_id=1109&p_version=1&p_lang=fr) (Consulté le 14/11/2023).

<sup>14</sup> FDS – Lithium carbonate -ThermoFisher Scientific -Dernière révision 06/10/2023

Tableau 12. Caractéristiques générales de l'hydroxyde de lithium<sup>15</sup>

PROPRIETES	VALEURS
Nom	Hydroxyde de lithium
État physique	Solide
Masse moléculaire	41,06 g/mol
Point d'ébullition	Décomposition à 924°C
Point de fusion	450 à 471°C
Densité relative (eau = 1)	1,46 à 1,51 (à 20°C)

### Risques

L'hydroxyde de lithium absorbe le dioxyde de carbone et l'humidité de l'air. Ses solutions aqueuses sont très alcalines et attaquent l'aluminium. Il est incompatible avec de nombreux composés organiques (alcools, cétones, aldéhydes...) et présente en outre des risques toxiques (Tableau 7).

Tableau 13. Toxicité de l'hydroxyde de lithium<sup>16</sup>

Pictogramme issu du règlement CLP	Mentions de danger	
	H 302	Toxicité aiguë (orale)
	H 314	Corrosion cutanée/irritation cutanée

Des valeurs limites d'exposition professionnelle ont été établies pour ce produit et sont synthétisées dans le Tableau 14 (INRS, 2021).

Tableau 14. Valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP) établies pour l'hydroxyde de lithium

NOM	DÉTAILS
Composés inorganiques du lithium (à l'exception de ceux nommément cités)	Commission MAK <sup>12</sup> - 2020 VLEP 8 h (mg/m <sup>3</sup> ) : 0,2

### 7.1.3. Dangers associés aux adsorbants

Les adsorbants pouvant être mis en œuvre sont de diverses natures, étant donnée la multitude des procédés d'extraction envisagés (cf. paragraphe 4). D'autre part, leurs formulations chimiques et leurs dosages sont pour la plupart confidentiels. C'est pourquoi nous n'avons pas pu développer ici les types de dangers qui leur sont associés.

## 7.2. Potentiels de dangers associés au procédé d'extraction du lithium

### 7.2.1. Centrale géothermique

A l'instar d'autres activités d'exploitation du sous-sol, la géothermie peut être à l'origine d'une sismicité induite qui est principalement due :

- en phase de test, aux opérations de stimulation hydraulique des puits ;

<sup>15</sup> [https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p\\_card\\_id=0913&p\\_version=1&p\\_lang=fr](https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_card_id=0913&p_version=1&p_lang=fr) (Consulté le 14/11/2023).

<sup>16</sup> [Lithium hydroxide monohydrate 99.995% trace metals basis | 1310-66-3 \(sigmaaldrich.com\)](https://www.sigmaaldrich.com/fr/fr/chemical/1310-66-3)

- en phase d'exploitation, à la réinjection profonde du fluide géothermique refroidi en sortie de centrale ; le débit d'injection du fluide, sa pression et sa température sont alors des paramètres de contrôle susceptibles d'affecter la sismogenèse.

L'injection de fluide géothermique refroidi dans le sous-sol induit une augmentation de la pression et une diminution de la température qui peuvent être à l'origine de variations de l'état de contraintes naturel (Ineris-BRGM, 2023). Il s'agit de déformations volumiques dues à l'expansion du réservoir résultant de l'injection de fluide (mécanismes qualifiés de poroélastiques) mais aussi, surtout dans un système géothermique à haute température (supérieure à 200°C), aux variations de température dues au contraste thermique élevé entre le fluide injecté et le réservoir (mécanismes qualifiés de thermoélastiques). Ces mécanismes sont à la base des opérations classiques de stimulation hydraulique pour le premier, et de stimulation thermique pour le second, employées dans certains systèmes géothermiques pour augmenter la perméabilité des réservoirs. Ces opérations sont parfois à l'origine du déclenchement d'une sismicité.

Ainsi, dans la mesure où les procédés d'extraction directe du lithium, qui seront adossés à de futures centrales géothermiques, seraient amenés à modifier significativement certains paramètres du fluide réinjecté, notamment sa pression ou sa température, il pourrait s'ensuivre un impact sur la fréquence et/ou sur l'intensité des séismes induits. L'importance de cet impact potentiel sera à apprécier au cas par cas, en fonction des caractéristiques du réservoir géothermique et du fluide délithifié qui y sera injecté.

### 7.2.2. Dispositif d'extraction du lithium

Une première estimation des dangers supplémentaires liés à l'extraction de lithium a été réalisée sur la base des données bibliographiques présentées dans le chapitre 4.

En tenant compte des connaissances limitées sur les modes d'extraction et les substances qui vont être mis en œuvre, les principaux événements redoutés identifiés sont la perte de confinement voire l'éclatement associé à un procédé sous pression. Ceci peut engendrer une exposition directe du salarié à des risques de brûlure, étant donné la température de la saumure, à de la toxicité notamment liée au chlorure de lithium ou à l'exsolution des gaz dissous (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S), voire à des risques d'incendie en cas de mise en place de procédé par séparation électrochimique. En termes d'environnement, il est à considérer des risques toxiques au niveau des enjeux éventuellement présents à proximité du site d'extraction, voire de pollution en cas de rejet dans l'air, le sol ou l'eau.

Il est nécessaire également de s'assurer des moyens mis en œuvre afin de limiter la sismicité induite au niveau du ou des puits d'injection de saumure, surtout si les paramètres de pression et de température varient significativement entre la réinjection d'une saumure géothermique issue d'une simple extraction de chaleur et celle résultant, en sus, d'une extraction directe du lithium.

## 8. Conclusion

Le présent document s'inscrit dans l'objectif 1 du Contrat d'objectifs et de performance 2021-2025 de l'Ineris intitulé « Maîtriser les risques liés à la transition énergétique et à l'économie circulaire ». Le but est ici de qualifier les risques supplémentaires potentiellement induits par l'extraction du lithium contenu dans les fluides géothermiques par rapport aux risques propres à la filière géothermique existante.

### 8.1. Points importants à retenir

Ce travail a permis de synthétiser les connaissances sur le sujet et de faire une première estimation des potentiels de dangers associés à cette nouvelle technologie. Il s'appuie sur :

- une présentation des enjeux pour le lithium, plus particulièrement d'origine géothermique (chapitres 2 et 3) ;
- un recensement des projets d'extraction de lithium dans des sites géothermiques (chapitre 4) ;
- une description synthétique des technologies d'extraction (chapitre 5) ;
- une identification succincte du cadre réglementaire applicable au site géothermique en tant qu'ICPE (chapitre 6) ;
- une analyse du retour d'expérience sur l'accidentologie des sites géothermiques et des procédés d'extraction de métaux, plus particulièrement de lithium (chapitre 6) ;

- une identification des potentiels de danger liés aux substances présentes dans les saumures géothermiques et aux produits employés pour l'extraction directe du lithium (chapitre 7).

Plusieurs projets d'extraction de lithium géothermique sont en train de voir le jour dans le monde ainsi que probablement, dans un futur proche, en France. Les technologies pouvant être utilisées sont diverses entre les extractions par précipitation, par voie solide/liquide ou liquide/liquide, ou par séparation électrochimique.

Concernant le cadre réglementaire, il apparaît que les centrales géothermiques actuelles ne sont pas des installations couvertes par la réglementation ICPE mais que les procédés d'extraction de lithium (ou d'autres substances dans l'avenir) pourraient l'être en fonction des activités et des substances mises en œuvre.

Le retour d'expérience sur l'accidentologie de ces filières montre en outre que :

- les puits géothermiques présentent des risques propres qui pourraient engendrer des effets dominos sur d'éventuelles installations connexes d'extraction de métaux, dont le lithium ;
- les procédés d'extraction de métaux mettant en œuvre des procédés similaires à ceux prévus pour le lithium ont pu conduire à des événements redoutés tels que des pertes de confinement, des rejets accidentels voire l'inflammation de combustibles.

## 8.2. Potentiels de dangers associés au procédé d'extraction de lithium

Une première estimation des dangers supplémentaires liés à l'extraction directe de lithium géothermique a été réalisée. En tenant compte des connaissances limitées sur les modes d'extraction et les substances qui vont être mis en œuvre, les principaux événements redoutés identifiés sur les personnes sont les secousses sismiques induites, la perte de confinement, voire l'éclatement à l'instar de tout procédé sous pression.

Dans le premier cas, c'est la modification des conditions de pression et/ou de température de la saumure délithifiée qui, dans les puits de réinjection, pourrait impacter la fréquence et/ou l'intensité des séismes induits. L'importance de cet impact potentiel sera à apprécier au cas par cas, en fonction des caractéristiques du réservoir géothermique et du fluide délithifié qui y sera injecté, tout en s'assurant des moyens mis en œuvre afin de limiter la sismicité induite (Ineris-BRGM, 2023).

Les autres cas peuvent engendrer une exposition directe des travailleurs aux risques de brûlure, étant donné la température de la saumure, et de toxicité notamment liée aux substances utilisées pour l'extraction du lithium ou à l'exsolution de gaz dissous, voire à des risques d'incendie en cas de mise en place de séparations électrochimiques. Enfin, en termes d'environnement, il est à considérer des risques toxiques au niveau des enjeux éventuellement présents à proximité du site d'extraction, voire de pollution en cas de rejet dans l'air, le sol ou l'eau.

### 8.3. Proposition d'axe d'approfondissement

Cette étude devra être complétée et approfondie par des visites complémentaires de sites pilotes et/ou démonstrateurs afin :

- d'enrichir les connaissances sur les adsorbants et d'identifier plus finement leurs potentiels de dangers ;
- de recueillir des données d'entrée représentatives des procédés employés pour mener une analyse de risques, voire pour modéliser des distances d'effets de potentiels phénomènes dangereux ;
- de recueillir et d'analyser les données de pression, température et physicochimie de la saumure délithifiée par rapport à la saumure brute initialement injectée afin d'en tenir compte lors de l'évaluation de l'aléa de sismicité induite ;
- d'identifier les barrières de sécurité à mettre en œuvre pour pallier ces risques.

Cette étude pourrait également porter sur une identification des potentiels de danger liés à l'étape finale de purification du lithium qui fait suite à son extraction directe.

## 9. Références bibliographiques

ADEME, 2022. Les matériaux pour la transition énergétique, un sujet critique. Transition(s) 2050. Choisir maintenant. Agir pour le climat, Brochure réf. 011761, ISBN : 979-10-297-1945-5, 39 p.

Atta Mends E, Pengbo C, 2023. Lithium extraction from unconventional aqueous resources – A review on recent technological development for seawater and geothermal brines, J. of Env. Chem. Eng., 11/5, 110710.

Borie C, 2020. Le CSF Mines et métallurgie et l'approvisionnement en métaux et matériaux stratégiques de l'industrie française. Responsabilité & Environnement, juillet 2020, 99 : 5 p.

Chao J, 2020. Geothermal Brines Could Propel California's Green Economy. News from Berkeley Lab, August 5, 2020.

Chagnes A., 2022, Métallurgie extractive – Hydrométallurgie, Technique de l'ingénieur, Réf : M2235V4

Daverne S, 2022. Imerys prévoit d'ouvrir une mine de lithium dans l'Allier. L'Usine Nouvelle, 24/11/2022.

De Souza G, Pouessel J, Dautriche B, Chtchigrovsky M, Meiries S, 2021. Device and method for the desalination of water by means of thermal deionisation and liquid - Phase ion extraction liquid. US Patent Application Publication, No. US 2021/0355076 A1, Nov. 18, 2021, 34 p.

Gloagen E, Melleton J, Lefebvre G, Tourlière B, Yart S et al., 2018. Ressources métropolitaines en lithium et analyse du potentiel par méthodes de prédictivité. Rapport BRGM/RP-68321-FR, 126 p.

Gombert P, Lahaie F, Cherkaoui A, 2017. Etat des connaissances sur les risques, impacts et nuisances potentiels liés à la géothermie profonde. Rapport Ineris DRS-16-157477-00515A, 139 p.

Hauet JP, 2019. Du lithium en Alsace. REE N°4/2019, pp. 24-25.

Ineris-BRGM, 2023. Guide de bonnes pratiques pour la maîtrise de la sismicité induite par les opérations de géothermie profonde. 162 p.

INRS, 2021. Lithium et composés - Fiche toxicologique n° 183 - Dernière révision : mai 2021.

Khalil A, Mohammed S, Hashaikh R, Hilal N, 2022. Lithium recovery from brine: Recent developments and challenges, 2022, Desalination, 528, 115611.

Kirk-Othmer, 2005. Encyclopedia of chemical technology – Fifth edition – Volume 15.

Kloetzl S, 2021. En Alsace, la quête d'un « or blanc » produit en France et durable. Le Monde, 14 décembre 2021, p. 10.

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, Vol 221, 2023, 106131,

Lupieri S, 2022. Lithium : les promesses d'une future filière française. Les Echos Week-End, mercredi 31 août 2022, 2704 mots.

Pauwels H, Lambert M, Genter A, 1991. Valorisation des fluides géothermaux contenant du lithium en vue d'une production industrielle. Rapport BRGM R 33 547.

Sales J, Mushtaq F, Christou MD, Nomen R, 2007. Study of Major Accidents Involving Chemical Reactive Substances: Analysis and Lessons Learned, Process Safety and Environmental Protection, 85/2: 117-124.

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, 101/2022, <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102385>

Stringfellow WT, Dobson PF, 2021. Technology for the Recovery of Lithium from Geothermal Brines. Energies 2021, 14, 6805, 73 p., <https://doi.org/10.3390/en14206805>

Ventura S, Bhamidi S, Hornbostel M, Nagar A, 2020. Selective Recovery of Lithium from Geothermal Brines. California Energy Commission. Publication Number: CEC500-2020-020.

Vulcan Energy, 2023. Vulcan Zero Carbon Lithium™ Project Phase One DFS results and Resources-Reserves update. ASX Release 13 February 2023: 110 p.

Yu H, Naidu G, Zhang C, Wang C, Razmjou A, Han DS, He T, Shon H, 2022. Metal-based adsorbents for lithium recovery from aqueous resources. Desalination, October 2022, 539/1: 115951.

## 10. Annexes

### 10.1. Projets de recherche scientifique français

Deux projets de recherche scientifique ont récemment vu le jour en Alsace (Hauet, 2019) :

- le projet Therma'Li, basé sur la technologie AquaOmnes de la société Adionics qui permet de piéger le lithium à température ambiante avant de le libérer par simple élévation de température ; il est adossé à un permis exclusif de recherche (PER) déposé en 2018 par la société Fonroche Géothermie sur le territoire dénommé « La Plaine du Rhin » ;
- le projet EuGeLi, dans le cadre du PER d'Illkirch-Erstein, déposé en 2019, qui porte sur le lithium issu de fluides géothermiques déjà exploités pour la production de chaleur et d'électricité au titre de concessions géothermiques.

#### 10.1.1. Présentation du projet Therma'Li

Subventionné par GEODENERGIES, le projet Therma'LI s'est déroulé de 2019 à 2021. Il a été coordonné par la société française ADIONICS et a regroupé le BRGM, l'ISTO (Orléans) ainsi que les sociétés Fonroche et ESG<sup>17</sup>. Son objectif était de créer une unité d'extraction sélective des éléments chimiques à l'origine de dépôts minéraux indésirables, et de valoriser également le chlorure de lithium présent dans les saumures géothermiques d'Alsace à une concentration de 60 à 360 mg/L. L'extraction du lithium repose sur la technologie d'extraction liquide-liquide AquaOmnes, basée sur l'utilisation du Flionex, un fluide nanostructuré breveté, composé d'un mélange d'extractants cationiques, de solvatants anioniques et d'un diluant. Il possède la propriété d'extraire, à température ambiante, des cations de métaux alcalins et alcalinoterreux dissous dans l'eau (Na, K, Li, Mg, Ca...), puis de les libérer au contact d'une eau chaude. Cette extraction sélective par simple élévation de température, sans ajout de produits chimiques et avec une consommation d'eau et un besoin énergétique réduits, possède ainsi un impact environnemental faible, contrairement à la méthode classique qui consiste à fixer les sels sur un support puis à les désorber au moyen d'acides forts.

L'applicabilité du process devait se faire sur le site géothermique de Vendenheim (67) qui a été mis à l'arrêt en 2020 à la suite de la survenue de plusieurs séismes dans l'agglomération de Strasbourg.

#### 10.1.2. Présentation du projet EuGeLi

Le projet européen EuGeLi pour « European Geothermal Lithium Brine » s'est déroulé de 2019 à 2021. Coordiné par l'entreprise minière et métallurgique française Eramet, il a regroupé neuf partenaires dont des industriels (Electricité de Strasbourg-Géothermie, BASF), des universitaires (Chimie

---

<sup>17</sup> <https://www.geothermies.fr/comprendre/innovation/les-projets/2019-2021-thermali-valorisation-des-eaux-geothermales-par-extraction-des-sels-de-lithium>

ParisTech, Université Libre de Bruxelles) et des centres de recherche (BRGM, IFP Énergies nouvelles, ElfER, VITO). Ce projet était structuré autour de trois grands volets<sup>18</sup> :

- la compréhension des processus naturels liés à la présence de lithium dans les saumures géothermiques et l'évaluation des gisements européens de ce type de lithium ;
- le développement d'un procédé d'extraction directe du lithium (Figure 18) en optimisant le matériau actif afin de pouvoir l'utiliser dans les conditions de pression et de température inhérentes aux gîtes géothermiques ;
- une étude établissant différents modèles économiques de production de lithium à partir de gisements géothermiques afin d'évaluer la rentabilité et la faisabilité globale d'un projet industriel de coproduction de lithium et d'énergie géothermique.

Le processus de production de lithium géothermique a pu être testé dans des pilotes implantés sur les deux sites géothermiques de Rittershoffen et de Soultz-sous-Forêts (67) en 2021. La première production de carbonate de lithium issu d'eau géothermique européenne a ensuite été réalisée au centre de R&D Eramet de Trappes (78) à partir d'une saumure issue de Soultz-sous-Forêts : cependant, en fonctionnement industriel, ce raffinage sera réalisé à proximité des sites d'extraction<sup>19</sup>. Le principal défi du projet EuGeLi a été d'adapter le procédé, prévu pour les saumures argentines, aux saumures géothermiques européennes et à leurs conditions d'exploitation, notamment les conditions de température et de pression de la branche de réinjection<sup>20</sup> (80°C, 20 bar).

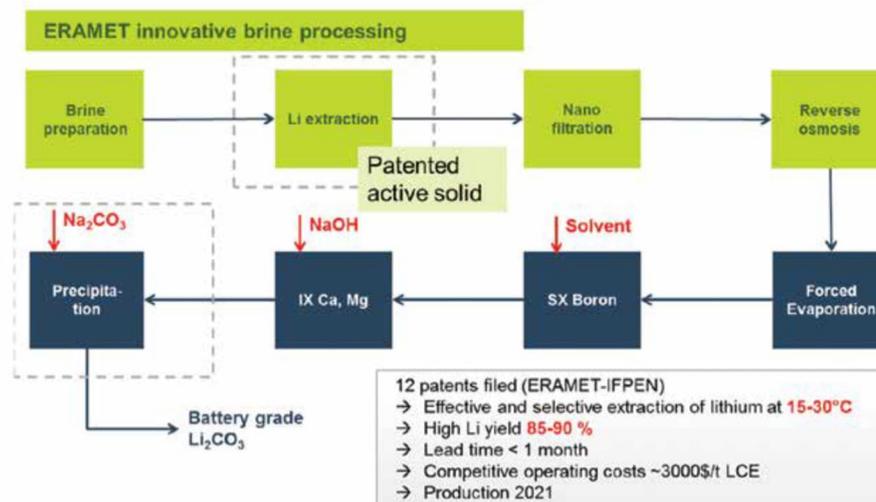


Figure 18. Schéma de principe du procédé EuGeLi (Hauet, 2019)

## 10.2. Projets de démonstrateurs en cours en Europe

### 10.2.1. En Allemagne

Dès mai 2020, la start-up minière germano-australienne Vulcan Energy Resources (VER), basée à Perth (Australie), a émis le souhait d'utiliser des saumures géothermiques pour extraire du lithium en Allemagne, dans le fossé rhénan. L'objectif est de délocaliser une partie de l'approvisionnement de l'Europe en hydroxyde de lithium, majoritairement produit de nos jours en Chine. À partir de cette annonce, les événements se sont accélérés<sup>21</sup> (Figure 19) :

- en juillet 2021, Stellantis, quatrième constructeur automobile mondial, a signé des protocoles d'accord avec VER pour la fourniture de lithium à partir de saumures géothermiques en Californie et en Allemagne ; puis la société sud-coréenne LG Energy Solution, plus grand producteur mondial de batteries pour l'industrie des véhicules électriques, a également signé

<sup>18</sup> <https://www.eramet.com/en/activities/innovate-design/eugeli-project> (consulté le 02/02/2023).

<sup>19</sup> <https://www.usinenouvelle.com/editorial/l-instant-tech-comment-eramet-a-extrait-plusieurs-kilos-de-lithium-de-qualite-batterie-du-sous-sol-alsacien.N1781657> (consulté le 02/02/2023).

<sup>20</sup> <https://www.eramet.com/en/activities/innovate-design/eugeli-project> (consulté le 02/02/2023).

<sup>21</sup> <https://v-er.eu/in-the-media/> (consulté le 11/01/2023).

- un accord avec VER pour acheter 5 kt/an de lithium produit dans la future usine d'extraction depuis des saumures géothermiques, prévue du côté allemand de la vallée du Rhin ;
- en août 2021, c'est le constructeur Renault SA qui a signé un accord avec VER pour sécuriser son approvisionnement en lithium à partir de 2026, en prévision d'une forte hausse de la demande ; l'accord porte sur la fourniture de 6 à 17 kt/an de lithium pour une première tranche de 5 ans à partir des gisements de saumure géothermique d'Allemagne ;
  - en décembre 2021, VER a acheté une centrale géothermique dans la vallée du Rhin supérieur, en Allemagne, pour fournir du lithium à Volkswagen ;
  - en juin 2022, le conseil municipal de Landau a voté en faveur de la production d'énergie géothermique dans la région ; le territoire de cette commune couvre une partie des licences de production géothermique de VER à Insheim et à Landau Süd, où un accord de prélèvement de saumure a été conclu avec l'opérateur ;
  - à la suite, le Conseil du Rhin Supérieur – une association transfrontalière des régions du Bade-Wurtemberg, de Rhénanie-Palatinat, d'Alsace et des cantons du nord-ouest de la Suisse – a décidé de soutenir les projets de géothermie profonde de l'arrondissement d'Ortenau, dans le Bade-Wurtemberg.

En outre, depuis 2021, une usine pilote de production directe de lithium fonctionne en Allemagne à partir de saumure géothermique (voir plus loin au chapitre 10.4.2). En 2022, VER a annoncé avoir fabriqué de l'hydroxyde de lithium de caractéristiques supérieures à la qualité batterie<sup>22</sup>. Pour cela, le chlorure de lithium a été extrait par un adsorbant dans l'usine pilote, puis purifié et concentré dans un autre site afin de le préparer pour l'électrolyse. Il a ainsi été produit une solution d'hydroxyde de lithium qui a été cristallisée pour obtenir de l'hydroxyde de lithium monohydraté de qualité batterie. VER dispose maintenant de suffisamment de données pour achever la première phase de l'étude de faisabilité définitive prévue pour fin 2023. Ces résultats concluants ont également conduit au concept de démonstrateur de sorption en conteneur, appelé LiLy, dont la construction devrait bientôt débuter. Une première phase de production de 15 kt/an est ainsi prévue en 2024, qui sera suivie d'une seconde phase supplémentaire de 25 kt/an vers 2025<sup>23</sup>.

Il est intéressant de noter que l'Office d'état pour la géologie et l'exploitation minière de Rhénanie-Palatinat a considéré que l'impact environnemental prévisionnel des puits géothermiques de production combinée de chaleur et de lithium n'était pas significatif<sup>24</sup>. De ce fait, il n'a donc pas été nécessaire de procéder à une évaluation complète de l'impact environnemental de ces puits, ce qui a constitué une avancée positive pour le développement rapide de ce projet d'extraction directe de lithium.

Enfin, VER a signé d'autres accords en 2022 avec des partenaires italiens et français (voir ci-après).

---

<sup>22</sup> <https://www.pv-magazine.fr/2022/10/25/allemande-un-nouveau-concept-de-lithium-vert-pour-un-produit-de-qualite-batterie/>

<sup>23</sup> <https://www.kallanish.com/en/news/power-materials/market-reports/article-details/vulcan-energy-starts-construction-of-sorption-dle-demo-plant-0922/>

<sup>24</sup> <https://www.investi.com.au/api/announcements/vul/83c2dd1d-58b.pdf>



Figure 19. Installations de VER en Allemagne et en France<sup>25</sup>

### 10.2.2. En Italie

En juillet 2022, la société-mère Vulcan Energy Resources a conclu un accord de collaboration avec Enel Green Power (EGP), le plus grand producteur d'énergie géothermique d'Italie, en vue d'évaluer le potentiel de son permis minier de Cesano située à 20 km de Rome<sup>26</sup>. Ce permis a été attribué à la filiale italienne de VER, Vulcan Energy Italy Pty Ltd. Il comprend actuellement le puits géothermique de Cesano 1 dont la saumure est connue depuis 1976 pour renfermer des concentrations moyennes en lithium de 350 à 380 mg/L, parmi les plus fortes dans le monde dans un contexte géothermique. La productivité de ce puits a été testée avec un débit de plus de 250 m<sup>3</sup>/h de saumure chaude (210°C à la base du puits mais probablement 300°C à la base de l'aquifère géothermique) et d'environ 50 t/h de vapeur. L'exploitation de cette saumure risque toutefois de poser des défis liés à la complexité structurelle du site et à la présence de grandes quantités d'H<sub>2</sub>S dissous. D'autres puits profonds (1400 à 3000 m) ont également été forés dans ce champ géothermique mais la composition chimique de leur saumure n'a pas encore été révélée.

### 10.2.3. En France

En novembre 2022, la société-mère Vulcan Energy Resources a annoncé le lancement de son activité de production d'énergies renouvelables et de lithium décarboné en Alsace<sup>27</sup>, dans la continuité du gisement géothermique allemand de la vallée du Rhin, sous l'appellation « Zero Carbon Lithium™ ». Les analyses des saumures géothermiques prélevées confirment une haute température, une forte concentration en lithium (jusqu'à 214 mg/L) et une faible quantité d'impuretés. La composition de ces saumures est donc similaire à celle actuellement exploitée du côté allemand, ce qui permettra d'appliquer le processus de production du lithium géothermique déjà testé à l'ensemble du gisement du fossé rhénan supérieur.

VER a donc créé une entité française, Vulcan Energie France SAS (VEF), immatriculée à Strasbourg. Cette entité a déposé sa première demande d'octroi de Permis Exclusif de Recherches (PER) de mines de lithium et autres substances connexes, intitulé « Les Cigognes », près d'Haguenau (67). Ce premier PER pourra être suivi d'autres demandes en fonction du résultat des discussions entreprises avec des

<sup>25</sup> <https://www.pv-magazine.fr/2022/11/07/vulcan-sinstalle-en-france-pour-extraire-du-lithium-en-alsace/> (consulté le 27/11/2023)

<sup>26</sup> <https://www.greencarcongress.com/2022/01/20220124-vulcan.html> (consulté le 27/11/2023)

<sup>27</sup> <http://www.plein-soleil.info/actualites/vulcan-debute-une-expansion-strategique-et-le-developpement-de-son-projet-zero-carbon-lithium-en-france/> (consulté le 27/11/2023)

municipalités et des industriels alsaciens. On notera qu'une demande de PER d'extraction de lithium portant sur le même secteur géographique a été déposée par la société Lithium de France. Celle-ci, qui dispose d'un pilote d'extraction de lithium, compte réaliser en Alsace un premier puits géothermique en 2024 et construire une centrale à partir de 2025 (Lupieri, 2022 ; voir également au chapitre 10.4.1).

#### 10.2.4. Au Royaume-Uni

La société Geothermal Engineering Ltd (GEL) a été fondée en 2008 pour exploiter la chaleur géothermique profonde sur plusieurs sites<sup>28</sup>. A United Downs, dans les granites du district minier de Cornouailles, ont ainsi été forés en 2019 un puits de production de 5 275 m de profondeur et un puits d'injection de 2 393 m. Mais cette zone était connue depuis le 19<sup>e</sup> siècle pour ses eaux profondes enrichies en lithium (Figure 20). C'est ainsi qu'en 2016 a été créée la société d'exploration minière Cornish Lithium en vue de l'extraction durable de lithium et d'autres métaux pour batteries à partir des fluides géothermiques<sup>29</sup>. Les deux sociétés ont récemment fondé une coentreprise appelée GeoCubed pour tester une technologie d'extraction directe du lithium en coproduction avec l'exploitation de l'énergie géothermique sur le site d'United Downs. Deux forages profonds d'environ 1 km ont permis de confirmer que les saumures géothermiques étaient bien enrichies en lithium dès 600 m de profondeur. Une usine pilote d'extraction directe du lithium doit prochainement y être construite pour produire de l'hydroxyde de lithium à partir de ces saumures profondes.

Cornish Lithium est maintenant en train de forer un nouveau puits de recherche de lithium dans les saumures géothermiques de la région de Twelveheads à Chacewater, afin de cibler des structures géologiques situées vers 1 600 m de profondeur.

Enfin, un autre projet est prévu en partenariat avec Rodda's, producteur de crème sur les terres duquel se trouve le site géothermique de North Downs. Il devrait y être prochainement réalisé un forage de reconnaissance de 2000 m de profondeur afin de tester la viabilité d'un projet de coproduction de chaleur géothermique dans le but de décarboner le processus de production de crème, et de lithium.

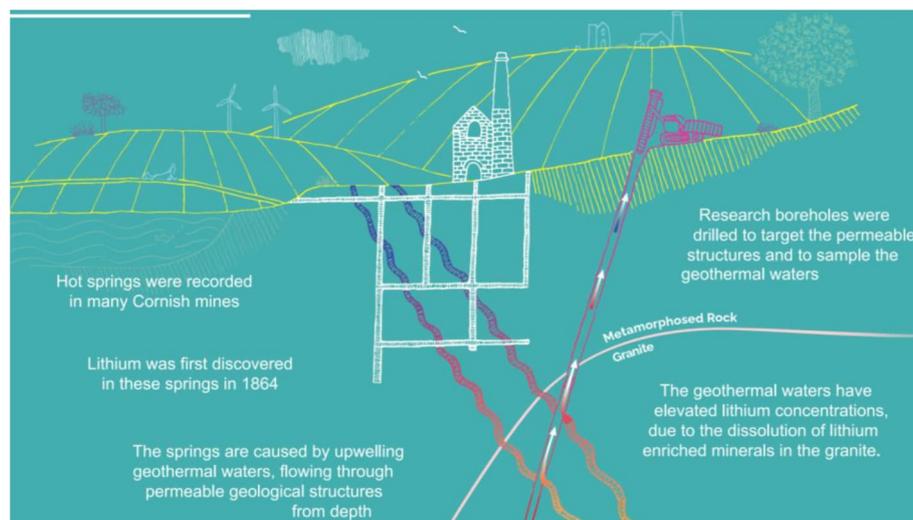


Figure 20. Schéma conceptuel des gîtes d'extraction de chaleur et de lithium en Cornouailles (Cornish Lithium)

### 10.3. Projets de démonstrateurs en cours aux États-Unis

En Californie, le vaste champ géothermique de Salton Sea est appelé la « Lithium Valley », avec une ressource potentielle de 15 Mt de carbonate de lithium et un taux de production de 600 kt/an (Chao, 2020). A titre indicatif, la quantité de lithium qui pourrait être produite par une centrale géothermique de 50 MW fonctionnant avec un débit de saumure de 1320 m<sup>3</sup>/h et une concentration de 400 mg/L de lithium est de l'ordre de 20 kt/an de carbonate de lithium (Ventura et al., 2020).

<sup>28</sup> <https://geothermalengineering.co.uk/united-downs/>

<sup>29</sup> <https://cornishlithium.com/projects/lithium-in-geothermal-waters/geocubed/>

Trois sociétés se partagent actuellement les projets d'exploitation de lithium d'origine géothermique<sup>30</sup> aux Etats-Unis :

- Energy Source Minerals vise à collecter du lithium de qualité batterie à l'échelle commerciale d'ici 2024<sup>31</sup> ; la société s'appuie pour cela sur sa technologie ILiAD (Integrated Lithium Adsorption Desorption) qui combine un adsorbant sélectif du lithium avec un traitement en lit continu dans un environnement en boucle fermée ; cette technologie a déjà fait ses preuves depuis 6 ans avec divers types de saumures ;
- Berkshire Hathaway Energy s'est fixé 2026 comme objectif de débiter sa production commerciale de lithium à partir des puits de l'exploitation géothermique de Berkshire<sup>32</sup> ; elle espère produire jusqu'à 90 kt et des discussions seraient en cours avec le constructeur automobile Tesla ; une unité de démonstration doit être prochainement installée dans une centrale géothermique existante, afin de permettre de traiter 23 m<sup>3</sup>/h de saumure géothermique ; le procédé utilisé sera basé sur un échange d'ions et sera capable d'extraire plus de 85 % du lithium tout en limitant l'utilisation d'eau à moins de 190 m<sup>3</sup>/t de carbonate de lithium ;
- Controlled Thermal Resources (CTR), société australienne en association avec l'entreprise de développement de produits chimiques et pétrochimiques Hargrove, prévoit de produire 50 MW d'énergie renouvelable d'ici fin 2023 puis 20 kt d'hydroxyde de lithium en 2024<sup>33</sup> ; cela a attiré l'attention du constructeur automobile General Motors ; CTR s'est ensuite associé à la société américaine Hargrove Engineers & Constructors pour gérer la construction de ses installations de production de lithium d'origine géothermique sur le site d'Hell's Kitchen ; à terme, ce site aura une capacité de production de 1 100 MW d'énergie renouvelable et environ 300 kt/an de carbonate de lithium.

Dans un autre contexte géologique, la formation calcaire de Smackover qui s'étend en profondeur du Texas jusqu'à la Floride renferme une saumure concentrée<sup>34</sup>, en lien avec un champ pétrolifère. Celle-ci est exploitée depuis plus de 60 ans dans le sud de l'Arkansas pour la récupération du brome et d'autres minéraux. Il ne s'agit pas à proprement parler d'un gisement géothermique, même si cette saumure se trouve à la température de 70°C du fait de la profondeur de la roche réservoir. La société Standard Lithium s'est associée à Lanxess Corporation pour développer le premier projet commercial de production de lithium en Arkansas. Le procédé d'extraction appelé LiSTR (similaire à ILiAD) utilise un matériau adsorbant céramique doté d'un réseau cristallin capable d'extraire sélectivement les ions lithium de la saumure : dans une deuxième étape, le lithium est libéré de l'adsorbant puis converti en hydroxyde de lithium par un processus électrochimique adapté. Les ressources seraient de 4,3 Mt de carbonate de lithium sur les sites de Lanxess et de South-West Arkansas. A l'horizon 2025, la capacité de production prévue serait respectivement de 21 kt/an de carbonate de lithium sur le premier site et de 30 kt/an sur le second où la saumure a une teneur en lithium plus élevée (environ 400 mg/L) et où le réservoir possède de meilleures caractéristiques.

## 10.4. Comptes-rendus d'entretiens et de visites

### 10.4.1. Compte-rendu d'entretien avec Lithium de France

**Date** : 17 mars 2023

**Participants** :

- Clio Bosia, ingénieure géochimiste, Lithium de France
- Jeanne Vidal, géologue - ingénieure réservoir, Lithium de France
- Laurent Nicolas, ingénieur réservoir, Lithium de France
- Sylvaine Pique et Philippe Gombert, Ineris

---

<sup>30</sup> <https://siecledigital.fr/2022/03/15/et-si-la-geothermie-revolutionnait-lindustrie-du-lithium/> (consulté le 27/11/2023)

<sup>31</sup> <https://www.greencarcongress.com/2022/05/20220509-esm.html> (consulté le 27/11/2023)

<sup>32</sup> <https://seekingalpha.com/article/4504924-berkshire-hathaway-warren-buffett-lithium-prospector> (consulté le 27/11/2023)

<sup>33</sup> <https://www.cthermal.com/latest-news/ctr-and-hargrove-join-forces-to-deliver-sustainable-us-lithium-facilities-at-hells-kitchen> (consulté le 27/11/2023)

<sup>34</sup> <https://www.standardlithium.com/projects/arkansas-smackover> (consulté le 27/11/2023)

La filière du lithium géothermique est en plein essor en France et dans le monde. Il existe de nombreux projets qui n'ont pas encore atteint le stade industriel et n'ont pas abouti à une extraction significative de lithium géothermique. Chaque exploitant fait donc face à une « première » et à un important défi.

Un tour d'horizon montre qu'il existe actuellement plusieurs technologies d'extraction qui, principalement développées pour l'exploitation des salars, peuvent être groupées en trois grandes familles :

- adsorption sur des aluminates (voie inorganique) ; les avantages de cette technologie sont la simplicité de sa mise en œuvre, même à des températures élevées, avec l'absence de prétraitement des fluides et un lavage final à l'eau pour la récupération du lithium ;
- échange ionique (voie inorganique) ; cette technologie a un meilleur rendement et produit un éluat plus pur que la précédente mais elle nécessite un pH spécifique (basique) en entrée, un relargage du lithium en milieu acide et finalement une neutralisation de la solution avant son rejet ;
- adsorption liquide-liquide (voie organique) qui semble plus compliquée à mettre en œuvre dans le contexte géothermique car elle nécessite préférentiellement un fluide froid et à pression atmosphérique.

Aujourd'hui, Lithium de France étudie différents procédés de purification et trois voies de conversion :  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  par précipitation,  $\text{LiOH}$  par électrolyse et  $\text{LiOH}$  par réaction de carbonatation. Dans ce cadre, la société est dans une phase de recensement et de collecte des brevets existants. En parallèle, les technologies identifiées sont testées via différents dispositifs expérimentaux, afin d'en évaluer l'efficacité vis-à-vis des ressources et des contraintes opérationnelles envisagées par Lithium de France. Quelle que soit la technologie considérée, la purification de l'éluat se fera soit par carbonatation (précipitation, redissolution, recristallisation) pour obtenir du carbonate de lithium ( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ), soit par voie électrolytique qui donne de l'hydroxyde de lithium ( $\text{LiOH}$ , lequel peut aussi être obtenu par voie indirecte, à partir du carbonate de lithium précipité). Ce sont les deux formes du lithium actuellement commercialisées.

Lithium de France, qui dispose d'un Permis d'Exploitation et de Recherche minière (PER) en Alsace pour la recherche de ressource géothermique depuis le 22 juin 2022, a réalisé une campagne de sismique 3D à l'automne 2022, et s'apprête à déposer une demande d'Autorisation Environnementale en vue de réaliser un premier doublet de puits à partir de fin 2024. De ce fait, la production de lithium géothermique, qui sera adossée à la production d'énergie géothermique, n'est pas attendue avant 2026. Pour l'instant, Lithium de France travaille sur un pilote d'extraction implanté en Norvège avec EQUINOR, société norvégienne d'exploitation de pétrole et de gaz naturel, et de production d'énergie éolienne et solaire.

Sur le plan environnemental, des analyses de cycle de vie ont montré que les technologies sélectionnées ont des bilans carbone significativement différents. La solution avec aluminates semble intéressante en ce qui concerne les effluents résiduels car elle ne consomme que de l'eau, laquelle peut en outre être recyclée au cours du processus de purification et de transformation en produit final. Lithium de France teste actuellement cette technologie, ainsi que d'autres, dans son pilote en cherchant à rester dans les conditions opérationnelles d'une saumure issues d'une centrale géothermique.

#### 10.4.2. Compte-rendu de visite des sites d'extraction et de production de lithium géothermique de Vulcan Energy en Allemagne

**Date** : 19 avril 2023

##### **Participants**

- Alexandre Richard, Business Developer pour la partie française, Vulcan Energy
- Vincent Ledoux-Pédailles, Directeur commercial de Vulcan Ltd
- Hugo Jakomulski, Chargé de mission Sécurité des approvisionnements, DGALN
- Florence Bouchet, Chargée de mission géothermie, forages et stockages, DGPR,
- Emilie Jacquot, Unité Exploitations minières du pôle risques miniers de la DREAL Grand-Est
- Cécile Caron, Chargée de mission Mines et Granulats marins, DGALN
- Sylvaine Pique et Philippe Gombert, Ineris

##### **Généralités**

Le principe est de récupérer de la saumure « refroidie » en sortie de centrale géothermique afin d'en extraire le lithium, puis de renvoyer la saumure délithifiée dans le réservoir géothermique.

La technologie d'extraction fait l'objet de tests depuis 2 ans sur le site des centrales géothermiques de Landau et d'Insheim (cette dernière ayant été acquise fin 2021), et d'une usine d'optimisation actuellement en construction à Landau où Vulcan bénéficie d'un accord exclusif d'utilisation de la saumure géothermique exploitée.

Les travaux initiaux portaient sur l'extraction de lithium à pression atmosphérique. Ils sont encore en cours mais un nouveau procédé de récupération à la pression du gisement (de l'ordre de 17 à 20 bar) et à la température de sortie de centrale géothermique (soit 65-85°C) est testé en parallèle depuis quelques mois à Insheim. La concentration en lithium des saumures brutes extraites est de l'ordre de 180 mg/L soit 2 %. Le rendement de récupération du Lithium atteint 95 %. De ce fait, la concentration de lithium n'est que de 10 mg/L dans les effluents rejetés.

Afin de produire du lithium de manière industrielle, un premier site de conversion a été sécurisé dans la région de Francfort. Il recevra d'ici fin 2025 des éluats de LiCl enrichis à 40 % (en masse) pour les transformer en LiOH solide par électrolyse puis cristallisation. A terme, il y aura deux usines de production de lithium géothermique provenant des sites de Taro (production prévue de 8 kt/an) et surtout de Lionheart (production prévue de 16 kt/an) : la capacité nominale du site de conversion de Francfort sera donc de 24 kt/an pour la phase 1. Pour cela, l'utilisation de 23 puits géothermiques est prévue, dont 4 existent à ce jour. Grâce à des canalisations de 5 km sur le site de Taro et de 16 km sur celui de Lionheart, les saumures d'Insheim et de 4 à 5 autres sites géothermiques (dont les puits sont à construire) seront mises en commun. Comme la température du fluide contenant le lithium enrichi sera inférieure à 85°C (après passage du fluide géothermique dans un échangeur de chaleur), les canalisations pourront être en fibre de verre, matériau inaltérable et plus économique que les alliages métalliques actuels. Les coûts de maintenance devraient donc également être moindres.

Les fonds nécessaires pour réaliser la phase 1 du projet, jusqu'à l'usine industrielle, sont de l'ordre de 1500 M€, dont environ 322 M€ pour l'usine industrielle de Francfort. Il s'agit d'un projet reconnu comme stratégique par BPI France. Il est basé sur un prix de vente, sécurisé avec les clients de Vulcan, de l'ordre de 30 k€/t et d'un coût de production de 4,5 k€/t.

### **Pilote de laboratoire de Karlsruhe**

Ce pilote de laboratoire fonctionne sur de petites colonnes de réactif, alimentées par de la saumure provenant de la centrale géothermique d'Insheim. Cette saumure est utilisée à pression atmosphérique et à une température variant entre 65 et 85°C. Après avoir testé plusieurs résines, l'adsorbant retenu pour ce pilote est une résine organique développée par Vulcan, appelée VULSORB™, ce qui permet de s'affranchir des résines d'origine chinoise ou russe.

### **Pilote d'extraction d'Insheim**

Le pilote d'extraction de lithium d'Insheim est adossé à une centrale géothermique existante de 4,8 MW électriques, à cycle binaire (échangeur de chaleur à isopentane), construite entre 2007 et 2012 pour un coût de 50 M€. Elle extrait de la saumure à 165 °C et environ 22 bar, pompée à 700 m de profondeur au sein d'un puits de production de 3500 m de profondeur qui atteint le contact grès/socle. Les puits de production et d'injection sont distants de 5 m en surface mais de plus de 1 km au fond du fait de la déviation des ouvrages. La saumure refroidie à environ 65°C en sortie de centrale géothermique est normalement réinjectée dans le même réservoir par un double puits de réinjection (side-track) dont la tête est commune mais dont les extrémités aboutissent à quelques dizaines de mètre de distance l'une de l'autre. Il existe par ailleurs un projet de récupération de la chaleur fatale ainsi réinjectée avec un potentiel de production supplémentaire de 10 MW thermiques.

La saumure produite possède une minéralisation de 130 g/L et renferme des gaz dissous sous pression (majoritairement CO<sub>2</sub>, puis CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>). Elle est extraite au débit moyen de 65 L/s (290 m<sup>3</sup>/h) par une pompe alimentée par un moteur de surface et un axe vertical de 700 m de long, centré dans le tubage de production. La centrale fonctionne en moyenne 8 000 h/an. Adossé à cette centrale, le pilote d'extraction de lithium teste deux procédés : l'un à la pression atmosphérique et l'autre à la pression du réservoir soit 22 bar (correspondant en fait à la profondeur du réservoir au niveau de la pompe, la pression en fond de puits étant d'environ 50 bar). Le premier procédé repose sur des colonnes de VULSORB™ d'environ 20 L où l'adsorption se fait en 3 h et la désorption en 1h-1h30. Le produit final est une solution concentrée à 40 % (en masse) de lithium. Le second procédé repose également sur la résine VULSORB™ mais il ne nécessite aucune étape de purification préalable puisque tout se passe à la pression du gisement, sans dégazage et donc sans précipitation.

## Usine d'optimisation de Landau

Cette usine, qui correspond à un stade intermédiaire entre le pilote et l'usine industrielle, est destinée à former les opérateurs dans un environnement à échelle industrielle. Actuellement en cours de construction, elle sera adossée à la centrale géothermique de Landau qui est dimensionnée pour 5 MW électriques mais qui est actuellement bridée à 2-3 MW à cause de la faible capacité du puits de réinjection. L'usine d'extraction de lithium disposera des deux procédés testés (à la pression atmosphérique et à la pression du gisement) mais seul le procédé à la pression du gisement devrait *in fine* être utilisé en production industrielle. Il s'agira de 4 cuves de réactif de 1,5 m<sup>3</sup> chacune, alimentées par un débit unitaire de 5 m<sup>3</sup>/h de saumure refroidie à 65°C : deux cuves serviront à l'adsorption, une à la désorption et une restera en secours. L'opération produira un éluat à environ 1 g/L de lithium à partir d'une saumure à environ 180 mg/L. Cet éluat sera ensuite concentré jusqu'à 40 % (en masse) par osmose inverse puis purifié pour en extraire l'essentiel du calcium et du magnésium par précipitation et le reste, ainsi que le bore, par échange d'ions puis le sodium par cristallisation de NaCl. La production de résidus sera de l'ordre de 200 kg/j à environ 50 % de siccité. L'éluat de LiCl concentré sera produit à raison de 4-5 t/mois, puis transféré (par camions) à l'usine de Francfort qui le transformera par électrolyse en LiOH, lequel sera ensuite cristallisé et commercialisé. Au passage, les chlorures migreront vers l'anode où ils seront transformés en HCl.

*Note : le pilote à pression atmosphérique nécessite un post-traitement plus lourd car il induit un dégazage de la saumure. Cela nécessite une étape de récupération des gaz émis, puis une étape d'augmentation du pH (à la soude) pour précipiter certains métaux parasites (Zn, Fe, Mn, Si sous forme de SiO<sub>2</sub>, Ca sous forme de CaCO<sub>3</sub>). Ces précipités sont ensuite redissous par acidification à l'HCl puis la solution est de nouveau neutralisée à la soude.*

Dans les deux procédés, le rendement de récupération du Lithium atteint 95 % et la concentration en lithium de la saumure réinjectée n'est plus que de 10 ppm.

### 10.4.3. Compte-rendu d'entretiens avec Électricité de Strasbourg et Eramet

**Dates :** 16 juin 2023 avec Électricité de Strasbourg, 29 juin 2023 avec Eramet

#### Participants

- Joanne Jung, responsable de la production d'énergie renouvelable, Électricité de Strasbourg
- Ludovic Donati, Directeur projet lithium, Eramet
- Sylvaine Pique et Philippe Gombert, Ineris

ÉS est un énergéticien alsacien qui existe depuis plus de 120 ans en Alsace avec une puissance totale installée d'énergies renouvelables de 64 MW, produisant 300 GWh/an d'énergie thermique et 80 GWh/an d'électricité. En 2016, ÉS est devenu producteur d'énergies renouvelables (géothermie, biomasse, mini-hydraulique) et possède deux centrales géothermiques en Alsace : Soultz-sous-Forêts (électricité) et Rittershoffen (chaleur).

Eramet et ÉS coopèrent depuis plusieurs années :

- dans le cadre du projet de recherche européen EUGeLi engagé en 2020, une campagne d'essais sur les sites d'ÉS a permis de prouver l'efficacité du procédé d'extraction de lithium d'Eramet sur les saumures géothermiques d'Alsace ;
- le projet RECITAL (Eramet - ÉS) a permis la réalisation d'une première étude de cadrage ;
- Eramet et ÉS ont approfondi leur coopération à travers un protocole d'accord signé fin janvier 2023 pour exploiter, à terme, une capacité d'extraction, de raffinage et de production de lithium géothermique ;
- une phase de PFS (Pre-Feasibility Study) a été démarrée pour 18 mois en avril 2023.

ÉS dispose de plusieurs titres miniers en Alsace du Nord : concession géothermique de Soultz-sous-Forêts (jusqu'en 2040), concession géothermique de Rittershoffen (jusqu'en 2071), PER de Wissembourg (renouvellement), PER Terre d'Énergie (en instruction), et PER Outre-Forêt pour la production de lithium. Attribué en avril 2022, ce dernier PER, d'une superficie de 423 km<sup>2</sup>, englobe tous les autres.

L'objectif est de produire 1800 à 2000 t d'équivalent Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> via plusieurs puits géothermiques sur la base d'une concentration estimées entre 160 à 190 mg/L de lithium. L'un des défis qui se posera est de vérifier la stabilité de cette concentration en conditions d'exploitation. Le futur produit commercialisé

sera du carbonate de lithium, sur la base du procédé actuellement déployé par Eramet, ou éventuellement de l'hydroxyde de lithium : l'étude de faisabilité des deux produits est en cours.

Le partenariat avec ERAMET, qui dispose d'un savoir-faire en extraction de lithium d'un salar argentin, vise à produire au moins 10 kt/an de  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  de qualité batterie à partir de saumure géothermique. Le process de raffinage du lithium se fera à pression atmosphérique avec une nanofiltration suivie d'une osmose inverse, puis de la précipitation du  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ .

Un pilote de démonstration d'extraction directe de lithium devrait être mis en œuvre à partir de fin 2023 sur le site de Rittershoffen : l'Ineris et la DGPR seront alors invités à venir le visiter.

