



arverne
GROUP

Membre d'Arverne Group
entreprise à mission

2gré



*Mise à jour des informations relatives à la demande de Permis
Exclusif de Recherches de Lithium et substances connexes de
La Plaine du Rhin de 2gré
(Anciennement Georhin)*
Version allégée

4.

Mémoire technique

Rédaction du document

Référence interne	Date	Rédacteur	Vérificateur	Approbateur
4_PER de La Plaine du Rhin	19/10/2023	Romain DUHAMEL	Damien BEVILLON	Pierre BROSSOLLET

Diffusion du document

Date	Destinataire	Organisme	Version numérique	Version papier
25/09/2023		DGEC / BRESS	1	0
25/09/2023		DREAL	1	0

www.2gre.fr

Table des matières

1	Préambule	9
2	Inventaire de l'exploitation du lithium et des techniques d'extraction.	11
2.1	Inventaire	11
2.2	Techniques d'extractions	15
2.2.1	Les techniques d'extractions envisagées dans le cas du Fossé rhénan	18
2.2.2	Les ressources mondiales et projets d'extraction associés	21
3	Éléments connexes	23
3.1	Rubidium.....	23
3.2	Césium.....	24
3.3	Strontium	25
3.4	Bore	27
3.5	Manganèse	28
3.6	Zinc.....	29
4	Le programme d'exploration	32
4.1	Choix initiaux des zones sollicitées	32
4.2	Historique de l'exploration sur le PER de la plaine du Rhin	34
4.2.1	Base de données sur le PER de Strasbourg	34
4.2.2	Données de puits et de géophysique.....	34
4.2.3	Acquisitions géophysiques réalisées	36
4.2.4	Synthèse des données géochimiques	38
4.3	Détail des réalisations et connaissances du Projet de Vendenheim.....	39
4.3.1	Finalisation du forage VDH-GT1	39
4.3.2	Finalisation du forage VDH-GT2	40
4.3.3	Synthèse de la ressource minière découverte sur Vendenheim	41
4.3.4	Surveillance microsismique	43
4.4	Sélection du procédé d'extraction du lithium et choix du démonstrateur	46
4.4.1	Travaux concernant l'élément cible principal : le lithium	46
4.4.2	Travaux concernant les éléments connexes	48
4.5	Secteur sud-ouest de l'Eurométropole de Strasbourg : Exemple des Projets d'Eckbolsheim et Hurtigheim.....	48
4.5.1	Localisation du projet de forage géothermique d'Eckbolsheim	48
4.5.2	Localisation du projet de forage géothermique de Hurtigheim	49
4.5.3	Modèle géologique	50
4.5.4	Surveillance microsismique.....	51
4.5.5	Etude de l'aléa sismique sur le secteur ouest du PER	53
4.5.6	Surveillance de la nappe	55

4.6	Réalisation sur la Partie Nord du PER de Strasbourg	56
4.6.1	Projet de faisabilité et d'implantation à proximité de Haguenau	56
4.6.2	Secteur de Bischwiller/Herrlisheim	58
ANNEXES.....		62

Table des figures

Figure 1: Carte officielle au 1/100.000 ^e du PER dit de "La Plaine du Rhin »	10
Figure 2: Marché du lithium en 2001, 2015 et à l'horizon 2025. Source de donnée de l'USGS en LCE (lithium carbonate équivalent où (165 000 t correspond à 30 000 t de lithium équivalent).	12
Figure 3: localisation des principaux sites de productions de minerais de lithium, en opération en 2023 (Source : RFC Ambrian)	13
Figure 4: Ressources, réserves et production de lithium selon l'USGS en 2016-2017.	13
Figure 5: Production et ressources de lithium en 2022 selon l'USGS)	13
Figure 6: Organigramme des composés de lithium et leurs utilisations finales (source ADEME).	14
Figure 7: Projection des ventes de véhicules électriques à l'horizon 2040 (source Bloomberg)	15
Figure 8: Principe de fonctionnement de la centrale de Soultz-Sous-Forêts (geothermie-perspectives.fr, ADEME-BRGM)	16
Figure 9: Exemple de production du lithium à partir de saumures.	17
Figure 10: Schéma de production du carbonate de lithium par Chemetall à partir des saumures du Salar de Atacama et de Silver Peak (adapté d'après Garrett, 2004).	17
Figure 11: Mine d'Orocobre dans les salars sud-américain ou les bassins d'évaporation sont visibles en blanc et bleu turquoise.	18
Figure 12: Représentation schématique des méthodes DLE	19
Figure 13: Schéma du principe de la capture du lithium par échange ionique.	20
Figure 14: Représentation schématique d'un procédé de séparation sur support solide par carrousel.	21
Figure 15: Ampoule de rubidium pur, liquide à température ambiante. Du fait de sa très forte réactivité à l'air, il doit être stocké dans des atmosphère neutre tel que ces ampoules.	24
Figure 16: cristal de Célestite le principal minerai du Strontium.	26
Figure 17: borax, forme cristalline du minerai de bore.	27
Figure 18: sphalerite (blende) principal minerai de Zinc (ici minerai de la mine de Sovetskij Mine, Dal'negorsk, Russie)	30
Figure 19: Contexte Structural du Fossé Rhénan	33
Figure 20: Tracés sismiques existants sur le PER de Strasbourg	35
Figure 21: Lignes sismiques acquises sur le PER de Strasbourg	37
Figure 22: Dispositif d'acquisition sismique	38
Figure 23: Comparaison des concentrations des principaux éléments chimiques dans différentes saumures	39
Figure 24: Architecture finale du forage VDH-GT1 double jambes.	40
Figure 25: Schéma de l'architecture finale du puits VDH-GT2.	41
Figure 26: Maps of Wells data used by Sanjuan & al.2016 and Stober & Bucher (2014)	42
Figure 27: Coupe schématique à travers la vallée nord du Rhin (Schnaebele 1948 ; Breyer 1974 ; Cautru 1985) entre les Vosges et la forêt Noire présentant le chemin emprunté par les eaux hydrothermales (en bleu) à travers les terrains sédimentaires et les failles du socle.	43
Figure 28 : Traffic Light System basé sur la magnitude (en haut) et sur le PGV (en bas).	45
Figure 29: Situation de la parcelle dédiée au projet de Eckbolsheim	49
Figure 30: Situation de la parcelle dédiée au projet de Hurtigheim	50
Figure 31 : Traffic Light System basé sur la magnitude (en haut) et sur le PGV (en bas).	53
Figure 32: L'aléa sismique	54
Figure 33: Schéma de synthèse de la zone de failles sur le site de Vendenheim issu du rapport du comité d'experts du 28 mars 2022.	55
Figure 34 : Localisation des piézomètres constitutifs du réseau de surveillance de la nappe sur le projet d'Eckbolsheim.	55
Figure 35: Vue générale des implantations piézométrique (d'après vue aérienne Google Earth).	56
Figure 36: Schéma structural et thermique à proximité d'Haguenau	57
Figure 37: Potentiel de consommation de chaleur et postes sources à proximité d'Haguenau	58
Figure 38: : Localisation de la faille ciblée pour le doublet géothermique de Vendenheim et zone d'implantation possible pour de futurs clusters géothermiques.	59

Figure 39: Localisation et mise en évidence des lignes sismiques utilisées dans la création du modèle structural GeORG.....	59
Figure 40: a) Carte structurale au toit du socle d'après GeORG, localisations des 2 coupes (AB) et (CD). b) Coupe géologique verticale AB. c) Coupé géologique verticale CD.	61
Figure 41: a) Coupe géologique NW-SE allant de Haguenau jusque Herrlisheim. b) Coupe géologique verticale AB.....	62

1 Préambule

2gré (anciennement Georhin) est engagé depuis 2011 sur le secteur de Strasbourg dans l'exploration de ressources géothermales profondes.

La composition et le volume des fluides géothermaux dans la plaine du Rhin offrent un potentiel d'extraction de métaux et éléments variés considérable ainsi qu'une source d'Energie pour la production d'électricité. Les fluides géothermaux sont les fluides qui voyagent dans la roche au contact duquel ils se chargent et deviennent saturés avec des éléments divers. La présence de ces éléments a souvent été considérée comme un challenge important pour la production géothermale car ils causaient d'importants problèmes de corrosions et de concrétions dans les usines de production d'électricité. Cependant ces éléments peuvent maintenant présenter une opportunité stratégique unique d'extraction de minerais rares à moindre cout par mise en commun de moyen.

Ces techniques de production ne sont pas associées avec des impact environnementaux ou sociaux importants comparé à d'autres procédés miniers, les éléments étant déjà en solution.

2gré souhaite extraire le lithium contenu dans les eaux géothermales profondes et mettre en commun les moyens d'exploration et éventuellement de production et installer des centrales de production de lithium sur les sites d'exploration et/ou de production de géothermie.

Le PER (Permis Exclusif de Recherche) de la plaine du Rhin est situé en Région Grand Est dans le département du Bas Rhin. La superficie totale de la demande du permis couvre 554 km². Au total, 78 communes sont concernées, partiellement ou en totalité par le PER.

Sur ce territoire 2gré possède un PER en cours de deuxième prolongation, le PER de géothermie Haute Température dit de « Strasbourg ». La carte du PER de la plaine du Rhin est visible ci-dessous (Figure 1).

2gré a l'objectif de maîtriser l'extraction et la valorisation des sels de lithium et autres éléments connexes dissous et présents naturellement dans les eaux géothermales profondes du bassin Rhénan.

Cette extraction se fera grâce à des partenariats privilégiés d'entreprises spécialisées dans l'industrie minière tel que Lithium de France.

2gré commercialisera le minerai au travers de sa société sœur experte Lithium de France sous une forme adaptée au procédé d'extraction et en phase avec la demande du marché.

Carte du Permis Exclusif de Recherche de lithium et Connexes dit de la "Plaine du Rhin" au 1/100 000
2gré

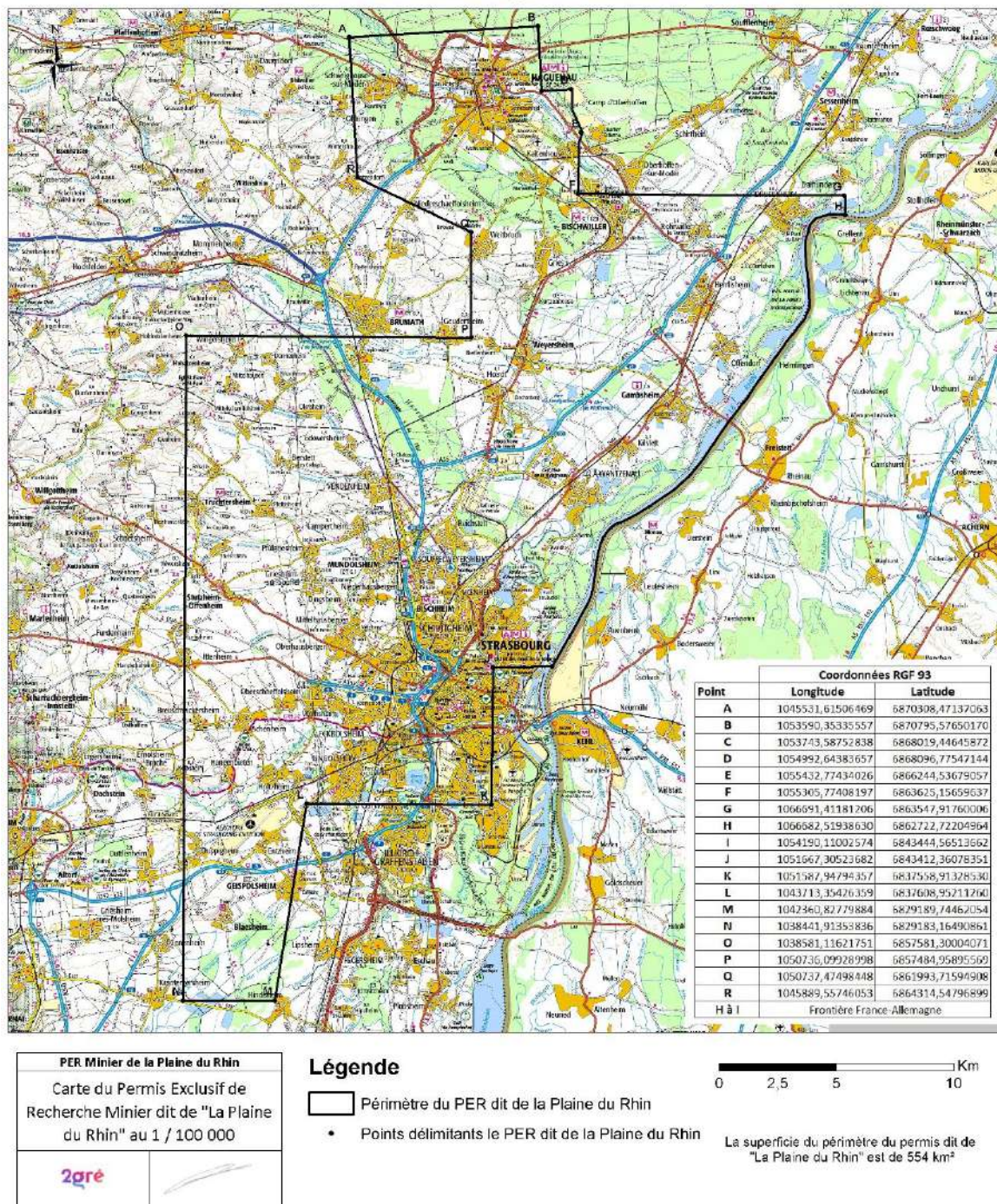


Figure 1: Carte officielle au 1/100.000° du PER dit de "La Plaine du Rhin »

2 Inventaire de l'exploitation du lithium et des techniques d'extraction.

2.1 Inventaire

Le lithium est le troisième élément du tableau de Mendeleïev. C'est également le métal alcalin le plus léger des éléments solides. Il est près de deux fois plus léger que l'eau (densité de 0,534). Il est assez peu abondant dans l'écorce terrestre (20 ppm, comme le niobium) et les océans en contiennent environ 0,18mg/L. Sa température de liquéfaction est de 180°C et celle de fusion est de 1400°C. Sous sa forme pure, le lithium est un métal gris argenté très réactif qui ternit rapidement à l'air.

La première utilisation de cet élément date du 19^{ème} siècle, lorsque des eaux minérales riches en lithium étaient consommées pour leurs propriétés toniques. Puis, il a très vite été utilisé par l'industrie pharmaceutique comme antidépresseur (régulateur d'humeur). Jusqu'au milieu des années 2010, c'est l'industrie du verre et des céramiques qui devient le consommateur majeur de lithium afin de fabriquer des produits légers, chimiquement stables et résistants aux chocs thermiques, suivie des industries de lubrifiants.

Cependant, la consommation pour les batteries est celle qui a connu la plus forte croissance ces 10 dernières années, en particulier pour la mobilité électrique. A tel point qu'en 2020, les 2 tiers de la demande en lithium venaient des fabricants de batteries. En effet, son fort potentiel d'électropositivité (facilité à libérer un électron) et sa faible densité en font un élément de choix pour les piles et batteries d'accumulateurs électrochimiques.

Dans les autres usages du lithium on notera l'électronique, le BTP, la métallurgie, le traitement de l'eau, la teinture, la pyrotechnie, l'aéronautique, sans oublier la production de tritium pour la fusion thermonucléaire, ces usages représentant 20% de production en 2015.

Sa production annuelle est estimée à 45 000 tonnes soit une croissance de 50% par rapport à 2011. Son prix augmente donc logiquement et est en 2018 autour de 7 dollars le kilogramme (5.1 dollars en 2011) mais les écarts sont importants selon les contrats. En effet, la plupart de ces marchés sont de petite taille par rapport aux marchés de métaux non ferreux ; ils ne sont pas organisés, faiblement transparents et l'essentiel des transactions est réalisé de gré à gré. Le prix du Lithium dépend de son type (carbonate de lithium par exemple) et de sa qualité. Le carbonate de lithium qualité batterie s'échangeait entre 40 et 60 dollars le kilo courant 2022.

Les chiffres actualisés dans le cadre de la présente mise à jour montrent une augmentation importante des prix et de la demande et production. Au niveau mondial, selon l'analyse publiée en août 2023 par RFC Ambrian¹ sa production en 2022 est de l'ordre de 700 kt LCE (lithium carbonate équivalent), soit une augmentation de plus de 230% par rapport à 2016 pour répondre à la très forte demande.

Selon les experts des marchés du lithium tels ceux de BMI², la demande est prévue de croître encore fortement dans les années à venir, pour atteindre de l'ordre de 3 Mt LCE en 2030, dont plus de 80% dédiés aux besoins des véhicules électriques.

En France, les travaux préliminaires de l'OFREMI³ présentés en juillet 2023, conduisent à une demande primaire en lithium de l'ordre de 80 Kt LCE autour de 2035 pour les seuls besoins liés à la mobilité électrique. Ci-dessous on peut voir les données du service de recherche minière des Etats Unis (USGS) et une projection de la demande en 2025, telle qu'envisagée en 2018.

¹ Bird, D., 2023. Lithium - Deficits Still on the Horizon but the pace of new supply is picking up, Lithium Commodity Market Report. RFC Ambrian.

² Benchmark Mineral Intelligence, rapport de prévision trimestriel de Q2-2023

³ Observatoire français des ressources minérales pour les filières industrielles (OFREMI) : Etude préliminaire des besoins en matériaux critiques pour la mobilité, juillet 2023

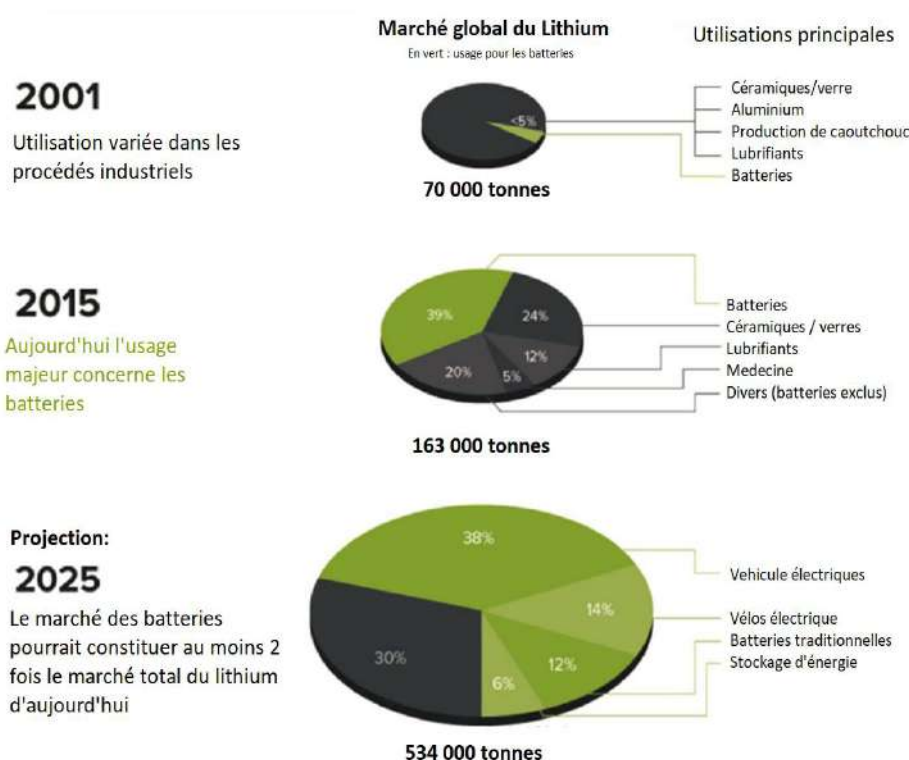


Figure 2: Marché du lithium en 2001, 2015 et à l'horizon 2025. Source de donnée de l'USGS en LCE (lithium carbonate équivalent où (165 000 t correspond à 30 000 t de lithium équivalent).

Avec la vision de 2018, la consommation de lithium est attendue en forte hausse de 15 à 19 % par an dans le secteur des batteries et de 6 à 10 % par an dans celui des alliages Al-Li, d'ici 2020. Elle est au contraire attendue en baisse dans celui de la production d'aluminium (où l'usage du lithium n'est pas indispensable). Dans tous les autres secteurs, la consommation devrait connaître une croissance modérée de 2 à 5 % suivant la croissance globale.

Les concentrations de lithium permettant une exploitation économique sont de deux types majeurs très différents citées ci-dessous.

- Les saumures des "salars", qui sont de grands lacs salés partiellement asséchés que l'on rencontre en particulier dans les hauts plateaux andin et tibétain, qui représentent environ 60 % des ressources mondiales actuellement identifiées en lithium⁴ et assurent en 2022 environ 40% de la production mondiale (généralement sous forme de carbonate de lithium) ;
- les minéraux lithinifères concentrés dans certaines roches telles que les pegmatites et certaines coupoles granitiques, assez largement distribuées dans le monde. Ces gisements représentent environ 26 % des ressources mondiales actuellement identifiées en lithium et couvrent en 2022 environ 60% de la production mondiale.

⁴ Chiffres issus de la fiche résumé sur le lithium publié par l'USGS en janvier 2023



Figure 3: localisation des principaux sites de productions de minerais de lithium, en opération en 2023 (Source : RFC Ambrian)

Le gisement de la plaine du Rhin est légèrement différent en termes de contexte mais se rapproche du premier type cité. Il s'agit en effet d'une saumure dans laquelle le lithium est dissous.

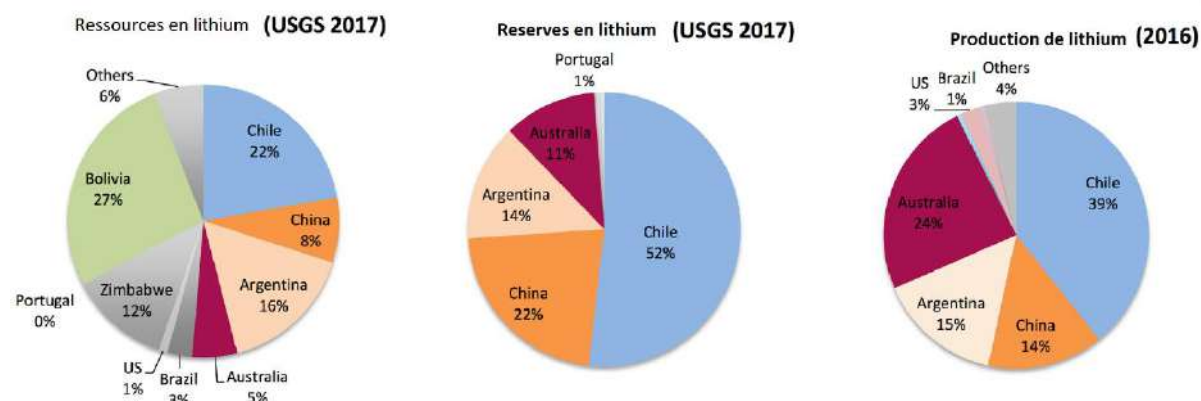


Figure 4: Ressources, réserves et production de lithium selon l'USGS en 2016-2017.

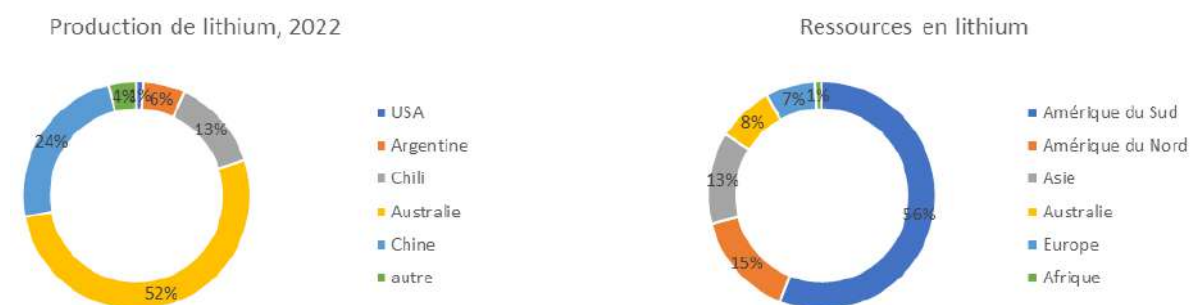


Figure 5: Production et ressources de lithium en 2022 selon l'USGS)

La Bolivie détient la majorité des ressources en lithium (dans le Salar de Uyuni) soit 9 millions de tonnes. Cependant, du fait d'une faible production, le pays n'est pas représenté dans les réserves sur la carte ci-dessus (Figure 5).

Le Chili détient 52% des réserves totales de lithium principalement situées dans le Salar de l'Atacama.

Le gisement de la plaine du Rhin quant à lui consiste également en une saumure (eau fortement salée) dans laquelle le lithium est dissous. Cependant, il se différencie en termes de contexte géologique et aussi par le fait que cette saumure circule à plusieurs kilomètres de profondeur et est extraite directement depuis les gisements en profondeur par des puits, dans des conditions de température, pression, pH et salinité très différentes de celles rencontrées dans les salars. Au vu du potentiel de ce type de ressources (saumures profondes) dans le monde, elles sont de plus en plus souvent classées dans un troisième type (voir par exemple dans l'article d'Elza Dugamin⁵).

Les composés obtenus à partir des minerais de lithium sont utilisables en batteries directement ou dans les autres industries selon les procédés décrits dans la Figure 6:

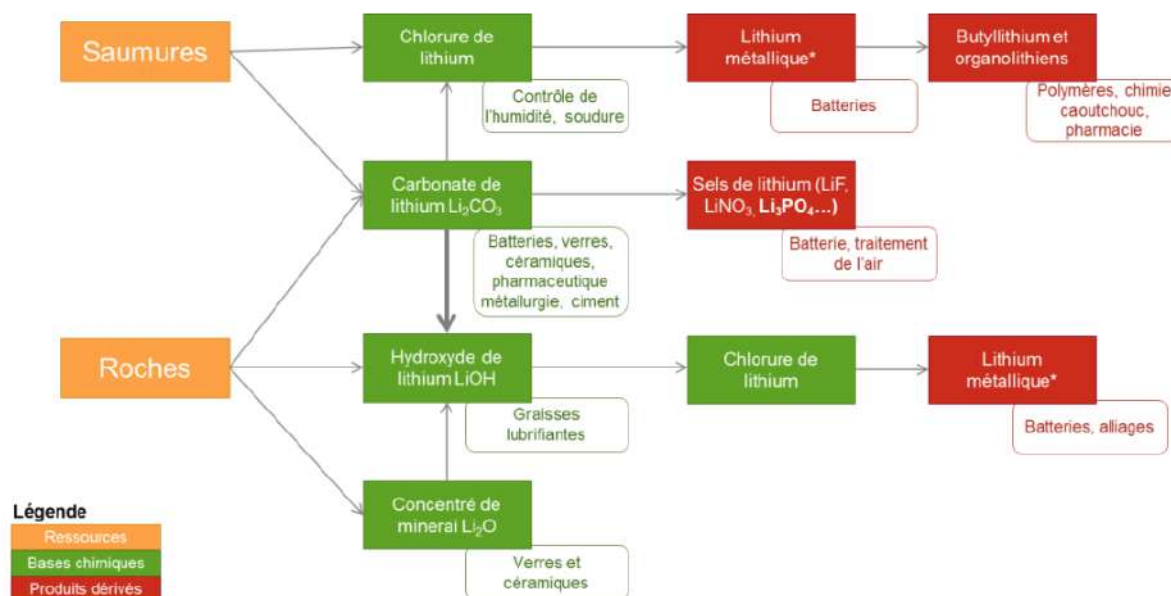


Figure 6: Organigramme des composés de lithium et leurs utilisations finales (source ADEME).

Le lithium est un élément stratégique pour la France et pour l'Europe car il est indispensable à la fabrication de voitures électriques dans le cadre de la transition énergétique (Figure 7).

Une étude détaillée de l'ADEME caractérise le lithium comme un élément critique de par l'électrification du parc automobile. En effet, l'électrification du parc automobile mondial génère une criticité du lithium bien avant l'horizon 2050. Dans de nombreuses régions du monde, l'électrification du secteur des transports est devenue une priorité pour répondre aux objectifs climatiques nationaux et aux problématiques locales de pollution. De fait, l'électrification du parc automobile croît fortement ces dernières années. Il y avait ainsi plus de 3 millions de véhicules électrifiés particuliers en circulation autour de 2015, dont près de 40 % en Chine (AIE, 2018). En 2021, on atteint environ 15 millions de voitures et près de 4 millions de bicyclettes assistées et on estime que la demande atteindra 20 millions dès 2029.

⁵ Dugamin, E.J.M., Richard, A., Cathelineau, M., Boiron, M.-C., Despinois, F., Brisset, A., 2021. Groundwater in sedimentary basins as potential lithium resource: a global prospective study. Sci Rep 11, 21091. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-99912-7>

Cette électrification pourrait toutefois avoir des conséquences importantes, notamment sur les marchés de matières premières tels que le celui du lithium, utilisé dans les batteries Li ion. Le dernier rapport de l'Agence Internationale de l'Energie donne le chiffre de x40 en 2040.

Pourtant, jusqu'à ce jour, l'Europe est quasi entièrement dépendante des importations de lithium, que ce soit sous forme de minerais brut, de sels raffinés ou de batteries Li-ion.

Conscient de ce challenge et des enjeux de souveraineté associés, l'Union Européenne reconnaît le lithium comme matériau critique depuis 2020 et a lancé le 'CRM act' européen pour soutenir toutes les initiatives visant à réduire la dépendance européenne sur tous les maillons de la chaîne, y compris l'exploration et la mise en production de ressources minières alternatives.

En réponse au déploiement massif de la technologie des batteries Li-ion, des investissements dans le secteur minier ont permis la multiplication par 4 des réserves de lithium mondiales entre 2005 et 2017. A long terme, le risque d'approvisionnement d'un point de vue géologique paraît donc limité mais des tensions pourront apparaître pendant quelques années.

Les dynamiques d'équilibre à long terme sur les marchés de matières premières nous apprennent que l'absence de criticité géologique des ressources ne permet pas d'occulter différentes formes de vulnérabilités, qu'elles soient économiques, industrielles, géopolitiques ou environnementales. Parmi elles, la compétition entre les acteurs apparaît toute relative, malgré l'entrée de nouvelles entreprises sur le marché. Dès lors, la structure industrielle de la filière tend à montrer une criticité économique possible, en raison du faible nombre d'acteurs et de leurs positionnements oligopolistiques. Les stratégies nationales, dans le triangle du lithium, restent également soumises à de fortes incertitudes entre ouverture économique et mise en place de politiques commerciales agressives.

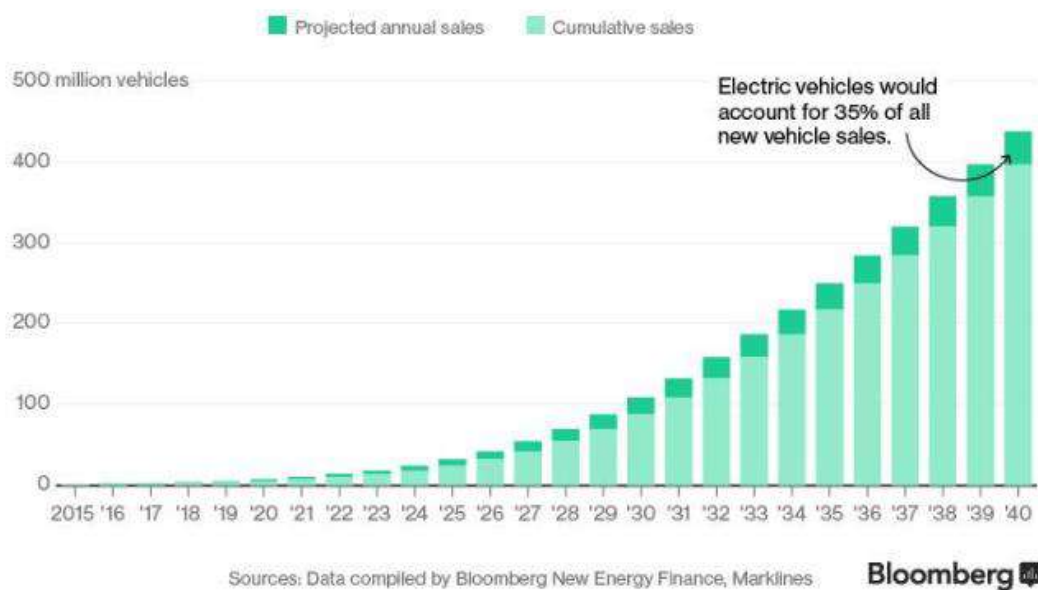


Figure 7: Projection des ventes de véhicules électriques à l'horizon 2040 (source Bloomberg).

2.2 Techniques d'extractions

Un fluide géothermique extrait de grandes profondeurs et particulièrement d'un milieu cristallin est généralement riche en éléments dissous.

Dans le cadre de la présente demande de PER minier « Lithium et éléments connexes » dit « La Plaine du Rhin », la ressource a été prouvée et confirmée par l'analyse géochimique de fluide géothermal issu des forages géothermiques VDH-GT1 et VDH-GT2 menée par Georhin.

On parle dans le cadre de ce projet de géothermie EGS pour Enhanced Geothermal System. Le terme "enhanced" fait référence à la nécessité de stimuler le milieu pour en augmenter la perméabilité. En effet, la structure du réservoir présente une hétérogénéité des circulations de fluide qui limite, dans les conditions naturelles, l'injectivité et la productivité initiales des puits, globalement inférieures à celles nécessaires pour une exploitation économique.

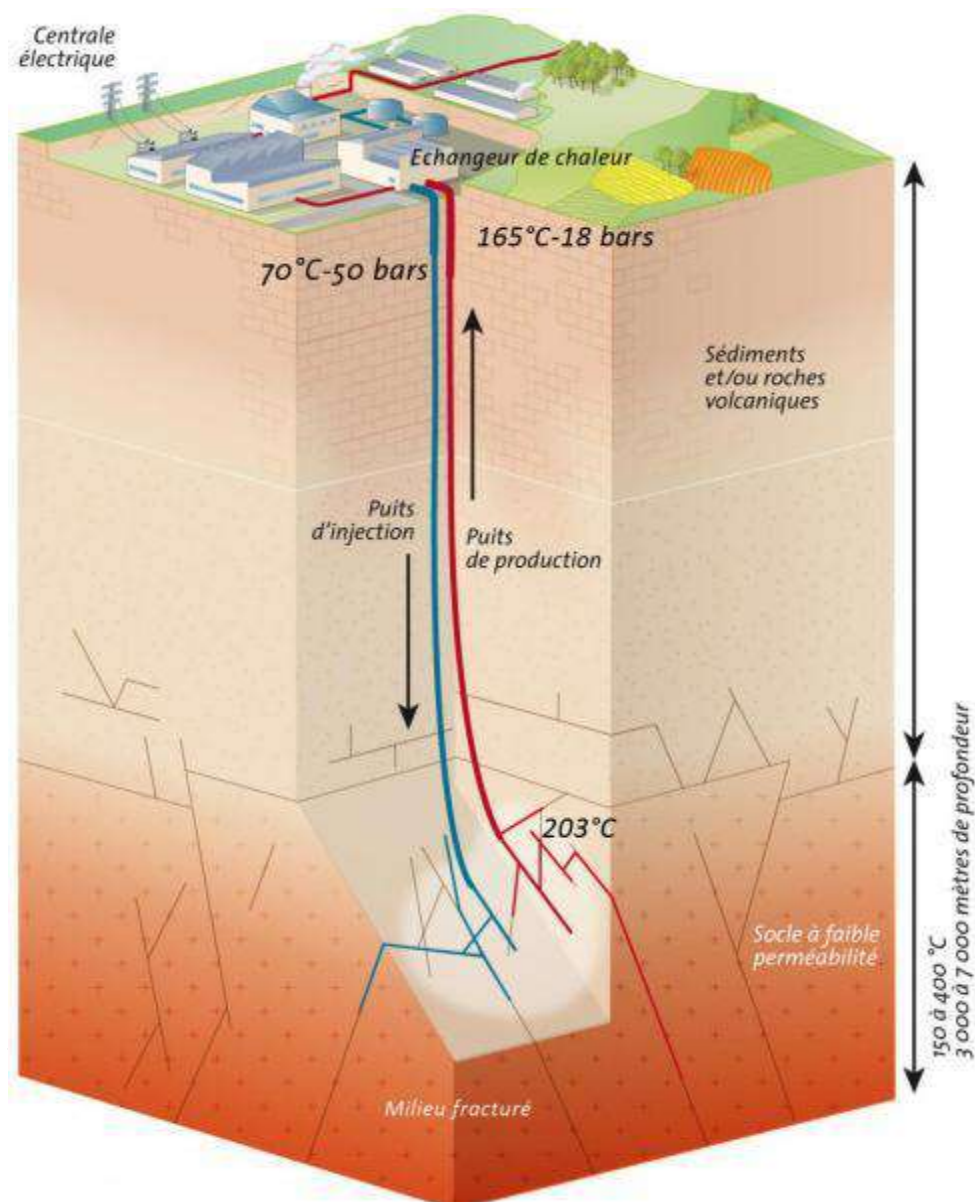


Figure 8 : Principe de fonctionnement de la centrale de Soultz-Sous-Forêts (geothermie-perspectives.fr, ADEME-BRGM)

L'extraction du lithium à partir des eaux géothermales n'est pas nouvelle, les projets géothermiques de Salton Sea (USA) ou certain projet néo-zélandais s'y intéressent. Ils utilisent les techniques présentées ci-dessous. D'abord la concentration par ultra filtration, puis dans le cas des salars, grâce à la localisation dans des milieux désertiques ou à faible pluviométrie et où l'ensoleillement est fort, les saumures sont enrichies par

évaporation successive jusqu'à obtenir des concentrations suffisantes sous la forme de précipités solides de sels de lithium.

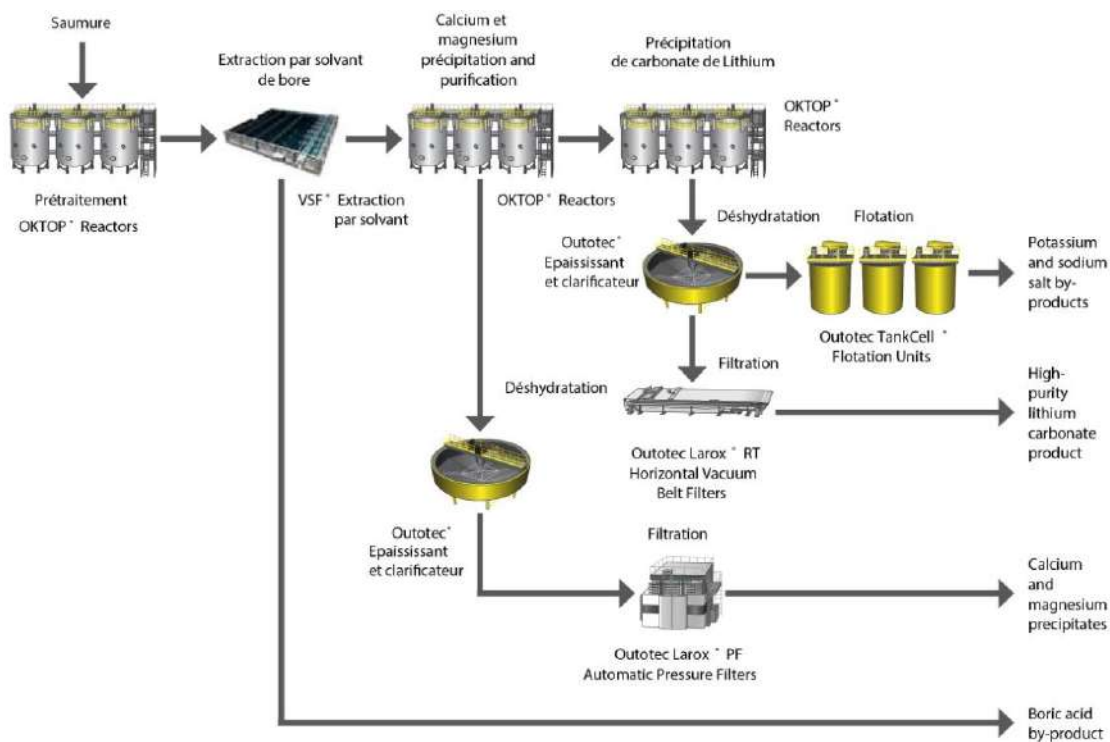


Figure 9: Exemple de production du lithium à partir de saumures.

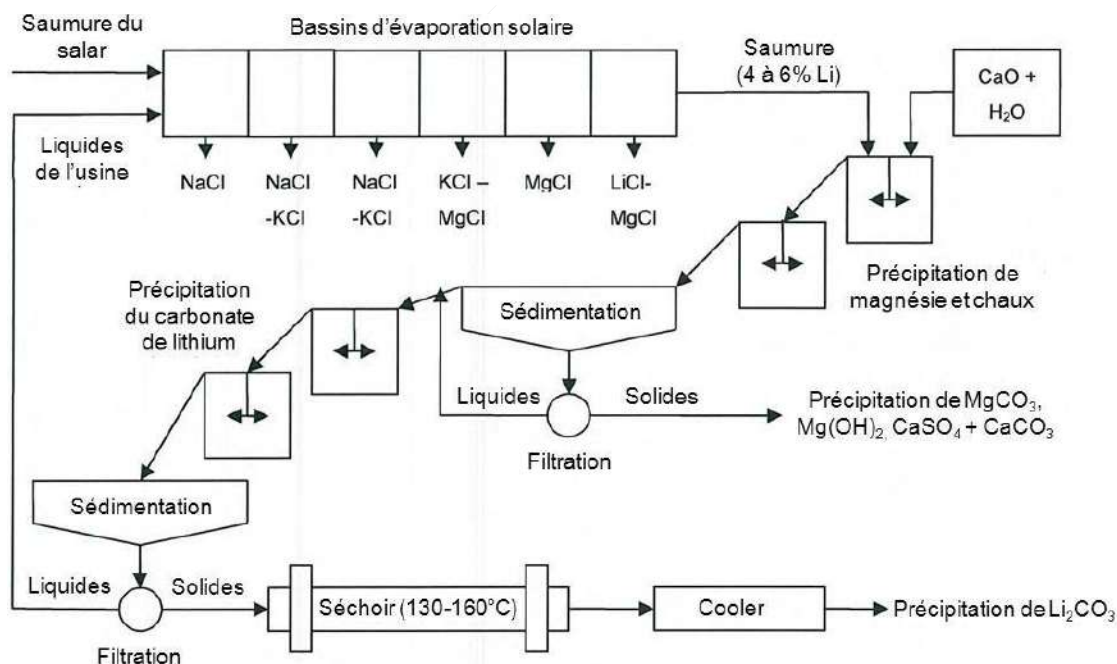


Figure 10: Schéma de production du carbonate de lithium par Chemetall à partir des saumures du Salar de Atacama et de Silver Peak (adapté d'après Garrett, 2004).



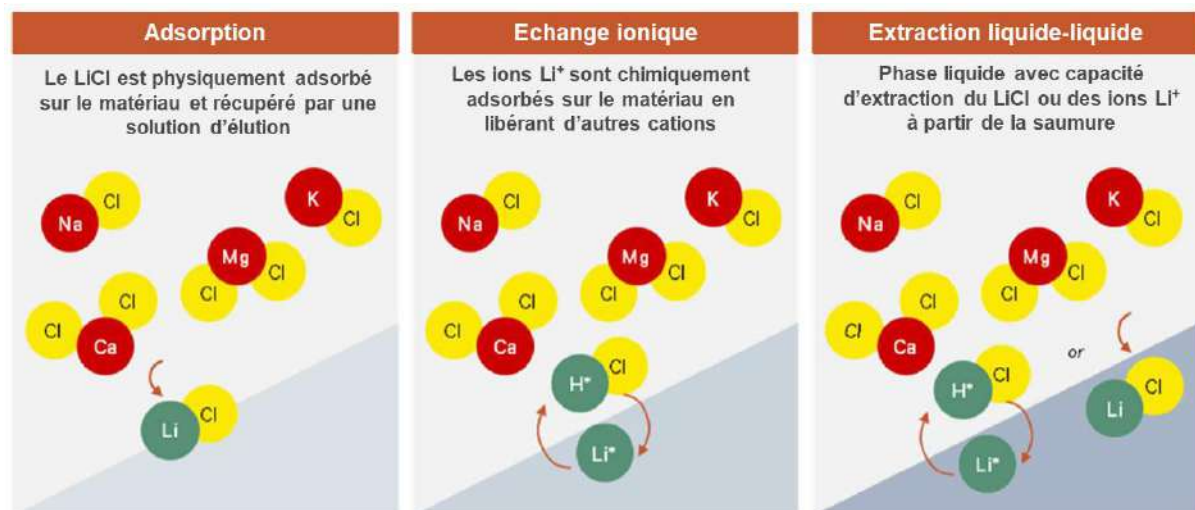
Figure 11: Mine d'Orocobre dans les salars sud-américain où les bassins d'évaporation sont visibles en blanc et bleu turquoise.

2.2.1 Les techniques d'extractions envisagées dans le cas du Fossé rhénan

Les saumures géothermales sont pompées du sous-sol par un puits de production pour l'utilisation de l'énergie thermique et sont ensuite réinjectées dans le réservoir par un puits d'injection. La réinjection des fluides permet au réservoir de maintenir un régime de pression stable, et donc d'assurer le débit de production et la stabilité des formations géologiques. Il est donc nécessaire d'extraire le lithium sans pertes importantes d'eau et avec des changements limités des propriétés physico-chimiques de la saumure appauvrie, une condition que l'extraction conventionnelle du lithium de la saumure par précipitation ne satisfait pas (Meshram et al. 2014). Ainsi, il est nécessaire de recourir à des techniques d'extraction directe du lithium (communément appelées DLE, Direct Lithium Extraction) qui permettent de récupérer le lithium rapidement, plus efficacement et sans modification significative ni du volume, ni de la composition de la saumure traitée.

Les techniques de DLE ont été développées depuis des décennies pour améliorer le procédé d'extraction lent et à forte empreinte environnementale dans les bassins d'évaporation et augmenter la rentabilité et la durabilité des opérations existantes (Livent 2020). Cette technologie débloque également des ressources qui ne seraient pas accessibles avec les techniques d'évaporation classiques. Toutefois, le faible intérêt économique et le relâchement des restrictions environnementales dans les pays riches en lithium n'avaient pas encouragé l'utilisation de ces techniques jusqu'ici. Cette tendance s'inverse avec l'augmentation du prix du lithium qui a rendu cette méthode d'extraction économiquement viable. Ces dernières années, de nombreuses sociétés minières et start-ups se sont lancées dans la course au développement et à l'amélioration des technologies de DLE qui peuvent garantir une extraction efficace avec une faible utilisation d'eau et une faible empreinte de CO₂, réduisant l'impact environnemental de la production de lithium (Grant

2020b). Ainsi de nombreuses recherches ont été menées pour développer des techniques d'extraction directe du lithium en améliorant le rendement de récupération du lithium, la sélectivité et la durabilité des matériaux extractants. Stringfellow & Dobson (2021) ont publié une revue de la littérature exhaustive qui décrit l'état de l'art actuel et les avancées technologiques de l'extraction du lithium des saumures géothermales. En résumé, les techniques les plus avancées sur le plan technologique sont l'adsorption sur un matériau solide inorganique, soit par adsorption physique, soit par échange d'ions, et l'extraction liquide-liquide (Warren 2021).



Source: Jade Cove Partners, National Renewable Energy Laboratory (NREL)

Figure 12: Représentation schématique des méthodes DLE

L'adsorption sur un solide est sans aucun doute la technique la plus avancée et est étudiée par la plupart des développeurs de technologies de DLE. L'adsorption sur des adsorbants à base d'alumine est utilisée depuis plus de 20 ans par l'entreprise Livent dans les salars d'Argentine (Livent 2020). Cela donne une idée de la viabilité commerciale d'une telle technologie pour l'extraction du lithium à partir d'une saumure.

Bien que les saumures géothermales imposent plus de contraintes opérationnelles que les salars, comme une concentration en lithium plus faible et des débits continus importants à une température plus élevée dictés par les paramètres opérationnels des centrales géothermiques, les adsorbants solides ont montré une capture acceptable du lithium permettant de récupérer une partie du lithium contenu dans les saumures dans un procédé à flux continu (Li et al. 2018). Les matériaux échangeurs d'ions d'autre part, le plus souvent des oxydes de manganèse de lithium, qui sont capables de capter les ions Li^+ tout en libérant des ions H^+ comme illustré sur la Figure 13, ont montré une capacité d'extraction de lithium plus élevée que les adsorbants à base d'alumine et sont de plus en plus étudiés comme une option viable. Cependant, ce type de matériaux nécessite généralement un changement de pH entre les étapes d'adsorption et de désorption. Un acide est donc utilisé pour récupérer le lithium dans l'étape d'élution, ce qui rend ces matériaux plus enclins à la dissolution, réduisant ainsi leur stabilité au cours du temps. De plus, la modification du pH pour l'extraction du lithium peut également représenter une complication supplémentaire pour la gestion de la saumure.

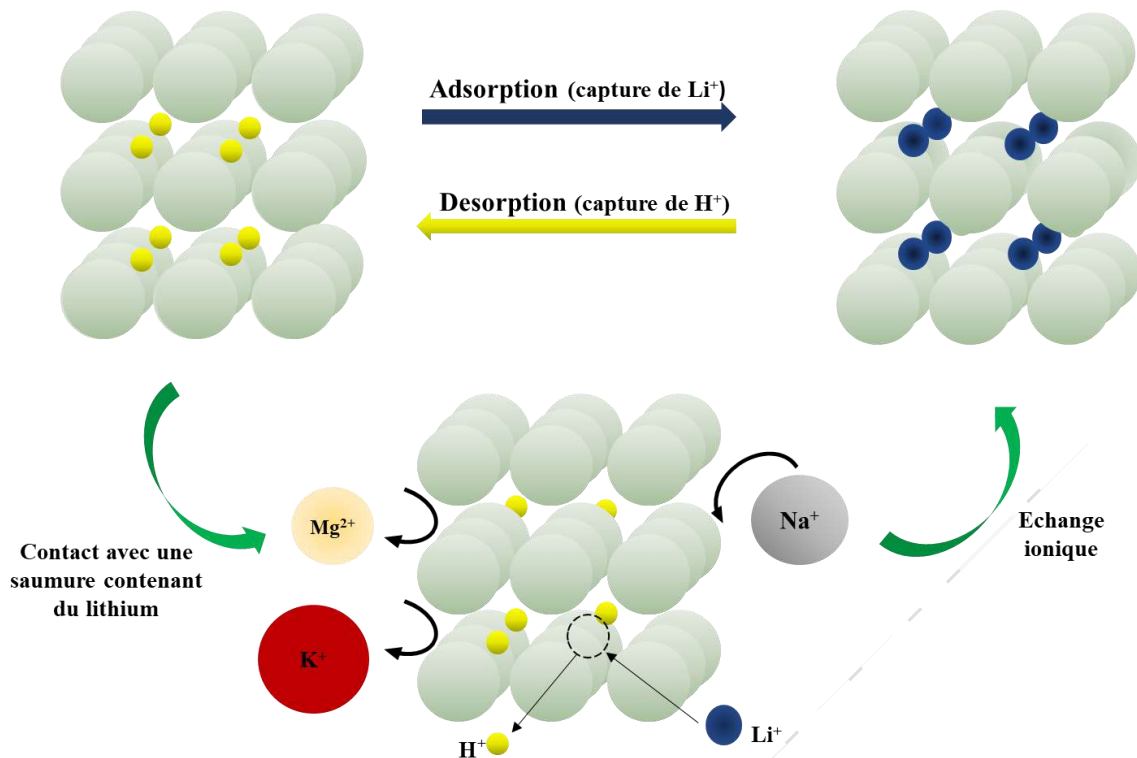


Figure 13: Schéma du principe de la capture du lithium par échange ionique

Les adsorbants solides sont souvent dispersés dans une matrice organique ou inorganique pour obtenir des billes de plus grande taille compatibles avec les colonnes à lit fixe, qui peuvent être placées en parallèle ou dans une disposition de type carrousel. En général, la colonne est traversée par une saumure jusqu'à ce que l'adsorbant soit saturé en lithium. Ensuite, la saumure est dirigée vers la colonne suivante et la colonne saturée passe en élution et régénération de l'adsorbant pour être prête pour le prochain cycle d'adsorption, comme l'illustre la Figure 14.

L'extraction liquide-liquide a également été développée par quelques entreprises pour la récupération du lithium à partir de saumures. Bien que cette technique présente certaines difficultés inhérentes comme la faible sélectivité et la solubilité des solvants dans la saumure, ce type d'extraction présente l'avantage de simplifier le procédé en continu à travers la colonne d'extraction sans avoir à basculer d'un réacteur à l'autre.

D'autres technologies comme la séparation électrochimique (Zhou et al. 2021) et les membranes supportées (Lu et al. 2018) sont des techniques prometteuses qui fonctionnent bien à petite échelle. Il n'est pas encore certain pour l'instant qu'une mise à l'échelle industrielle de ces procédés d'extraction soit possible dans les années à venir (Stringfellow & Dobson 2021).

De manière générale, le procédé d'extraction adapté doit permettre d'extraire le lithium des saumures géothermales tout en exploitant la ressource thermique. Ainsi, l'unité d'extraction du lithium serait installée en aval de la centrale géothermique, même si cette conception pourrait être remise en cause par de nouveaux progrès dans le futur. Ce type de procédé nécessite donc le développement de matériaux aux propriétés très spécifiques afin de pouvoir extraire sélectivement le lithium des eaux très salées, tout en respectant les caractéristiques opérationnelles imposées par le site. Une fois le lithium capté par le matériau, il doit pouvoir être libéré assez facilement pour récupérer la totalité du lithium extrait et régénérer l'adsorbant. Par conséquent, ce matériau doit présenter une bonne résistance chimique et mécanique aux conditions géothermales pour supporter les cycles de sorption/désorption et ainsi augmenter sa durée de vie.

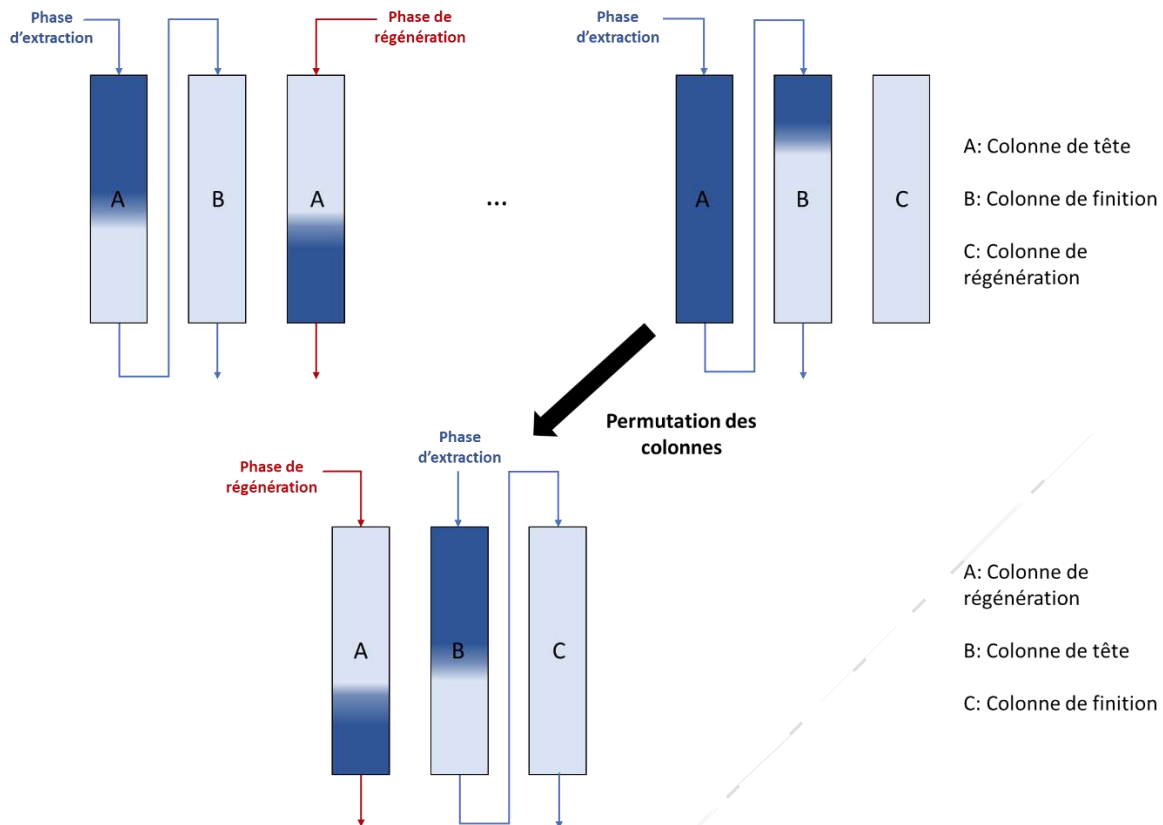


Figure 14: Représentation schématique d'un procédé de séparation sur support solide par carousel

2.2.2 Les ressources mondiales et projets d'extraction associés

Dans cette partie, seront décrits les principaux procédés de DLE, qui sont conçus ou peuvent être adaptés au contexte géothermique. Comme les informations relatives aux procédés lui-même sont souvent confidentielles, les informations ci-après sont récoltées à partir de la base de données des brevets disponibles. Ce n'est pas une liste exhaustive de tous les procédés brevetés ou projets d'extraction du lithium, et les descriptions sont uniquement destinées à donner une idée générale du contenu de ces brevets et ne sont pas des exemples limitatifs de leur portée.

Plusieurs des procédés actuels sont développés pour répondre aux défis et aux exigences de l'extraction du lithium des saumures géothermales et pétrolières en Amérique du Nord. Plusieurs entreprises canadiennes ont participé au développement des technologies DLE afin de valoriser les nombreuses ressources en saumure des champs pétrolières du pays. Parmi les plus connues, on cite E3 Lithium, qui exploite le projet Clearwater d'extraction de lithium de l'aquifère Leduc en Alberta pour produire de l'hydroxyde de lithium à l'aide de son adsorbant exclusif (E3 Lithium 2022). La société a déposé une demande de brevet divulguant une méthode de synthèse de compositions des échangeurs d'ions de formule $\text{Li}_{1.3-1.6}\text{Mn}_{1.6-1.7}\text{O}_4$. Les tests par lots pour l'adsorbant montrent des performances d'extraction élevées et une meilleure stabilité lorsque le persulfate d'ammonium est utilisé comme éluant par rapport à l'acide sulfurique (Safarimohsenabad & Alessi 2021).

Summit Nanotech, un fournisseur de technologie de DLE basé à Calgary, possède une demande de brevet qui, au contraire, ne divulgue pas le type d'adsorbant. Elle détaille plutôt l'intégralité du procédé allant de l'extraction directe du lithium et des étapes de purification post-DLE jusqu'au produit final. L'invention donne une image complète d'un procédé continu qui peut être appliqué au contexte géothermique (Gorman et al. 2020). Purlucid Treatment Solutions, une autre entreprise en Alberta, a déposé une demande de brevet concernant un procédé de récupération du lithium dans les saumures des champs pétrolières. L'adsorbant serait, de préférence, de l'oxyde de titane incorporé dans une matrice de polyacrylamide pour des applications à des températures $<100^\circ\text{C}$. Une matrice de zéolite ou d'aérogel est proposée pour une application à des

températures plus élevées (Meachern et al. 2020). Un procédé comparable est proposé par Prairie Lithium Corp. dans sa demande de brevet pour l'extraction du lithium en utilisant un adsorbant solide, qui peut être un oxyde de manganèse, sous une forme particulière non liée pour maximiser l'absorption. Après avoir mis en contact la saumure avec l'adsorbant, une boue riche en lithium peut être récupérée par filtration, lavée et éluée sur le même filtre ou déplacée vers différents réacteurs (Ireland 2021). L'entreprise vise à extraire le lithium du bassin de Williston au Saskatchewan au Canada. Ce procédé semi-batch est également préconisé dans la demande de brevet de Standard Lithium Ltd. pour la récupération du lithium en utilisant des particules d'oxyde de titane ou d'oxyde de niobium. Ces particules peuvent avoir une taille comprise entre 0,4 et 40 μm , ce qui permet de les récupérer par filtration à partir de la saumure appauvrie sous forme de boue. L'éluion peut être réalisée ensuite à l'aide d'acide chlorhydrique ou sulfurique à un pH compris entre 1 et 3 (Brown 2021). Standard Lithium opère une usine de démonstration (LiSTR) dans l'usine de production de brome existante de Lanxess à partir de la saumure de Smackover en Arkansas. Le procédé LiSTR est censé récupérer 90% du lithium de la saumure, ce qui permet une production estimée à 20 900 tonnes par an de LCE.

Un autre projet notable aux États-Unis est exploité par l'entreprise EnergySource Minerals. Le projet ATLiS d'extraction de lithium géothermal de la zone de ressources géothermiques de Salton Sea utilise leur technologie propriétaire d'adsorption-désorption intégrée du lithium ("LiAD™"). Le projet est estimé d'avoir une capacité de production de 16 500 tonnes LCE par an d'ici 2024 (Stringfellow & Dobson 2021). Le brevet connexe décrit le procédé complet à partir de l'élimination des impuretés, l'extraction directe du lithium et les étapes de purification pour arriver au produit final. Les étapes d'extraction sont décrites comme un échange d'ions à contre-courant utilisant des adsorbants à base d'aluminates (Featherstone et al. 2020). Lilac solutions Inc, une entreprise américaine, a publié plusieurs brevets autour de l'extraction du lithium en utilisant un oxyde métallique échangeur d'ions.

L'innovation de cette technologie brevetée est la couche de revêtement qui est ajoutée pour empêcher la lixiviation de l'adsorbant pendant l'éluion par les acides. Un exemple non limitatif d'adsorbant échangeur d'ions donné dans le brevet est la formule $\text{Li}_4\text{M}_5\text{O}_{12}$ revêtue d'oxyde de zirconium et dispersée dans une matrice polymère (Snydacker 2020). Les entreprises Lake Resources et Controlled thermal Resources ont toutes deux annoncé l'utilisation de la technologie DLE de Lilac solutions pour leurs opérations respectives en Argentine (Lake Resources 2021) et en Californie. Une autre modification notable des composites adsorbants est conçue par SRI international qui revendique un procédé d'extraction du lithium utilisant le même type d'oxyde de lithium-manganèse échangeur d'ions dispersé dans une matrice polymère imprégnée de lithium. L'imprégnation au lithium favoriserait la diffusion du lithium dans le milieu poreux, augmentant ainsi l'absorption et la sélectivité. Il convient également de mentionner que la demande de brevet suggère une éluion à l'aide de dioxyde de carbone. Ce procédé pourrait être intéressant pour obtenir une solution de carbonate de lithium directement lors de l'étape d'éluion (Hornbostel et al. 2019). Cette technologie est testée à l'échelle pilote par le projet de Materials Research financé par la California Energy Commission (Stringfellow & Dobson 2021).

Parmi les autres procédés brevetés à base d'adsorbants inorganiques figure celui d'Albemarle Corporation. Ce grand fournisseur de lithium, qui exploite actuellement des bassins d'évaporation au Chili et aux États-Unis (Albemarle 2021), détient un brevet revendiquant l'utilisation d'alumine hydratée intercalée de LiCl comme adsorbant (Cheng et al. 2020). La société n'a pas annoncé son intention d'utiliser cette technologie DLE pour sa propre extraction de lithium à une échelle commerciale dans un avenir proche. D'autre part, Livent (2020) a utilisé son propre procédé de DLE qui est basé sur une propriété intellectuelle adaptée de Dow Chemical (Grant 2020a). La technologie d'extraction du lithium brevetée par cette dernière est liée à une structure microcristalline $\text{LiOH} \cdot 2\text{Al}(\text{OH})_3$ en suspension dans une résine microporeuse à base de polystyrène échangeuse d'anions (Lee & Bauman 1982).

Tenova Advanced Technologies propose une approche différente en utilisant un procédé d'extraction liquide-liquide (LiSX™) avec un solvant commercial (CYANEX 936 de Solvay S.A.). Pour contrer la faible sélectivité du solvant, la saumure est d'abord prétraitee pour éliminer les cations divalents à l'aide de leur procédé membranaire de nanofiltration LiP™ (Lipp 202; Lipp 2020). Schlumberger détient une demande de brevet qui décrit un procédé compatible de récupération du lithium en plusieurs étapes qui peut couvrir, sans

s'y limiter, l'élimination des ions divalents à l'aide d'une résine et la capture du lithium par un extractant solide ou liquide (Jariwala & Sams 2021).

Quant aux technologies DLE développées en Europe, on peut citer celle d'Eramet, une société minière française qui opère l'extraction du lithium dans les salars d'Argentine. Eramet détient un brevet relatif à la synthèse de matériaux à base d'aluminate pour l'adsorption du lithium. Il décrit un nouveau procédé de préparation d'un matériau solide cristallin de formule $(\text{LiCl})_2\text{Al}_x(\text{OH})_3\text{nH}_2\text{O}$ (avec n étant compris entre 0,01 et 10, x étant compris entre 0,4 et 1), de préférence mis sous forme d'extrudés (Boualleg et al. 2018). Geolith, qui est un fabricant de DLE basé en France, promeut sa technologie Li-Capt® qui consiste en des fibres imprégnées par tamisage ionique enroulées dans des cartouches. Ce procédé permet de capter jusqu'à 95% à partir de la saumure pour un temps de contact de 15 minutes selon les annonces de l'entreprise. La société a également déposé une demande de brevet qui concerne un matériau composite comprenant des microfibres polymères et des particules adsorbantes de lithium à base de titanates (Gros et al. 2022).

En outre, une technologie basée sur des extractants non-solides est en cours de développement par Adionics, un fournisseur de technologie de dessalement de l'eau. Leur procédé exclusif d'extraction liquide-liquide permettrait d'extraire sélectivement le chlorure de lithium (LiCl) de la saumure par un changement de température et sans ajout de produits chimiques supplémentaires. La société détient par ailleurs des demandes de brevet décrivant un procédé innovant de dessalement d'eau de mer par extraction liquide-liquide utilisant un solvant hydrophobe régénéré par la température. Le liquide organique contient des molécules extractantes pour les espèces cationiques et anioniques capables d'éliminer les sels de l'eau qui pourraient être réadaptés pour la récupération du lithium (De Souza et al 2021).

3 Eléments connexes

Plusieurs éléments connexes sont demandés dans le PER de mines de la Plaine du Rhin, il s'agit des métaux alcalins rubidium, césium et strontium, d'un métalloïde – le bore et enfin des métaux de transition que sont le manganèse et le zinc.

Ils sont présentés dans la partie suivante.

3.1 Rubidium

Le rubidium est un élément chimique de la famille des métaux alcalins. Le rubidium comme tous les métaux alcalins, est très réactif notamment au contact de l'air (Figure 15). Le rubidium possède deux isotopes : l'isotope stable (85) qui est présent à 72% et le rubidium 87 présent à 28% sur terre et légèrement radioactif avec une demi-vie de 49 milliards d'année, soit 3 fois plus long que l'âge estimé de l'univers.

Le rubidium est le 23^{ème} élément le plus courant dans la croûte terrestre, soit à peu près aussi abondant que le zinc. Il est habituellement contenu dans des minéraux tel que la leucite, la pollucite ou la carnallite qui en contiennent 1%, mais c'est la Lépidolite qui en contient entre 0,3 et 3,5% qui est le minerai commercial du rubidium. L'eau de mer en contient en moyenne 125µg/L.

Le rubidium est appelé « élément incompatible » c'est-à-dire que pendant la cristallisation d'un magma, il est concentré avec des éléments plus lourds équivalents au césium dans la phase liquide et va donc cristalliser en dernier. Pour cette raison, le césium et le rubidium sont concentrés dans la zone de pegmatite par ce processus d'enrichissement. Ainsi les deux sources principales commercialement utilisées pour la production du rubidium sont le minerai de pollucite de Bernice Lake au Canada et le minerai de rumicine trouvé sur l'île italienne d'Elbe qui a une concentration de 17,5% de rubidium. Ces deux minerais sont aussi des sources de césium.

Si le rubidium est plus abondant dans la croûte terrestre que le césium, le nombre d'applications limitées et l'absence d'un minerai riche en rubidium limite la production entre 2 et 4 tonnes par an. Pour cet élément les prix oscillent entre 5000 et 12000 dollars par kilogramme. Le marché du rubidium est très petit et il n'y a pas

d'échange de ce métal et donc pas de prix de marché. Le prix de ce métal comme celui du césium est très stable et est autour de 50 dollars par 100 grammes de rubidium pur en moyenne (5000 dollars par kilo).



Figure 15: Ampoule de rubidium pur, liquide à température ambiante. Du fait de sa très forte réactivité à l'air, il doit être stocké dans des atmosphères neutres tel que ces ampoules.

L'alliage de césium et de rubidium est utilisé dans le domaine photovoltaïque. Certains verres de sécurité contiennent aussi du rubidium. Une fraction purifiée de ^{87}Rb peut aussi être employée par des horloges atomiques. Dans les tubes cathodiques, le rubidium est un capteur de gaz. Des feux d'artifice violets utilisent le rubidium pour obtenir cette couleur.

D'autres applications peuvent être mentionnées comme le refroidissement de laser par la vaporisation de rubidium 87, ou encore l'utilisation de rubidium 82 pour la tomographie à émission de positron. Le rubidium partage beaucoup de propriétés avec l'élément Césium, et ils sont souvent interchangeables pour certaines applications.

3.2 Césium

Le césium est un métal doux, souvent liquide à température ambiante, en raison de son point de fusion relativement bas (28,5°C). Il fut découvert en 1860 par R. Bunsen et G.R. Kirchhoff à Heidelberg, Allemagne. C'est le métal le moins dur, et le plus réactif. Lorsqu'il est plongé dans l'eau, il explose. Lorsqu'il est exposé à l'air, il s'enflamme spontanément.

De même que d'autres métaux de la famille des alcalins, le césium est préparé par électrolyse des haloïdes en fusion mais, il peut aussi être préparé en chauffant les chlorures avec le calcium et extrait par distillation du métal fondu. Cet élément est peu abondant, sa teneur moyenne dans la croûte terrestre étant de 4 ppm.

Le rubidium comme le césium sont des éléments très solubles en tant que sels de chlorure et restent en solution alors que d'autres composés ont déjà pu être extraits. Ainsi ils peuvent être concentrés par simple évaporation. La précipitation fractionnée, l'extraction par solvant et l'échange ionique sont aussi des techniques couramment employées pour extraire ces éléments. En Nouvelle Zélande où ces métaux sont extraits des saumures géothermales, le rubidium et le césium sont contenus entre 1 et 6 mg/l, or à Vendenheim on trouve des concentrations entre 13 et 24 mg/l ce qui pourrait rendre leur extraction particulièrement intéressante.

Le produit fini est généralement vendu principalement comme du formate de césium (HCCO-Cs^+) pour les applications dans les boues de forage.

En effet une des principales applications du césium est dans les boues de forage : Le formiate de césium saturé dans l'eau est thermiquement stable, stable à la pression, et assez dense ($2,3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) pour que certains sédiments y flottent. Il permet de produire une boue de forage plus dense (inventée au début des années 1990), qui peut être injectée dans le tube d'un forage profond afin de mieux contrebalancer la pression hydrostatique du fond du puits ce qui facilite l'injection et contrôle la remontée des fluides naturels. Ainsi un fluide plus dense qui remonte autour du tube entraîne plus facilement les roches broyées vers la surface. C'est ainsi qu'ont été forés les puits de ce qui était alors le plus gros projet mondial de forage pétrolier et gazier au monde, en Mer du Nord, dans le champ pétrolier et gazier d'Elgin-Franklin-Glenelg.

Par ailleurs, d'autres applications peuvent être mentionnées :

- Centrifugation : Les sels de césium donnent des solutions aqueuses denses. On les met dans le fond des éprouvettes de centrifugation, surmontées du mélange à séparer et parfois d'une solution moins dense au-dessus. Un gradient de densité se forme et lors de la centrifugation les composants du mélange se séparent selon leur niveau de densité.
- Horloge atomique : l'isotope stable ^{133}Cs permet d'obtenir une exactitude de 2×10^{-14} (soit une seconde sur 1 600 000 ans) grâce à l'« horloge au césium ». Ainsi le césium est utilisé pour sa résonance atomique dans les horloges et joue un rôle central dans le positionnement par satellites, internet et les téléphones portables.
- Photomultiplicateurs et compteurs à scintillation : ces tubes à vide utilisent l'émission par une photocathode, puis la multiplication d'électrons par une succession d'électrodes (dynodes) - jusqu'à 12 ou 14. La photocathode comprend souvent des composés de césium, notamment pour produire de l'infrarouge. Par rapport aux détecteurs à semi-conducteurs, le photomultiplicateur est beaucoup plus encombrant et délicat à utiliser.
- Électrolyte pour accumulateurs
- L'isotope ^{137}Cs est utilisé comme source radioactive dans de nombreuses applications notamment médicales.

Le prix du césium en 2009 (métal) était de 10 dollars par gramme (10 000 euros le kilo) mais le composé non pur à un prix nettement moins élevé. En effet le formiate de césium s'achète autour de 300 dollars le kilogramme. Là encore le marché étant limité certaines compagnies ayant besoin de césium peuvent acheter un gramme de césium (sous ampoule comme la Figure 15) à 6 dollars alors que d'autre peuvent en trouver à 40 dollars par gramme (source USGS). Aux Etats-Unis seulement quelques milliers de kilogrammes s'échangent par an.

Son coût élevé et son extrême réactivité limitent ses applications à l'heure actuelle. Aucun problème environnemental associé à cet élément n'a pour l'instant été mis en évidence.

3.3 Strontium

Le strontium, comme le calcium, est un élément chimique de la famille des alcalino-terreux. Il est mou, malléable, gris-jaune. Au contact avec l'air, il forme un film d'oxyde protecteur (passivation). Il s'enflamme et brûle facilement dans l'air et réagit avec l'eau.

Il se trouve dans le minéral de Célestite (53% de strontium) et de strontianite et il est principalement industriellement extrait de ces minéraux.



Figure 16: cristal de Célestite le principal minéral du Strontium.

Le strontium possède quatre isotopes stables: ^{84}Sr (0,56 %), ^{86}Sr (9,86 %), ^{87}Sr (7,0 %) et ^{88}Sr (82,58 %). Le strontium ^{87}Sr est dit radiogénique car il provient de la désintégration du ^{87}Rb . Par ailleurs, le strontium radioactif (^{90}Sr) et le césium radioactif (^{137}Cs) sont des éléments synthétiques qui ont contaminé la biosphère à la suite des essais nucléaires dans l'air, et à la suite de la catastrophe de Tchernobyl (le strontium a été le principal polluant distant avec l'iode et le césium) puis, plus récemment, de Fukushima.

Durant le 19^{ème} siècle le strontium était utilisé dans la production de sucre à partir de la betterave à sucre (processus pour extraire le sucre à partir de la mélasse). Au pic de production de télévisions à écran cathodique, 75% du strontium aux Etats Unis était utilisé pour la fabrication du verre de l'écran ; avec le remplacement des écrans cathodiques la consommation de strontium a largement décru.

Actuellement aux Etats-Unis le strontium est utilisé dans :

- Le feu d'artifice et balise de détresse 30%
- La céramique magnétique 30%
- Les alliages 10%
- Le pigment 10%
- La production électrolytique de zinc 10%
- Les autres applications (incluant le verre) : 10%

Entre 2012 et 2015 le strontium importé aux Etats-Unis provenait : du Mexique pour 62% de l'Allemagne à 24% de la Chine à 12% et d'autres pays à 2%.

La Chine est devenue récemment le leader de la production de carbonate de strontium avec la capacité de production de 200 000 tonnes par an, suivie par l'Allemagne et le Mexique avec 95 000 et 103 000 tonnes par an. La Chine utilise la Célestite domestique alors que l'Allemagne importe la célestite. La Chine vend son carbonate de strontium en Asie et en Europe ce qui cause une dépréciation du carbonate de strontium dans ces régions. Les réserves chinoises sont de moins bonnes qualités et en moins grandes quantités que les réserves du Mexique, des Etats Unis, de la Turquie ou encore de l'Espagne ce qui pose la question de la durabilité de la production chinoise. Cependant l'utilisation du strontium continue de diminuer avec la disparition progressive des tubes cathodiques.

En 2015, le Carbonate de strontium s'achetait autour de 697.8 euros par tonne mais le composé pur s'échange autour 1000 euros le kilogramme.

3.4 Bore

Le bore est l'élément chimique de numéro atomique 5, de symbole B. Le corps simple bore est un métalloïde trivalent.

Il fait partie, avec le lithium et le béryllium, des quelques éléments légers qui ont échappé aux principaux processus de nucléosynthèse, ils ont donc une faible occurrence dans le système solaire. Mais plus abondant à la surface de la Terre, notamment sous forme de borates principalement de borax, mais aussi d'acide borique. Il est plutôt rare dans l'écorce terrestre et le système solaire, Il constitue environ 0,001 % de la croûte terrestre, soit 10 ppm en moyenne (en particulier 5 mg/kg dans les basaltes).

Comme le lithium, le bore est très soluble et n'est pas extrait des saumures lors d'extraction d'autres éléments. Son extrême solubilité fait qu'une petite portion uniquement est partitionnée dans la phase vapeur lors de la séparation. C'est cette solubilité qui explique les concentrations élevées de bore dans les condensats. C'est cette technique d'extraction qui est utilisée à Larderello en Italie pour l'extraction du bore et ceux depuis plus de 2 siècles.

Le bore est un solide noir dont la forme solide est cassante et très dure. La forme amorphe du bore, quant à elle, est une poudre marron-noir. Le bore se comporte comme un non-métal dans les composés. Cependant, quand il est pur, il conduit l'électricité.

Très différent des métaux qui composent son groupe (aluminium, gallium, indium, thallium), transparent aux infrarouges, le bore est un mauvais conducteur à température ambiante mais bien meilleur à plus haute température. Le nitrure de bore hexagonal a des propriétés lubrifiantes semblables à celles du graphite. Autre particularité du bore : sous haute pression, au-delà de 10 gigapascals (GPa), il produit un cristal ionique à lui seul, les atomes s'arrangeant en deux sortes d'entités, l'une anionique, l'autre cationique.

Son coût pur est de presque 11 140 dollars par kilogramme en 2015 (USGS). Sa forme cristalline d'échange à 5 dollars par gramme (5000 dollars par kilo).



Figure 17: borax, forme cristalline du minéral de bore.

Les utilisations du bore sont multiples. Elles sont listées ci-dessous, il faut noter cependant que beaucoup d'application ont changé au cours des dernière décennie depuis que le bore est prouvé toxique pour l'homme. Encore aujourd'hui de nombreuses incertitudes toxicologiques entourent le bore.

- Le composé du bore ayant la plus grande importance économique est le borax ou tétraborate de sodium qui est notamment utilisé pour la fabrication de fibre de verre isolante, et comme agent de blanchiment.
- Pour la couleur verte qu'il donne dans la flamme, le bore « amorphe » est utilisé dans les effets pyrotechniques.
- L'acide borique est un composé important de certains produits textiles.
- L'acide borique et ses sels ont été très utilisés en médecine comme médicaments biocides, mais ils sont peu à peu remplacés par d'autres produits plus sûrs.
- C'est un agent dégazant en métallurgie qui sert aussi au raffinage de l'aluminium. Le bore est utilisé pour certains missiles et dans les domaines qui requièrent de hautes températures.
- Sous forme de nitrure de bore, il est employé afin de fabriquer des objets présentant une dureté analogue au diamant.
- Conservateur alimentaire est un usage qui n'est plus autorisé actuellement en France et dans d'autres pays occidentaux.
- Des composés du bore sont utilisés en synthèse organique et pour produire des verres borosilicatés tels que le Pyrex.
- Le bore naturel ou enrichi est utilisé, sous forme d'acide borique dilué dans l'eau, comme absorbant neutronique dans les réacteurs nucléaires à eau pressurisée. Il joue aussi un rôle de bouclier contre les radiations neutroniques et dans les détecteurs de neutrons.
- On le trouve en alliage avec le fer et le néodyme ($Nd_2Fe_{14}B$) dans de puissants aimants permanents.
- Des composés de bore sont étudiés pour un très grand nombre d'applications comme dans les membranes perméables au sucre, les capteurs d'hydrate de carbone.

Les sources de bore sont les minéraux tels que la colémanite, la rasorite et l'ulexite. Ces sources comprennent Presque 90% du bore extrait par les mines. La plus grande réserve de minerais de borax connue, presque non minée, est en Turquie centrale. Les réserves prouvées sont de l'ordre de 1 milliard de tonnes alors que la production annuelle est de l'ordre de 4 millions de tonnes. Les capacités d'extraction et de raffinage du bore sont jugées suffisantes pour répondre aux niveaux de croissance attendus au cours de la prochaine décennie.

La Turquie et les Etats Unis sont les producteurs principaux. La Turquie produit près de la moitié de la demande mondiale grâce à la mine d'Etü Mine Works (compagnie nationale) et qui détient près de 72% des réserves connues. L'autre moitié de la production provient du Groupe Rio Tinto et de sa production à l'état unis près de Boron en Californie.

L'augmentation de la demande mondiale en acide borique a mené un nombre de producteurs à investir dans l'extraction. Ainsi la mine d'Etü a ouvert une nouvelle usine d'acide borique de 100 000 tonnes par an de capacité. Le groupe Rio Tinto a lui aussi augmenté la capacité de sa mine pour atteindre 310 000 tonnes par an en 2005.

La demande a été principalement guidée par le marché grandissant des fibres de verre et des borosilicates dans la fabrication des verres. Des groupes d'analyse prédisent la croissance du bore de 3 à 4 % par an.

3.5 Manganèse

Le manganèse est l'élément chimique numéro 25. Le corps simple est un métal de transition. Le manganèse est relativement abondant, il figure à la quatrième place des métaux usuels de nos sociétés modernes, après le fer, l'aluminium et le cuivre. C'est le troisième métal de transition, le plus abondant dans la croûte terrestre, après le fer et le titane (1 000 g à 850 g par tonne dans la croûte terrestre).

Le manganèse apparaît également, et en particulier à l'état de composés de minéraux hydratés associés à des micro-grains de quartz, d'argiles et de feldspath, dans ce que l'on appelle des nodules polymétalliques sur le fond du plancher de l'océan.

Le manganèse Mn est un solide grisâtre ou gris-blanchâtre, un métal dur gris-blanc ou grisâtre brillant qui ressemble au fer. C'est un métal clair de densité 7,2 à 7,44 (pur), avec une dureté Mohs de l'ordre de 5 à 6 ½, très cassant et fragile.

Il s'oxyde très lentement à température ambiante. Mais, chauffé à l'air, il est facilement oxydé, il brûle, l'oxydation vive ou "combustion" laissant du tétraoxyde de manganèse Mn_3O_4 .

La presque totalité du minerai extrait (90%) sert à fabriquer des ferroalliages à partir de ferromanganèse carburé ou ferromanganèse affiné, et/ou du silico-manganèse.

En effet le manganèse est souvent en alliage avec le fer, il donne des aciers plus durs, avec des propriétés mécaniques spéciales. Le manganèse est surtout un métal d'addition, qui accroît les qualités chimiques et mécaniques des fontes et des aciers. Les aciers modernes à faibles teneurs en Mn, de l'ordre de 2 % en masse sont faciles à travailler à températures élevées. Les superalliages de fer et de manganèse admettent à minima 8 à 15 %, ce qui augmente notablement la force de traction, la dureté et la résistance à d'éventuels chocs violents du matériau. L'acier de Hadfield à 12 ou 13 % en masse de manganèse durcit sous la contrainte, sous les chocs répétés. De nombreux alliages existent :

- On le retrouve avec le Cr et W pour garantir l'indéformabilité de l'alliage comme dans les outillages, les rails d'aiguillages.
- Les aciers Manganèse et nickel sont résistants au fluage alors que les alliages manganèses chrome et nickel sont amagnétiques.
- Le laiton au manganèse résistant à l'eau de mer, autrefois commun dans l'industrie navale.
- Le manganèse permet d'obtenir des alliages d'aluminium à rigidité renforcée, par exemple des boîtes cylindriques pour boissons ou dans l'industrie automobile.

Les sels de manganèse sont aussi des catalyseurs en chimie organométallique : ainsi, le chlorure de manganèse $MnCl_2$ catalyse l'acylation des organomagnésiens de façon chimio sélective. Les autres utilisations du manganèse dans les verres, les couleurs, les céramiques, les émaux et glaçures, sont l'apanage des oxydes.

La métallurgie du manganèse passe par celle des ferromanganèses. La réduction des oxydes s'effectue dans des hauts fourneaux de taille et de formes particulières, où l'on réduit par le coke des minerais de manganèse et de manganèse ferrifères. La production française a commencé dans les années 1875 avec des usines situées à Marseille (Saint-Louis), puis à Terrenoire, à Montluçon, au Boucau. Les productions les plus importantes sont jusqu'en 2003 près de Boulogne. Jusqu'en 1969, la France était l'un des principaux producteurs de ferromanganèse avec près de 60 kt/a, et une capacité de 90 kt/an, mais elle s'est arrêtée en 2004.

Les réserves mondiales estimées sont de 7 Gt et la production mondiale de minerais est de l'ordre de 22 Mt/an, venant principalement d'Afrique du sud, d'Australie, d'Ukraine et de Chine. Les réserves sont d'ailleurs principalement détenues par l'Afrique du sud (78%) et l'Ukraine (10%). Les productions sont souvent divisées en minerai de manganèse (le Gabon est un producteur notable) puis en Ferromanganèse (Afrique du sud principalement) et en Silicomanganèse (la Géorgie, l'Afrique du sud et l'Australie en sont des producteurs).

Aujourd'hui le minerai de manganèse (Manganèse - oxyde, < 77 % de manganèse) s'échange autour de 450 euros la tonne en forte hausse ces dernières années. Pur cet élément s'achète autour de 1.5 dollar par kilogramme (1300 euros par tonne).

3.6 Zinc

Le corps simple zinc est un métal bleu-gris. C'est un métal pauvre du groupe des métaux de transition (variable selon les définitions). Le zinc est par certains aspects semblable au magnésium dans la mesure où son état d'oxydation courant est +2, donnant un cation de taille comparable à celle de Mg^{2+} . C'est le 24^{ème} élément le plus abondant dans l'écorce terrestre. Il possède cinq isotopes naturels stables.

Le zinc possède 30 isotopes connus ainsi que dix isomères nucléaires. Parmi ces isotopes, cinq sont stables, ^{64}Zn , ^{66}Zn , ^{67}Zn , ^{68}Zn et ^{70}Zn , et constituent l'ensemble du zinc, le plus abondant étant ^{64}Zn (48,6 % d'abondance naturelle).

le zinc est un élément moyennement abondant dans l'écorce terrestre (70 g et 132 g par tonne selon les estimations). L'élément zinc est présent dans de très nombreux minéraux.

Le zinc natif est un métal natif très rare. Le principal minerai de zinc est la « blende » au sens générique, minerai à base de sphalérite, le sulfure de zinc ZnS .



Figure 18: sphalerite (blende) principal minerai de Zinc (ici minerai de la mine de Sovetskij Mine, Dal'negorsk, Russie).

Les gisements de zinc sont d'origines magmatiques, dits primaires ou bien sédimentaires, dits secondaires. Les minerais de zinc sont souvent associés à ceux de plomb, de cuivre, de fer. Les principaux gisements de minerais de zinc se situent en Chine et en Australie. Les gisements exploités se situaient également au Pérou, aux États-Unis (notamment la mine de Red Dog en Alaska), au Canada, au Mexique, en Russie (CEI), en République Démocratique du Congo... Leurs teneurs minimales sont de 40 kg par tonne.

Les réserves mondiales estimées de zinc étaient de 250 millions de tonnes en 2010 (l'USGS les estime à 1.9 milliards de tonnes en 2017), détenues notamment par l'Australie (21,2 %) et la Chine (16,8 %). La production mondiale s'est élevée en 2010 à 12 millions de tonnes, assurée essentiellement par la Chine (29,2 %), le Pérou (12,7 %) et l'Australie (12,1 %). La mine de Red Dog, en Alaska, est l'une des plus grandes exploitations de zinc à ciel ouvert.

Environ 30 % du zinc mondial provient du recyclage.

La production mondiale est estimée en 2017 à 13.5 millions de tonnes soit une augmentation de 5% par rapport à 2016. Cette augmentation est liée à l'ouverture de la mine Rampura Agucha en Inde et l'augmentation de l'extraction en Erythrée, et au Pérou. En 2017 le marché du Zinc était toujours en déficit avec une production de 13.5 millions de tonnes alors que la consommation était de 13.9 millions de tonnes.

Les utilisations peuvent être classées en fonction de leur importance décroissante du zinc exploité dans le monde :

- Galvanisation (protection du fer) : 50 % ;
- Fabrication de laiton et du bronze : 17 % ;
- Alliages d'aluminium (Zamaks, Kayems) : 17 % ;
- Produits semi-finis à base de zinc : 6 %
- Produits chimiques : 6 %
- Autres : 4 %

Le dépôt d'une mince couche de zinc en surface de l'acier ou du matériau fer le protège de la corrosion : c'est le zingage ou zingage, voire au sens générique la galvanisation. L'acier galvanisé est utilisé dans l'automobile, la construction, l'électroménager, les équipements industriels, etc. Le zingage du fer est la plus grosse utilisation du zinc. Elle se fait par « galvanisation à chaud » de produits finis correspond au trempage de l'acier ou du fer préalablement décapé, dans un bain de métal fondu, ici du zinc à 450°C ou bien par l'électro-zingage qui consiste en une électrolyse en solution aqueuse où l'acier ou le fer à zinguer sont placés à la cathode (pôle négatif) dans un bain type de chlorure de zinc contenant des ions Zn^{2+} .

Dans les piles électriques Le corps simple métal zinc est un des deux composants permettant le fonctionnement des piles tant salines qu'alcalines.

En septembre 2018, le prix du zinc s'établit à 2 435 dollars la tonne (pureté minimale de 99,95%), en hausse importante ces dernières années (+40% sur 5 ans).

4 Le programme d'exploration

Le lithium que nous recherchons étant dissous dans les saumures géothermales, les premières phases du programme suivent directement celles établies pour la détection de gîtes géothermiques et visent à trouver un réservoir d'eau chargée en élément dissous commercialement intéressants et capable de produire des débit important ($>200\text{m}^3/\text{h}$) afin de les extraire en parallèle de l'utilisation thermique de ce fluide. Le programme d'exploration est complété par des études géochimiques pour identifier les sources possibles des différents minéraux dissous dans les saumures, les trajets de migration, les modes de transfert et les mécanismes de concentration des substances pour identifier les zones où les teneurs sont les plus élevées.

Un premier travail de définition d'une zone au 100 000 °, dite « gîte régional », a été réalisé à partir :

- des données de synthèse géothermique du BRGM,
- des données de la synthèse du BRGM du projet « CLASTIQ Bassin Rhénan »
- des données de forages et de diagraphies de 18 puits pétroliers et géothermiques, obtenues auprès du BEPH et du BRGM
- des données de géostructures régionales
- des données issues des acquisitions géophysiques (sismique réflexion, gravimétrie, acquisition aéromagnétique)
- des études d'extraction et de valorisation du lithium dans les eaux géothermales.

La première conclusion de cette étude a été de se focaliser sur les zones de failles du Bundsandstein et de l'interface Trias / socle, seules zones avec des perméabilités suffisantes.

Un deuxième travail a eu pour objectif d'exclure les zones où une activité industrielle souterraine peut être susceptible d'affecter la ressource géothermique et minière.

Georhin a visé les gîtes géothermiques situés autour de l'agglomération de Strasbourg et ceux vers Haguenau.

Après avoir réalisé l'ensemble des synthèses et interprétations des données anciennes, l'acquisition de données géophysiques nouvelles sur la zone cible et obtenue l'Arrêté Préfectoral d'Autorisation de Forage, Georhin a atteint un premier objectif important par la réalisation des deux forages exploratoires VDH-GT1 et VDH-GT2 sur l'ancienne Raffinerie de Reichstett-Vendenheim.

En ce qui concerne les ressources possibles de lithium en Alsace du Nord, une synthèse décrivant le potentiel en lithium des saumures géothermales a été publiée par Clio Bosia (Lithium de France) dans la revue Géologues (Bosia et al., 2021). Un calcul, basé sur un modèle conceptuel de réservoir poreux, publié en 1991 par le BRGM (Pauwels et al., 1991) suggère pour une zone localisée dans le nord de l'Alsace et couvrant une superficie de 900 km^2 une quantité en place de 2 à 12 millions de tonnes LCE (Lithium Carbonate Equivalent), soit entre 2 000 et 13 000 tonnes LCE par km^2 . Bien que ces chiffres ne puissent être convertis en réserves fermes de lithium à ce stade, ils illustrent le potentiel exploratoire du secteur.

4.1 Choix initiaux des zones sollicitées

Le Fossé Rhénan est un bassin d'effondrement Tertiaire qui s'étend sur plus de 300 km de longueur de Bâle au Sud et à Mayence et Francfort au Nord. Cette structure géologique a une orientation NNE-SSW et présente une largeur moyenne de 40 km. Il est bordé à l'Ouest par les Vosges, et à l'Est par la forêt Noire (Figure 19).

Le Fossé Rhénan résulte géologiquement d'une extension avortée de la croûte continentale. Cette structure en distension, appelée « rift oligocène ouest européen », a été bloquée à l'Eocène moyen, lors de l'orogénèse pyrénéenne.

Cet effondrement a été accompagné par une remontée du Moho ce qui explique les moyennes élevées des gradients géothermiques rencontrés dans ce rift. Dans ce processus d'extension, la croûte continentale, au niveau du fossé Rhénan, s'est allongée d'un facteur de 1,05 à 1,2 suivant les endroits, soit un étirement de 5 à 15 km.

Le fossé est rempli par une succession de terrains mésozoïques à tertiaires sur plus de 4000 m en son centre. La répartition de ces terrains entre eux montre des phases successives de dépôts, d'érosion, séparées par des seuils, qui compartimentent le fossé.

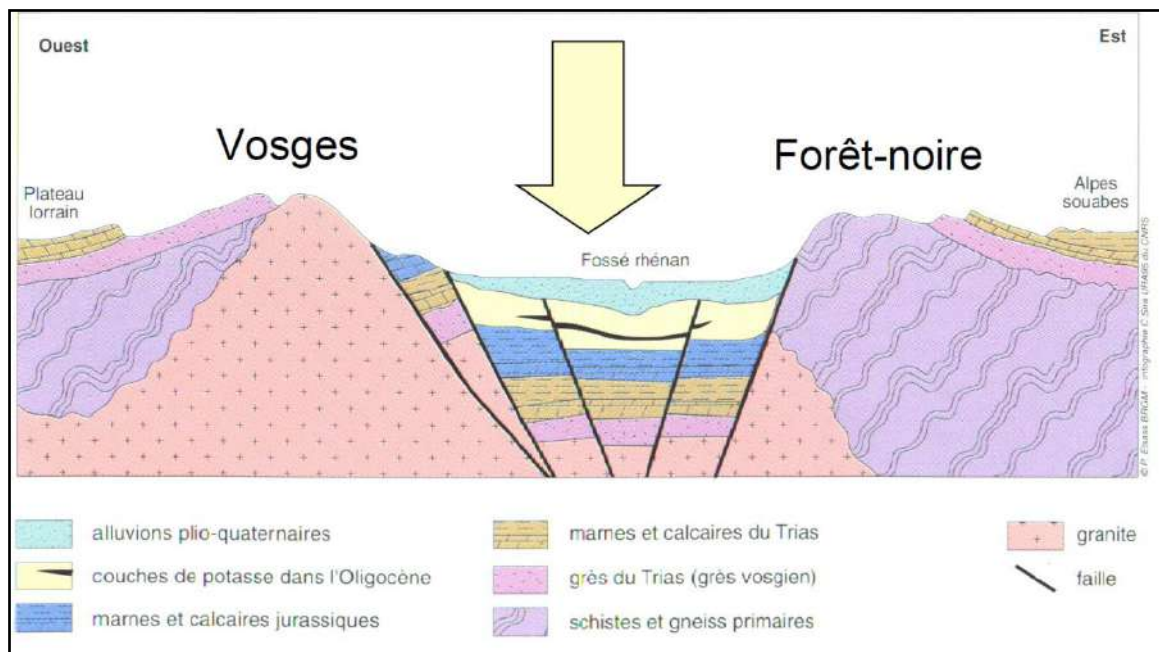


Figure 19: Contexte Structural du Fossé Rhénan

Le 10 Juin 2013, le Permis Exclusif de Recherche Géothermie Haute Température dit de « Strasbourg » a été accordé par arrêté ministériel à Georhin pour une durée de 5 ans.

Après le dépôt du PER, le travail de prospection s'est affiné grâce aux études réalisées au cours des deux années de suivi administratif du dossier (thèse sur le potentiel géothermique du Buntsandstein, rapport BRGM, données issues du pilote de Soultz-Sous-Forêts, GeORG, etc.) et a permis de mieux comprendre le potentiel géothermique sur le PER de Strasbourg.

Un premier travail de définition d'une zone au 100 000 °, dite « gîte régional », a été réalisé à partir :

- des données de synthèse géothermique du BRGM,
- des données de la synthèse du BRGM « CLASTIQ Bassin Rhénan »
- des données de forages et de diagraphies de 18 puits pétroliers et géothermiques, obtenues auprès du BEPH et du BRGM
- des données de géostructures régionales

Ce travail a permis de définir :

- les roches réservoirs cibles profondes : en particulier le TRIAS, un zonage cible au toit du réservoir à partir de 130°C, avec une cartographie des épaisseurs et de la tectonique.

La première conclusion de cette étude a été de se focaliser sur les zones de failles du Buntsandstein et de l'interface Trias / socle, seules zones avec des perméabilités suffisantes.

Un deuxième travail a eu pour objectif d'exclure les zones où une activité industrielle souterraine peut être susceptible d'affecter la ressource géothermique. Il s'agit en particulier des zones de :

- Pechelbronn
- Permis géothermiques accordés

Un troisième travail a été de pré-analyser le potentiel géothermique par puits (en simulation de fonctionnement en doublet EGS) et de cibler les zones de surface offrant un bon potentiel d'utilisateur thermie.

Ces différents travaux ont permis de définir des secteurs plus précis qui ont été choisis en raison :

- des températures importantes pouvant aller jusqu'à 200°C à une profondeur de -4000 mètres (toit du socle)
- de la présence de failles régionales proches
- de réseaux de chaleur à proximité
- d'un nombre important de consommateurs chaleur potentiels

Les conclusions apportées par ces différents travaux ont orienté 2gré à viser les gites géothermiques situés autour de l'agglomération de Strasbourg : Zone Centre (exemple du doublet de Vendenheim prévu lors de la version initiale de la demande en 2018 et actuellement existant), Zone Sud-Ouest (exemple de Eckbolsheim et Hurtigheim) et zone Nord (Haguenau et Herrlisheim).

L'objectif de 2gré sur ces secteurs est de réaliser des nouveaux clusters de 2 doublets géothermiques qui permettront d'accéder à la ressource minière des sels de lithium et des éléments connexes. Ces doublets géothermiques seront composés de deux drains suffisamment longs dans les zones réservoirs pour générer la perméabilité cumulée nécessaire à l'obtention du débit en surface. Ainsi, le puits producteur puisera le fluide chaud dans une faille principale et le puits injecteur réinjectera dans une autre, ou dans la même faille, mais en conservant une distance de sécurité pour éviter un court-circuit thermique.

4.2 Historique de l'exploration sur le PER de la plaine du Rhin

L'ensemble des données et analyses effectuées dans le cadre du PER de géothermie de Strasbourg est utilisé afin de déterminer le potentiel Lithium et connexes du PER dit de « La Plaine du Rhin ».

4.2.1 Base de données sur le PER de Strasbourg

L'ensemble des publications, rapports, études réalisées sur le bassin Rhénan a été analysé et synthétisé pour caractériser le réservoir, à l'échelle régionale et locale.

L'ensemble des données de puits et géophysiques a été compilé. La base de données de puits est interprétée, sur les 3 zones Nord, Centre et Sud-Ouest. La base de données géophysiques a été interprétée.

4.2.2 Données de puits et de géophysique

L'ensemble des puits supérieurs à 1400m de profondeur aux alentours du PER de Strasbourg sont indiqués sur le tableau suivant. Ces puits ont été dédiés à l'exploration-production pétrolière, excepté le forage de Cronenbourg (GCR1) qui était à vocation géothermique.

Plusieurs campagnes sismiques ont été effectuées pour la recherche d'hydrocarbures dans les formations tertiaires sur le périmètre du PER de Strasbourg, datant des années 1970 à 1990.

La zone Sud (autour de Strasbourg) et la zone Nord (autour d'Haguenau) ont été relativement bien prospectées (bonne couverture sismique 2D).

Ces lignes sismiques avaient pour objectif d'imager les réservoirs tertiaires, dans un cadre d'exploration pétrolière. Le tableau et la figure suivante exposent les lignes qui ont été retraitées et interprétées dans un objectif d'imager le sous-sol au droit du PER de Strasbourg. Vingt-six lignes ont été sélectionnées (total de 305 km) ; Le choix de ces lignes a été réalisé dans le but de prendre en compte tous les points de calage disponibles jusqu'à une distance acceptable du secteur d'intérêt.

La Figure 20 indique les lignes sismiques anciennes acquises par l'exploration pétrolière.

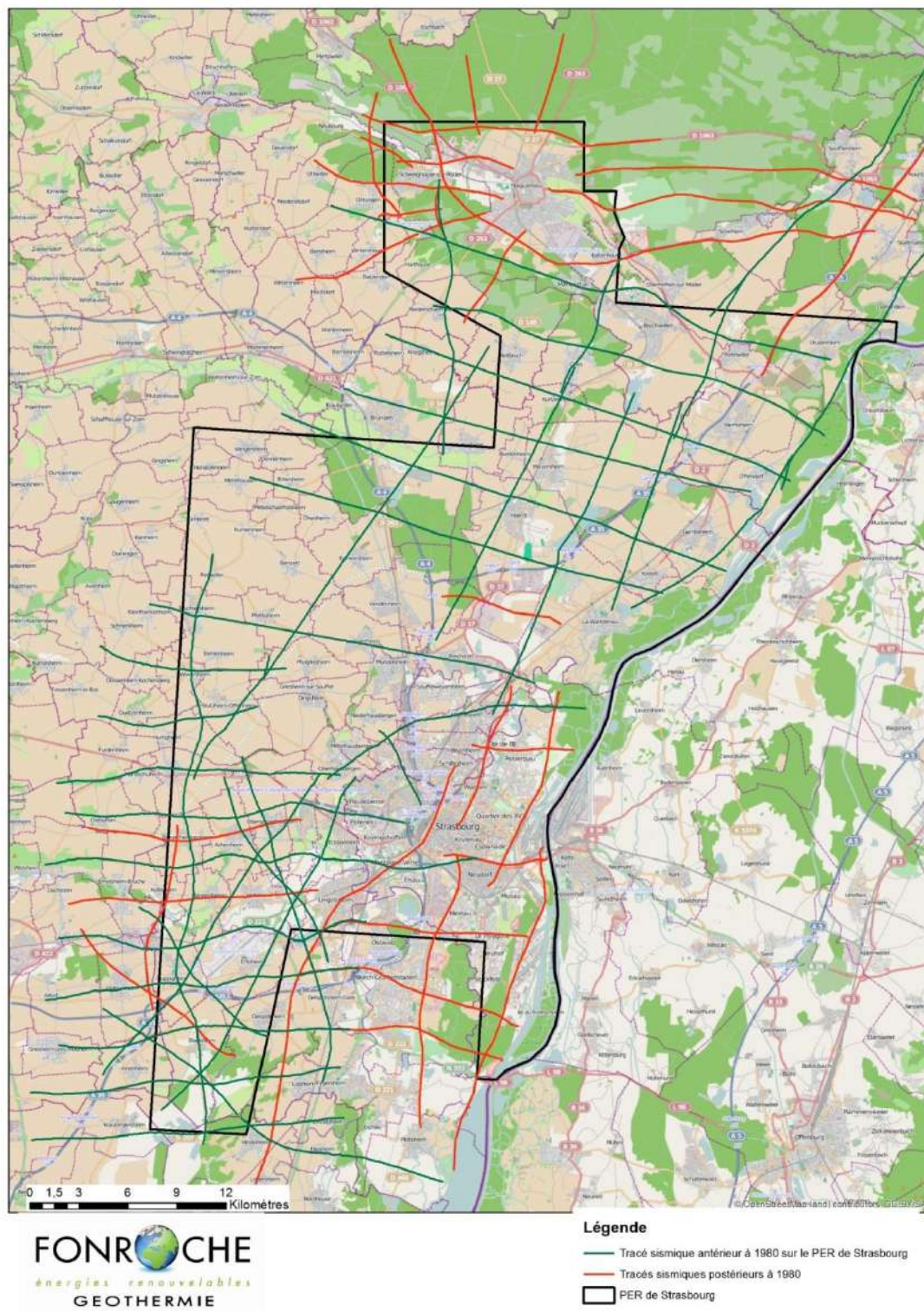


Figure 20: Tracés sismiques existants sur le PER de Strasbourg.

La gravimétrie permet de cartographier des dépressions et des remontées du socle dans les zones où la stratigraphie est assez régulière.

Cette technique permet également de déterminer des zones de faille. En effet ce sont des structures qui souvent apparaissent très bien sans erreur possible sur les cartes gravimétriques. Elles représentent des cassures, des surfaces de discontinuité donc un contraste de densité.

Plusieurs campagnes gravimétriques ont été réalisées sur le Bassin Rhénan. Ces données de gravimétrie proviennent de différentes sources :

- Des Mines de Potasse d'Alsace
- Du Bureau de Recherches Géologiques et Minières
- De l'Institut für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben
- De l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg

Les données gravimétriques permettent d'obtenir une image assez nette des anomalies qui apparaissent directement reliées au schéma structural des niveaux peu profonds, obtenus à partir de l'interprétation des lignes géophysiques 2D. Ces données servent ainsi de guide au prolongement des failles entre les lignes géophysiques à ces profondeurs.

Différentes campagnes d'acquisition terrestres et aériennes magnétiques ont été réalisées sur le Bassin Rhénan.

Au niveau du PER de Strasbourg, un levé terrain a été effectué dans les années 1970 (Edel et al.).

Les données brutes ne sont aujourd'hui plus disponibles mais la carte des données traitées de l'époque a été numérisée. Les données aéromagnétiques disponibles sont de qualité variable. Les points de mesures étaient vraisemblablement très espacés ce qui donne un résultat lisse et interprétable uniquement à grande échelle.

4.2.3 Acquisitions géophysiques réalisées

Sur la base des données existantes, Georhin a engagé un investissement conséquent pour acquérir de nouvelles données géophysiques.

4.2.3.1 Sismique Réflexion

Sur la base des paramètres d'acquisition définis pour les campagnes d'acquisition antérieure, une nouvelle acquisition sismique a été effectuée.

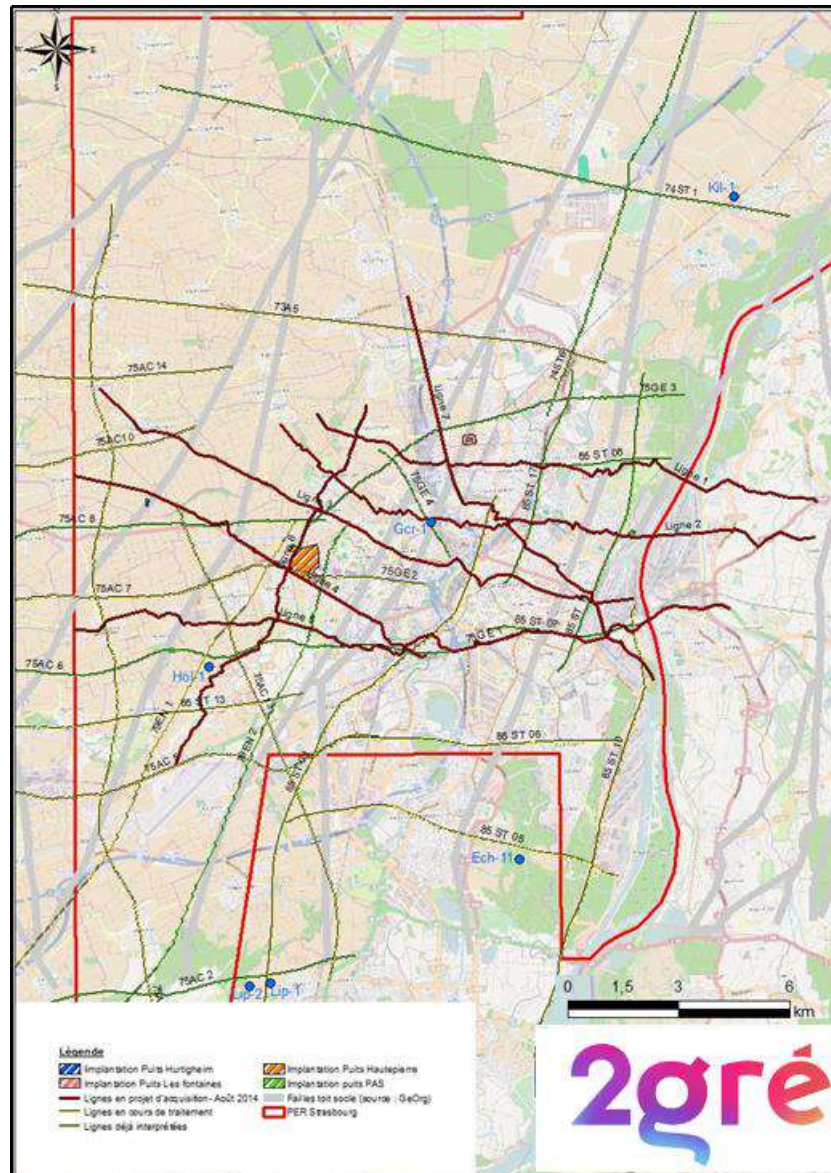


Figure 21: Lignes sismiques acquises sur le PER de Strasbourg

Le dispositif d'acquisition sur le terrain est composé :

- D'une source : convoi de 4 camions vibreurs
- De récepteurs : géophones plantés dans le sol
- Un camion laboratoire, fixe et hors du chantier, où les données sont réceptionnées et analysées.

La figure suivante présente un schéma du dispositif.

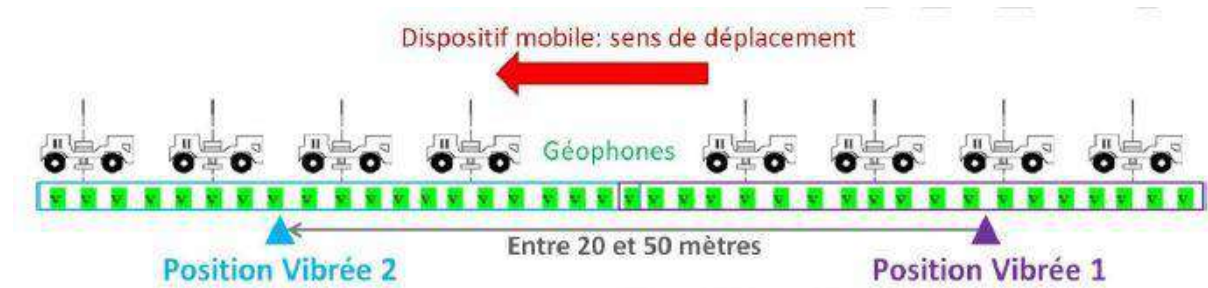


Figure 22: Dispositif d'acquisition sismique

4.2.3.2 Levés aéromagnétiques

Georhin a effectué une campagne d'acquisition de données aéromagnétiques sur une zone couvrant partiellement le PER de Strasbourg.

Des mesures sur échantillons ont été effectuées. Au total, 157 mesures de susceptibilité magnétique ont été réalisées sur l'ensemble des grandes formations présentes sur la zone d'étude. Ces mesures ont permis d'identifier 3 grandes familles de roches présentant des contrastes de susceptibilité magnétique allant de faible à fort.

4.2.4 Synthèse des données géochimiques

Les valeurs les plus hautes viennent des puits produisant depuis les formations profondes à mi-distance entre les Vosges et la Forêt Noire, des valeurs plus faibles étant mesurées en bordure du fossé comme sur le site de Bühl, où les eaux météoriques infiltrées depuis les reliefs diluent en partie les saumures profondes.

La majorité des technologies d'extraction du lithium sont conçues pour récupérer le lithium des salars ou, dans certains cas, de saumures géothermales ou de champs pétrolifères, mais qui ont une composition similaire à celle que l'on trouve dans les réservoirs nord-américains cibles. Puisqu'il n'est pas garanti qu'un procédé DLE fonctionne suffisamment pour l'extraction du lithium d'une saumure autre que celle pour laquelle il a été développé, il est utile de comparer la composition des saumures pour sélectionner la technologie DLE appropriée à la saumure.

La Figure 23 compare la composition de la saumure de l'Alsace du Nord avec différentes saumures géothermales selon les données publiées. Il apparaît que la saumure du Fossé Rhénan contient globalement moins de sels et nettement moins de magnésium et de calcium, tout en contenant des concentrations comparables de lithium. Cela est plutôt favorable à l'extraction du lithium, car cela réduit la nécessité d'étapes de prétraitement qui pourraient générer des déchets solides et puisqu'il est possible d'utiliser des procédés présentant une sélectivité Li/Mg plus faible par rapport à ce qui serait nécessaire pour d'autres saumures dans le monde.

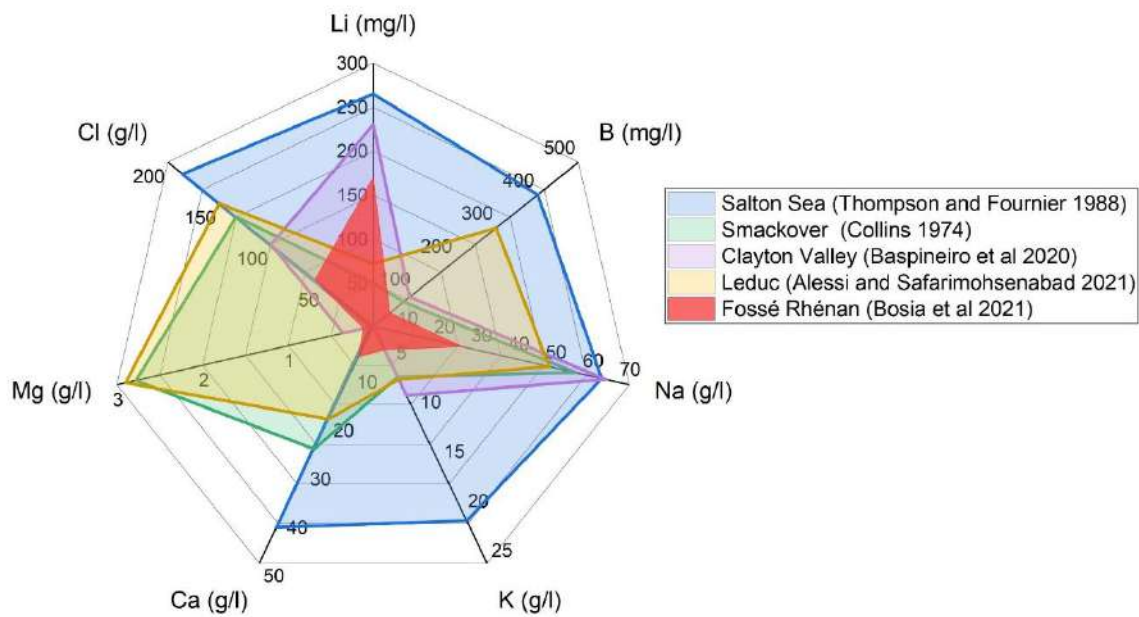


Figure 23: Comparaison des concentrations des principaux éléments chimiques dans différentes saumures

Dans ce contexte, des projets ont été développés ces dernières années pour faire face aux défis de DLE à partir des saumures géothermales en Alsace du Nord et plus largement dans le Fossé Rhénan (Bosia et al. 2021). En particulier, le projet européen EuGeLi (European Geothermal Lithium Brine), coordonné par Eramet, a étudié le potentiel d'extraction du lithium à partir des centrales géothermiques existantes dans la région. Le procédé d'extraction par adsorption à base d'aluminates a été testé sur site avec un équipement pilote et il a été démontré qu'il est capable de fonctionner dans des conditions imposées par l'activité géothermique. Les résultats ont bien illustré la possibilité de produire les premiers kg de carbonate de lithium à partir de saumures géothermales de l'Alsace du Nord.

Outre-Rhin, le projet UnLimited, mené en partie par EnBW, se concentre non seulement sur le Fossé Rhénan, mais aussi sur le bassin nord-allemand, dans le but de sélectionner et d'évaluer des adsorbants sélectifs du lithium particulièrement qualifiés. À cette fin, une unité pilote sera installée dans la centrale de géothermie de Bruchsal (Bosia et al. 2021).

4.3 Détail des réalisations et connaissances du Projet de Vendenheim

4.3.1 Finalisation du forage VDH-GT1

Le forage VDH-GT1 est construit sur un principe multidrain avec deux jambes dénommées VDH-GT1-ST4 et VDH-GT1-ST9. Le forage a commencé le 13 juin 2017 et s'est terminé le 05 août 2020.

Le puits VDH-GT1-ST9 a été foré en side-track à partir du puits VDH-GT1-ST4, initié à la cote de 4470 mMD. Ce puits a démarré dans la formation de conglomérats d'âge Permien qui repose sur le socle granitique. Le toit de ce dernier a été atteint à 4634 mMD.

Des mesures de diagraphies ont été réalisées dans le puits jusqu'au Permien. La géométrie du puits et les problèmes d'instabilité et de coincement étant très élevés, aucune mesure de diagraphie de paroi n'a pu être effectuée au niveau du réservoir granitique et des zones de failles du socle. La température réservoir a été mesurée par un système de pipe conveyed conçu par Georhin.

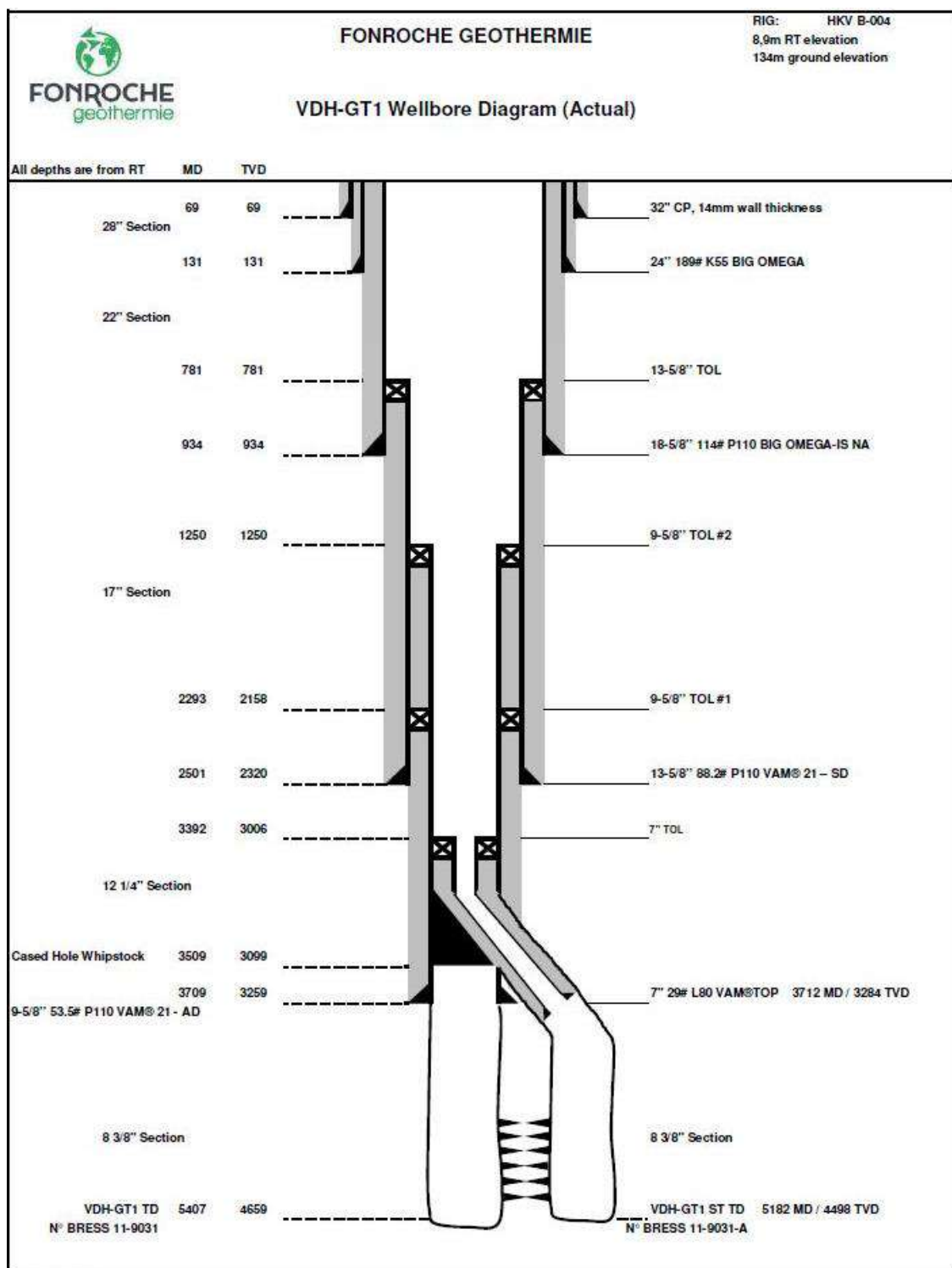


Figure 24: Architecture finale du forage VDH-GT1 double jambes.

4.3.2 Finalisation du forage VDH-GT2

Le forage VDH-GT2 a commencé le 18 août 2018 et s'est terminé le 22 février 2020, le schéma de l'architecture finale du puits est présenté sur la Figure 25. L'objectif est une ressource en eau géothermale à 200 °c et de 450 m³/h dans un réservoir de faille régionale dans le socle.

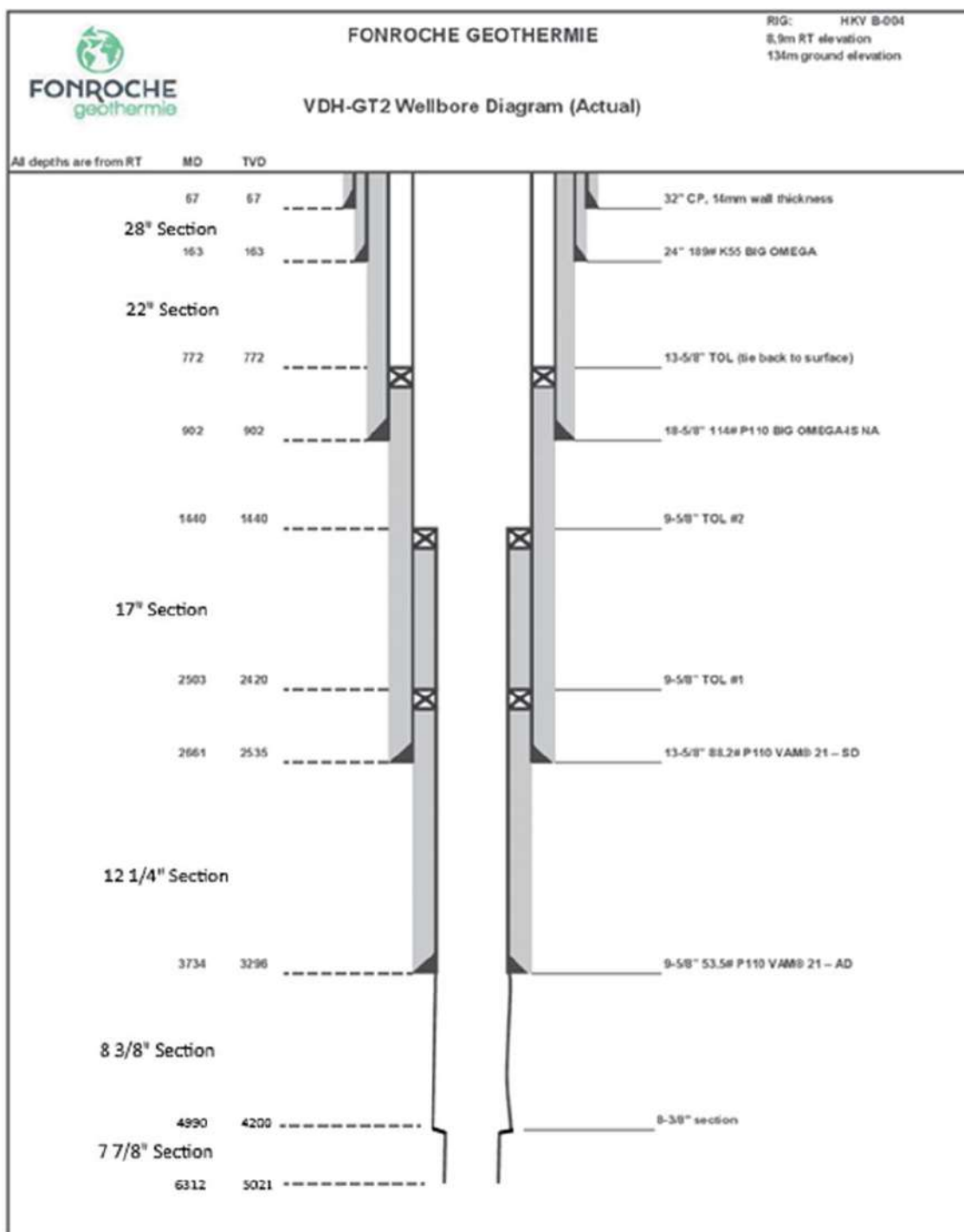


Figure 25: Schéma de l'architecture finale du puits VDH-GT2.

4.3.3 Synthèse de la ressource minière découverte sur Vendenheim

Plusieurs découvertes minières ont été faites tout au long du développement du réservoir de Vendenheim, dont la démonstration que le site est propice à une coextraction du fluide géothermale et du lithium.

Le fluide en place à d'abord été étudié à partir des fluides recueillis sur le forage dans la région. Deux études géochimiques d'importance résument ces caractéristiques : celle de Stober & Bucher (2014) et celle de Sanjuan & al 2016. Il s'avère que les fluides hydrothermaux profonds partagent les mêmes caractéristiques. Ils permettent donc de définir la composition chimique des fluides dans le bassin, définir la façon dont ces fluides circulent, et préciser la température atteinte par les fluides via une approche de géothermométrie.

Ces données sont issues de 64 puits (incluant des puits pétrolier) de la région du Upper Rhine Graben

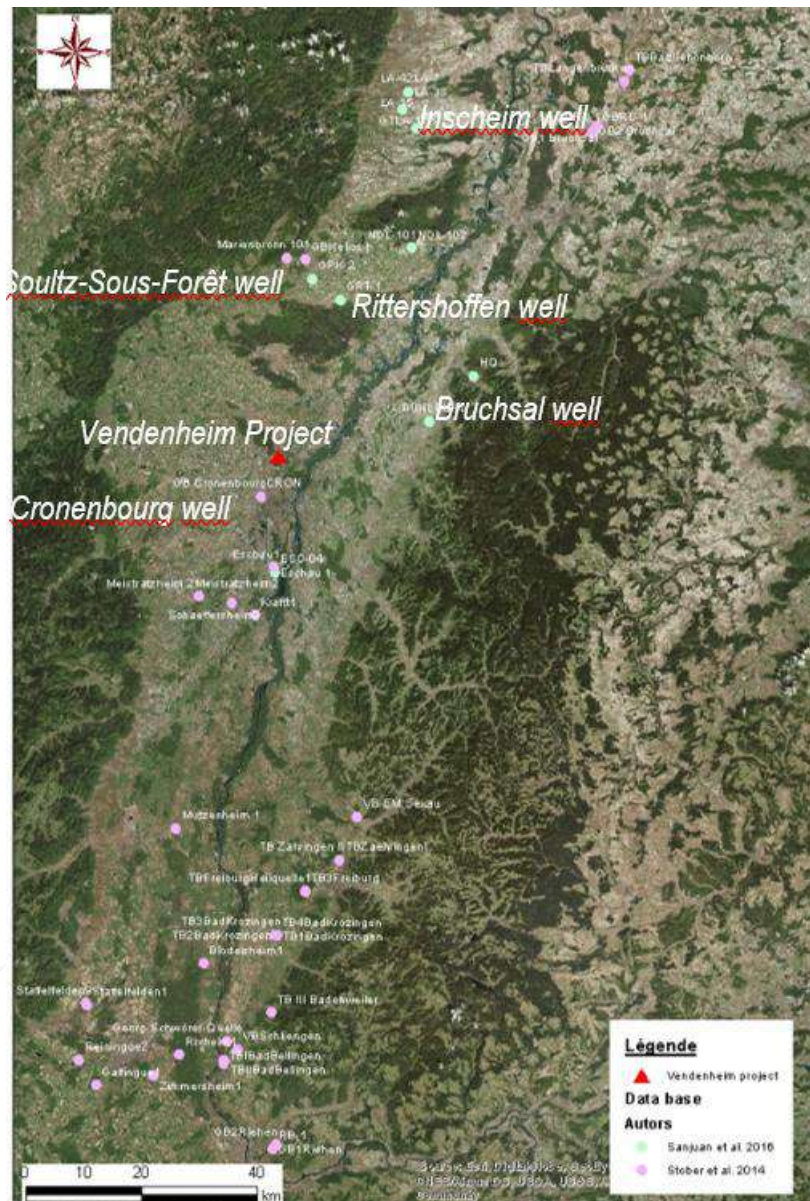


Figure 26: Maps of Wells data used by Sanjuan & al.2016 and Stober & Bucher (2014)

Par ailleurs Sanjuan et al. (2016) et Stober & bucher (2014) s'accordent pour définir la circulation de fluide comme une circulation générale Est Ouest en utilisant des fractures NE-SO. Ces conclusions sont faites à partir d'analyses chimiques et isotopiques ainsi que l'évolution de la température à travers le bassin rhénan.

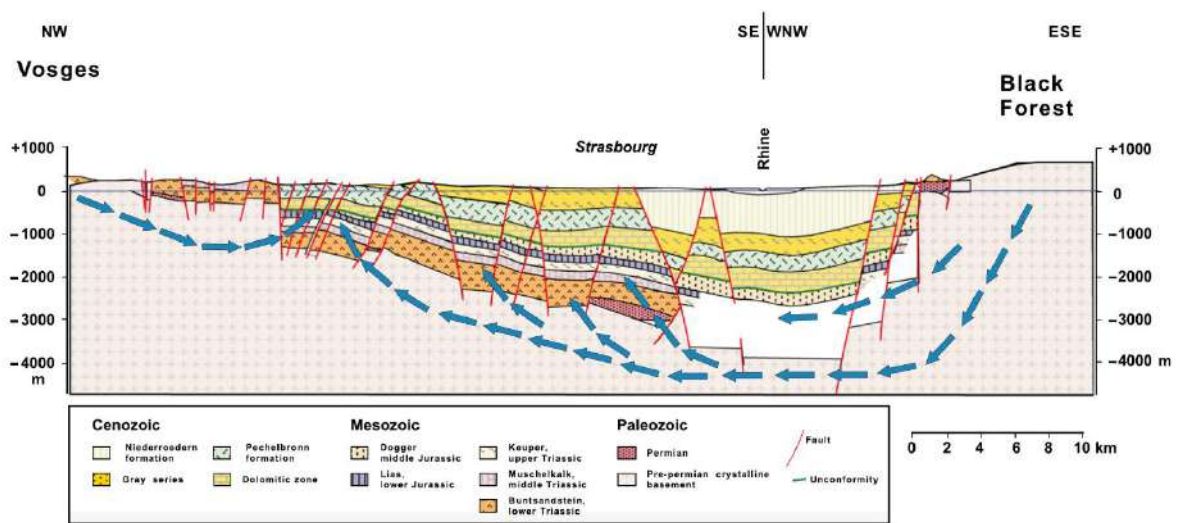


Figure 27: Coupe schématique à travers la vallée nord du Rhin (Schnaebele 1948 ; Breyer 1974 ; Cautru 1985) entre les Vosges et la forêt Noire présentant le chemin emprunté par les eaux hydrothermales (en bleu) à travers les terrains sédimentaires et les failles du socle.

L'analyse de Sanjuan (2016) interprète l'origine des saumures hydrothermales selon plusieurs origines :

- Les saumures primaires ont été formées par de l'eau marine ancienne (jusqu'au stade de précipitation du sel gemme). Cette interprétation provient des solutés totalement dissous qui varient de 99 à 107 g/l, des concentrations de Cl et de Br et enfin des valeurs de δD , $\delta^{18}O$ and $\delta^{34}S$.
- La dilution d'eau météorique avec la contribution du sel gemme dissous.
- L'interaction avec le socle granitique et les roches sédimentaires.
- Les anomalies isotopiques pour le gaz He principalement crustales (non dérivés du manteau) ($R/R_{atm}=0,128$ à Bruchsal et $0,252$ à Insheim).

Plusieurs analyses géochimiques ont été réalisés à plusieurs reprises pendant les campagnes de stimulation des puits sur Vendenheim. Ces analyses permettent de caractériser le réservoir géothermique, la circulation des fluides et leur origine et sont nécessaires afin de définir les bonnes pratiques d'exploitation industrielle du site, permettant d'anticiper les phénomènes de colmatage et de corrosion.

L'échantillonnage a été réalisé à 3 reprises sur la ligne de test : Un premier point en aval du séparateur (S1), un autre point au niveau du V-notch ou Bac déversoir (S2), et un point d'échantillonnage supplémentaire au niveau du bassin géothermale (S3).

Les fluides déchargés lors des essais de production, ainsi que les dépôts solides ont fait l'objet d'analyses physico-chimiques, isotopiques et radiologiques par des laboratoires spécialisés (BRGM, IFTS, Laboratoire des Pyrénées et des Landes et BWG Geochemische Beratung GmbH). Les résultats et analyses sont résumés ci-dessous.

4.3.4 Surveillance microsismique

Cette surveillance microsismique s'inscrit dans une démarche de prévention et de gestion de risques potentiels. Elle permet une adaptation en temps réel des opérations afin de limiter le risque de ressenti d'une sismicité induite éventuelle par la population.

La gestion de la sismicité est réalisée en fonction du TLS (traffic light system) dont les seuils de magnitude ont été réduits par rapport à l'AP. En fonction du statut de la variable, les décisions à prendre et les démarches à suivre sur les opérations sont définis selon : le signallement interne, la communication externe et la mise en œuvre des actions sur les opérations. Le protocole (Figure 31) est basé sur un système d'alerte TLS mixte utilisant les critères (variables) suivants :

- Seuils selon : la magnitude locale verticale (MLv) et le peak ground velocity (PGV).
- Prise en compte de la distance aux puits, de l'évolution d'essaims naturels et de l'apparition d'un nouvel essaim.
- Intégration du paramètre « énergie mécanique injectée » dans le réservoir pour comparaison avec l'énergie radiée sismiquement. »
- Règle prudentielle : définition du taux de sismicité induite et naturelle acceptable.

La gestion de la sismicité induite se base également sur les analyses complémentaires suivantes :

- la loi de Gutenberg-Richter : permettant un suivi statistique et empirique du catalogue microsismique avec calcul de la magnitude de complétude, de la b-value et de la magnitude maximale ;
- Lois de Shapiro, 2010 et Hallo, 2014 : permettant un suivi probabiliste du catalogue avec définition d'un index sismogénique et donc la probabilité qu'une magnitude donnée se produise ;
- Loi de McGarr : permettant de réaliser la corrélation des paramètres hydrauliques (pression et débit) et sismiques afin de déterminer la magnitude maximale qu'il serait possible d'atteindre ;
- Corrélation additionnelle avec l'évolution des index d'injectivité et de productivité.

Réseau de mesure des vibrations par rapport à l'habitat

Un réseau parallèle de mesure du risque sur l'habitat (type SUV) sera mis en place. Il consiste en la pose de stations de mesure des vibrations (géophone) directement au niveau des infrastructures. Le choix de ces dernières sera discuté et englobera différents types de bâti.

Une première phase d'ajustement des seuils de déclenchement est nécessaire, la surveillance est opérée de façon continue avec une évaluation des vibrations selon la norme DIN 4150. La solution comprend un système de transmission des données, de traitement du signal, de sauvegardes, d'envoi d'alertes, de rapports et de notification client.

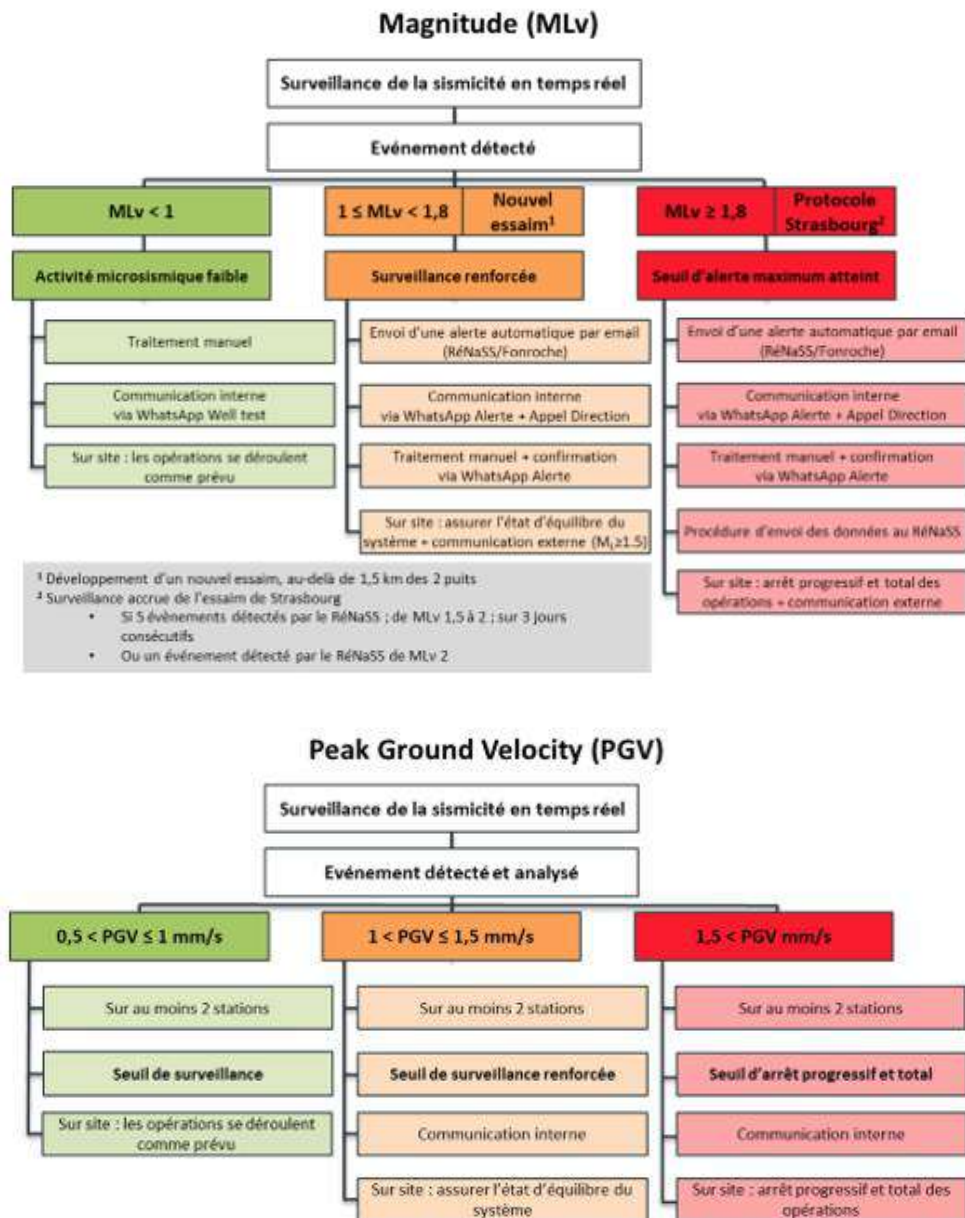


Figure 28 : Traffic Light System basé sur la magnitude (en haut) et sur le PGV (en bas).

4.4 Sélection du procédé d'extraction du lithium et choix du démonstrateur

4.4.1 Travaux concernant l'élément cible principal : le lithium

Comme mentionné précédemment, un fluide géothermique extrait de grandes profondeurs et particulièrement d'un milieu cristallin est généralement riche en éléments dissous.

Dans le cadre de la présente demande de PER minier « Lithium et substances connexes » « La Plaine du Rhin », la ressource a été prouvée et confirmée par l'analyse géochimique de fluide géothermal issu du forage géothermique VDH-GT1 mené par Georhin.

À l'occasion de l'appel à projets « Métaux critiques » qui s'inscrit dans le cadre du plan d'investissement France 2030, la filiale sœur de 2gré, Lithium de France, a obtenu un financement pour le projet GeoVaLi qui vise à mettre au point des procédés d'extraction et de raffinage du lithium à partir des saumures géothermales du Fossé rhénan.

Tests préliminaires des technologies DLE

Les tests à l'échelle laboratoire des technologies d'extraction du lithium sont réalisés dans les installations des entreprises partenaires suivant un cahier des charges défini par Lithium de France afin de cibler les méthodes d'extraction les plus adaptées au contexte des saumures de l'Alsace du Nord. Les essais à petite échelle permettent aux développeurs de DLE d'évaluer les performances de leurs technologies sur des saumures du Fossé rhénan fournies par Lithium de France et d'optimiser éventuellement les paramètres opératoires de leurs procédés selon les résultats souhaités par Lithium de France.

Evaluation des technologies DLE dans le laboratoire de Lithium de France

Les technologies sélectionnées sont par la suite testées sur un équipement de laboratoire qui permet d'évaluer le fonctionnement en continu et de simuler les conditions opératoires d'une centrale géothermique, ce qui donne suffisamment d'informations sur le comportement des matériaux dans des conditions réelles. Cette approche particulière de Lithium de France, permettra d'avoir une meilleure vision de la faisabilité et de prendre les décisions appropriées quant au choix de la technologie d'extraction. Durant cette phase d'essai, les matériaux adsorbants sont mis à l'épreuve sous des conditions plus proches des paramètres réels de géothermie en Alsace du Nord, notamment en termes de pression, de température et d'usage d'additifs. L'ensemble du procédé de purification et de conversion du lithium est systématiquement pris en compte dans le choix de la technologie afin que le procédé choisi soit efficace, rentable et respectueux de l'environnement.

Démonstrateur sur site

Le démonstrateur sur site envisagé par Lithium de France pourra être installé à proximité des puits de production dans le périmètre du PER « La Plaine du Rhin ». Cette phase permettrait d'évaluer les performances de la technologie d'extraction sur une saumure réelle du réservoir cible, à l'issue des essais sur le pilote de laboratoire. L'équipement sur un site de géothermie permettra également de traiter des débits plus importants afin d'identifier d'éventuels problèmes lors de la mise à échelle du procédé, ce qui permettra de modifier et d'optimiser le fonctionnement de l'extraction en fonction des résultats de cette phase avant d'être reproduit à l'échelle industrielle. Cet équipement intégrera également toutes les étapes de purification (séparation membranaire, échange ionique, boucle de récupération d'eau) et de conversion du lithium extrait (par des procédés conventionnels ou électrochimiques) jusqu'à l'obtention d'un sel de lithium. Ceci permettra de valider la chaîne de procédé de transformation du lithium adaptée à la technologie d'extraction développée par Lithium de France pour la conception de la centrale combinée de géothermie.

Historiquement 2gré (ex Georhin) a travaillé au co développement de 2 procédés : celui de Geolith défini précédemment et celui de Adionic, précisé ci-après, au travers du projet de recherche Termali porté par Geodenergies :

Adionics possède un liquide d'extraction de haute technologie basé appelé Flionex ayant la propriété de complexer et/ou de solvater les espèces ioniques à extraire. La synthèse de ces molécules à une échelle de laboratoire est développée au sein de l'entreprise.

Adionics a identifié diverses formulations Flionex montrant une capacité remarquable d'extraction sélective des sels de Lithium.

L'objectif du projet PILOTE THERMALI était de transposer à l'échelle 1/10^e les résultats du projet initial THERMALI porté par le GIS Géodenergies qui délivrera en 2021 les résultats de rendement du Flionex pour extraire sélectivement les sels valorisables de LiCl, dans un process sous pression afin d'éviter de modifier la saumure lors de la réinjection dans le doublet géothermal et plus particulièrement :

- Valider la capacité d'extraction du Flionex pour un débit de 1/10^e, sous pression (100% de la pression d'exploitation) et raccordée à la boucle de surface d'une centrale géothermale en activité
- Optimiser le process d'extraction pour atteindre une qualité commerciale en présence des impuretés et autres minéraux de l'eau géothermale.
- Adapter le process à un respect total de l'environnemental visant à zéro déchet
- Confirmer l'optimisation thermique sur l'interface avec le pilote d'extraction du Lithium
- Confirmer la faisabilité de l'échelle industrielle et les paramètres économiques Capex et Opex.
- Vérifier la complémentarité éventuelle avec d'autres process d'extraction de Lithium dissous au stade du développement pilote.
- Monitorer l'évolution de l'extraction sur le fonctionnement du doublet dans le réservoir
- Concevoir l'unité pilote pour être mobile sur plusieurs sites français différents
- Ajout d'une brique technologique de raffinage qualité carbonate de Li Batterie

La surface estimée du pilote est de 500 m² avec une capacité de rendement de 150 t/an de production de LCE (Li Carbonate Equivalent).

Ces procédés fonctionnent cependant ils sont pour l'instant contraint par des fenêtres de température particulier (extraction à faible température, régénération à plus haute température. Or l'extraction de lithium est idéalement faite à partir de fluide à 80°C pour éviter la précipitation de sel non désiré comme la silice. Cependant, la silice et les éléments dérivés peuvent être extraits à leur tour et valorisés. C'est cette période du PER qui sera dédiée à la sélection d'une technique d'extraction applicable au cas des saumures géothermales. Si lors du procédé d'extraction des substances non valorisées et des produits dérivés du procédé industriel venaient à être produits, ils pourraient être réinjectés dans le réservoir s'ils sont toujours en solutions. Dans le cas contraire, les déchets feront l'objet d'un pré traitement pour les remettre en solution ou bien bénéficierons d'un traitement industriel adapté sur site ou hors site.

A ce stade, les procédés développés par la société sœur Lithium de France, ayant une maturité plus poussée, seront privilégiés.

4.4.2 Travaux concernant les éléments connexes

Les éléments connexes présentés dans la section 3 seront co-extraits en recherche de compatibilité avec l'extraction du lithium. Le lithium est l'élément prioritaire, si lors de sa concentration d'autres éléments viennent à être extraits ils seront valorisés.

L'objectif de 2gré est de co produire les minerais rares et stratégiques contenu dans la saumure géothermale afin d'offrir à la France un accès sécurisé à ces minéraux critiques, respectueux des réglementations environnementales et à un coût d'extraction compétitif. Les coûts d'exploration engagés pour la recherche de gîtes géothermiques dans le cadre du PER « Strasbourg » sont ainsi directement valorisables dans la recherche de minéraux de la demande de PER « La Plaine du Rhin ».

4.5 Secteur sud-ouest de l'Eurométropole de Strasbourg : Exemple des Projets d'Eckbolsheim et Hurtigheim

Plusieurs projets sont à l'étude sur le secteur sud-ouest de la demande de PER de Plaine du Rhin, dans la logique du PER sous-jacent géothermie de Strasbourg, dont deux projets à un stade avancé ; Eckbolsheim et Hurtigheim et d'autres cibles en cours de précision. La profondeur du doublet exploratoire sur ce secteur dépendra du choix final d'implantation.

4.5.1 Localisation du projet de forage géothermique d'Eckbolsheim

L'emplacement de ce projet se situe sur la commune d'Eckbolsheim, dans la zone dite « Arc Ouest » et « HautePierre ». La zone sélectionnée pour l'implantation a été choisie en étroite collaboration avec les services de la CUS et de la Mairie.

Cet ensemble de terrain est employé actuellement comme terrain agricole. Un grand projet d'urbanisation piloté par l'Eurométropole de Strasbourg traverse la zone sélectionnée. La superficie de la parcelle est de 25 458 m².

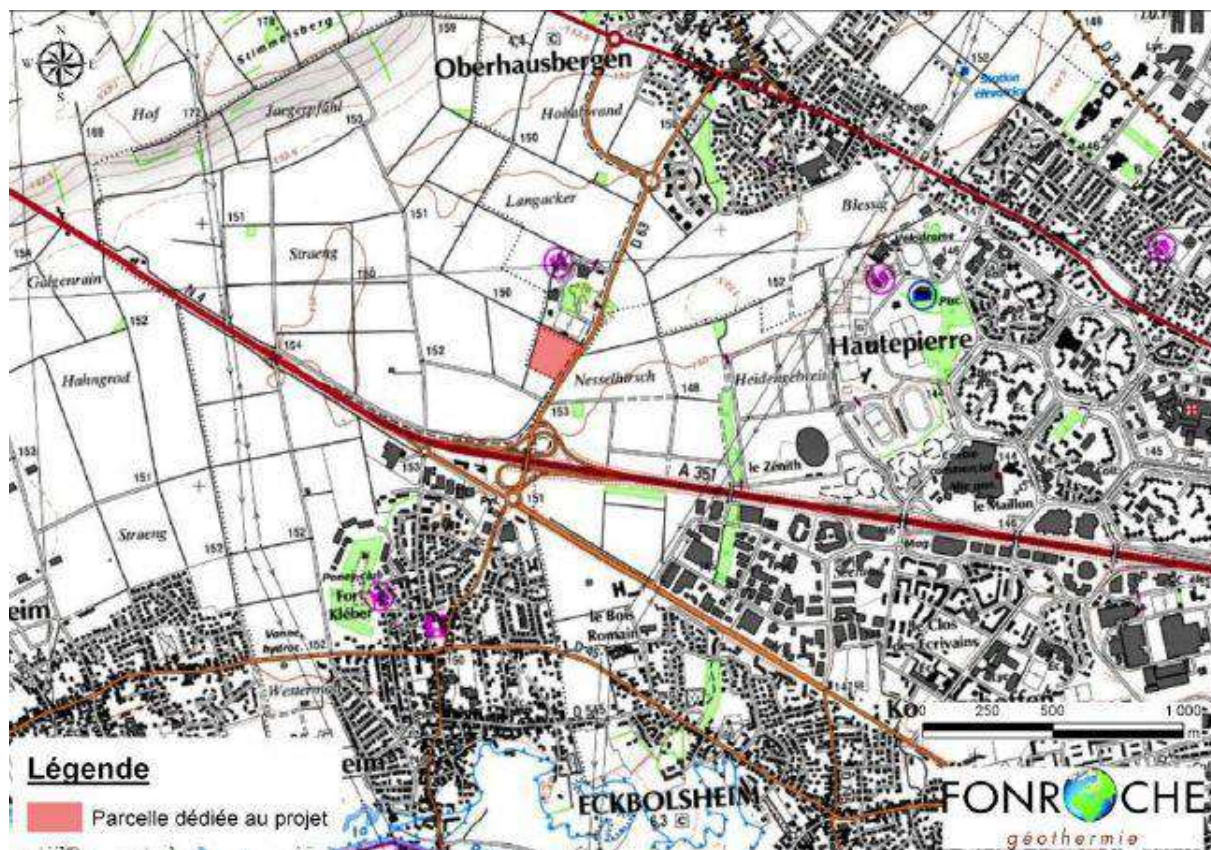


Figure 29: Situation de la parcelle dédiée au projet de Eckbolsheim

4.5.2 Localisation du projet de forage géothermique de Hurtigheim

La zone d'implantation du projet se situe à l'est de la commune de Hurtigheim au cœur de champs agricoles. Elle se positionne au sud de la RD 228 et se trouve à plus de 2500 mètres à l'Est des villages d'Ittenheim et de Hurtigheim.

Ce projet a fait l'objet d'un arrêté complémentaire concernant la sauvegarde du Grand Hamster d'Alsace valable jusqu'en Décembre 2019, date à laquelle la plateforme de forage devra avoir été construite et les mesures compensatoires consécutives mises en place.

La carte suivante présente la situation de la parcelle avec une photo satellite.

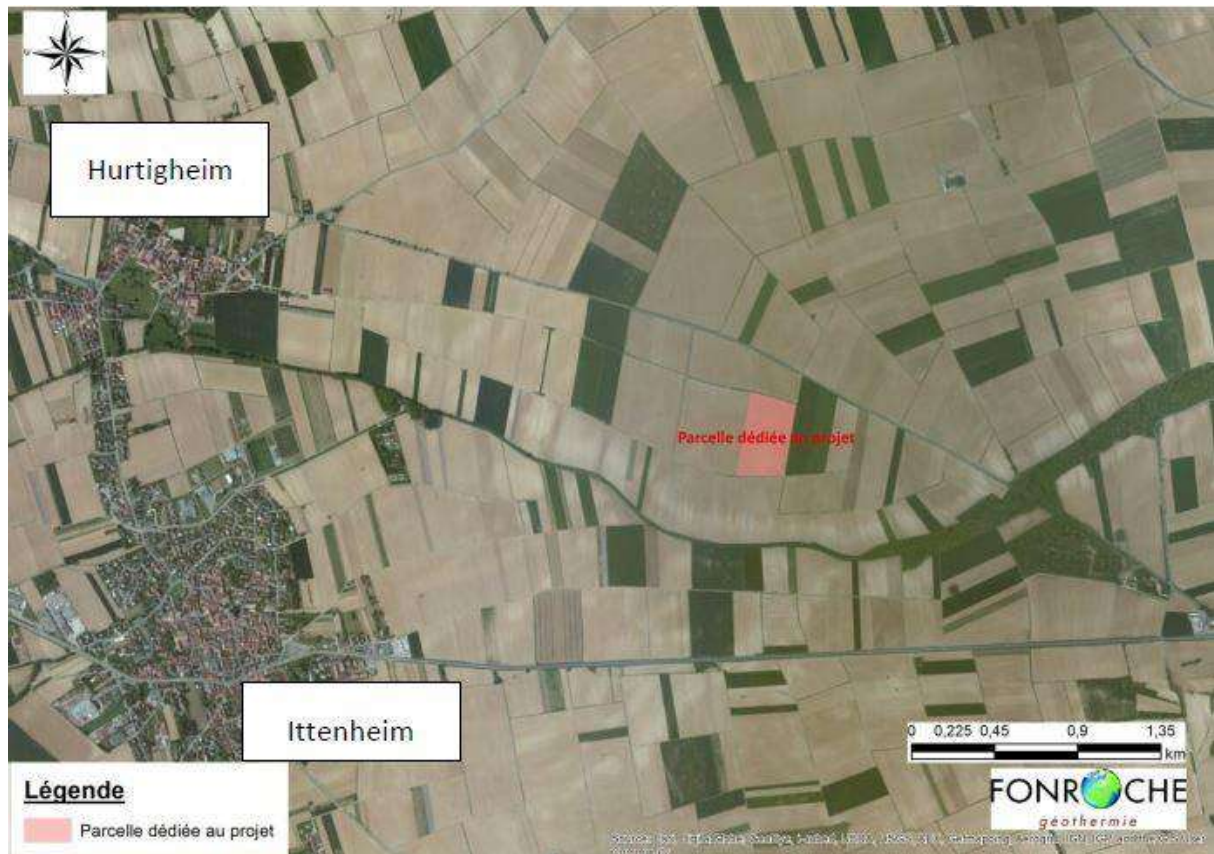


Figure 30: Situation de la parcelle dédiée au projet de Hurtigheim

4.5.3 Modèle géologique

L'étude de différents travaux (thèses, littérature scientifique, acquisitions géophysiques passées et puits pétroliers) et la réalisation de nouvelles études géophysiques ont permis de préciser les secteurs à fort potentiel et d'obtenir les autorisations de forage de « Eckbolsheim » et « Hurtigheim ».

Cette zone d'implantation Sud-Ouest a ainsi été choisie en raison :

- des températures importantes pouvant aller de 150 à 200°C à une profondeur de 3000 à 4000 mètres (toit du socle) ;
- de la présence de failles régionales à proximité ;
- de réseaux de distribution de chaleur à proximité
- d'un nombre important de consommateurs chaleurs potentiels.

Ce doublet est composé de deux drains suffisamment longs dans les zones réservoirs pour générer la perméabilité nécessaire en limitant le risque de sismicité induite. Ainsi le puits producteur puisera le fluide géothermal contenant le lithium et minerais connexes dans une faille principale, tandis que le puits injecteur le réinjectera dans une autre ou dans la même faille, après extraction du lithium, tout en conservant une distance de sécurité afin d'éviter un court-circuit thermique.

Le modèle géologique a été construit à partir des données de sismique réflexions acquises par Georhin en 2015, ainsi que des données disponibles sur l'ensemble du PER de Strasbourg (puits offset, anciennes ligne sismiques).

Les profondeurs finales visées par les deux projets sont susceptibles d'être modifiées, car dépendantes de la géologie rencontrée.

Il est à noter que les trajectoires définitives seront ajustées selon les résultats des études géophysiques de sismique réflexion « pseudo 3D » programmées en 2024 et 2025.

4.5.4 Surveillance microsismique

En janvier 2017, six mois avant le démarrage du premier forage sur le site de Vendenheim, le réseau sismologique permanent des projets d'Eckbolsheim et d'Hurtigheim a été installé (en parallèle de celui du site de Vendenheim) afin de suivre et d'étudier la sismicité naturelle du site. Ces stations de surveillance permettent un enregistrement continu et une transmission des données en temps réel. Sur cette période, aucun événement n'a été détecté.

Cette surveillance s'applique ensuite tout au long de la vie de la centrale : mise en place, stimulation du réservoir, production et post-production.

Le premier objectif de cette surveillance est d'effectuer un suivi passif de l'évolution de la sismicité induite lors de la réalisation ainsi que de la mise en circulation du fluide lors de l'exploitation. Le but est de fournir des images des localisations dans l'espace et le temps de la position du front de la zone active et de contrôler le développement de cette zone identifiée.

4.5.4.1 Le réseau de surveillance

Réseau permanent

Un premier réseau a donc été installé pour les projets d'Eckbolsheim et d'Hurtigheim en 2017 (en parallèle du réseau de Vendenheim). Les stations sismologiques sont disposées de part et d'autre du réservoir visé, de façon à enregistrer convenablement tous les signaux. Les 4 types de capteur utilisés sont les suivantes : Les 4 types de capteur utilisés sont les suivants : sismomètre courte période (CP) fond de trou (DH) ou de sub-surface, sismomètre large bande (BBS) et accéléromètre.

Ces capteurs sont constitués de trois composantes (3C) qui renseignent les données dans les trois directions de l'espace. Aussi, ils possèdent des gammes de fréquences complémentaires permettant d'enregistrer les signaux de : 0,008 à 1000 Hz.

Ce réseau permanent de surveillance microsismique est complété par une surveillance géodésique. Elle est équipée d'une antenne géodésique GNSS et d'un « corner cube » pour le suivi InSAR.

Réseau complémentaire

Un réseau complémentaire et mobile sera installé. Il se composera de SmartSolo, capteurs sismiques autonomes à 1 ou 3 composantes (1C ou 3C), sensibles aux fréquences à partir de 5 Hz.

Réseau citoyen

Durant les phases d'essais, il est possible d'intégrer un réseau citoyen (notamment le réseau AM). Composé d'environ 10 stations 1C et 3C ainsi que des capteurs de type géophone et accéléromètre.

Le planning

La mise en place de la surveillance microsismique se déroulera selon les étapes décrites ci-dessous :

- Etape 1 : design du réseau temporaire, permittage, communication.
- Etape 2 : réactivation des stations HURT1, HURT3, ECK3, réinstallation des stations ECK1 et ECK5 et mise à jour du système d'acquisition des données sur le serveur.
- Etape 3 : tests de calibration de surface (orientation des capteurs, anomalies de surface) et de profondeur (modèle de vitesse).
- Etape 4 : Mise à jour des outils de traitement et analyses pour obtenir une référence pour le suivi de la sismicité induite :
 - observation de la sismicité naturelle
 - mesure du bruit de fond en continu
 - calcul de la sensibilité de détection
- Etape 5 : Phase d'observation permettant de définir des seuils d'alerte et mise à jour des procédures associées.
- Etape 6 : Ecoute et analyse en temps réel de la microsismicité induite et naturelle. Les opérations en surface pourront être ajustées en conséquence voire stoppées en cas de crise microsismique.

4.5.4.2 Gestion du risque

Protocole de surveillance

Cette surveillance microsismique s'inscrit dans une démarche de prévention et de gestion de risques potentiels. Elle permet une adaptation en temps réel des opérations afin de limiter le risque de ressenti d'une sismicité induite éventuelle par la population.

La gestion de la sismicité est réalisée en fonction du TLS (traffic light system) dont les seuils de magnitude ont été réduits par rapport à l'AP. En fonction du statut de la variable, les décisions à prendre et les démarches à suivre sur les opérations sont définis selon : le signalement interne, la communication externe et la mise en œuvre des actions sur les opérations. Le protocole (Figure 31) est basé sur un système d'alerte TLS mixte utilisant les critères (variables) suivants :

- Seuils selon : la magnitude locale verticale (MLv) et le peak ground velocity (PGV).
- Prise en compte de la distance aux puits, de l'évolution d'essaims naturels et de l'apparition d'un nouvel essaim.
- Intégration du paramètre « énergie mécanique injectée » dans le réservoir pour comparaison avec l'énergie radiée sismiquement.
- Règle prudentielle : définition du taux de sismicité induite et naturelle acceptable.

Réseau de mesure des vibrations par rapport à l'habitat

Un réseau parallèle de mesure du risque sur l'habitat (type SUV) sera mis en place. Il consiste en la pose de stations de mesure des vibrations (géophone) directement au niveau des infrastructures. Le choix de ces dernières sera discuté et englobera différents types de bâtis.

Une première phase d'ajustement des seuils de déclenchement est nécessaire, la surveillance est opérée de façon continue avec une évaluation des vibrations selon la norme DIN 4150. La solution comprend un système de transmission des données, de traitement du signal, de sauvegardes, d'envoi d'alertes, de rapports et de notification client.

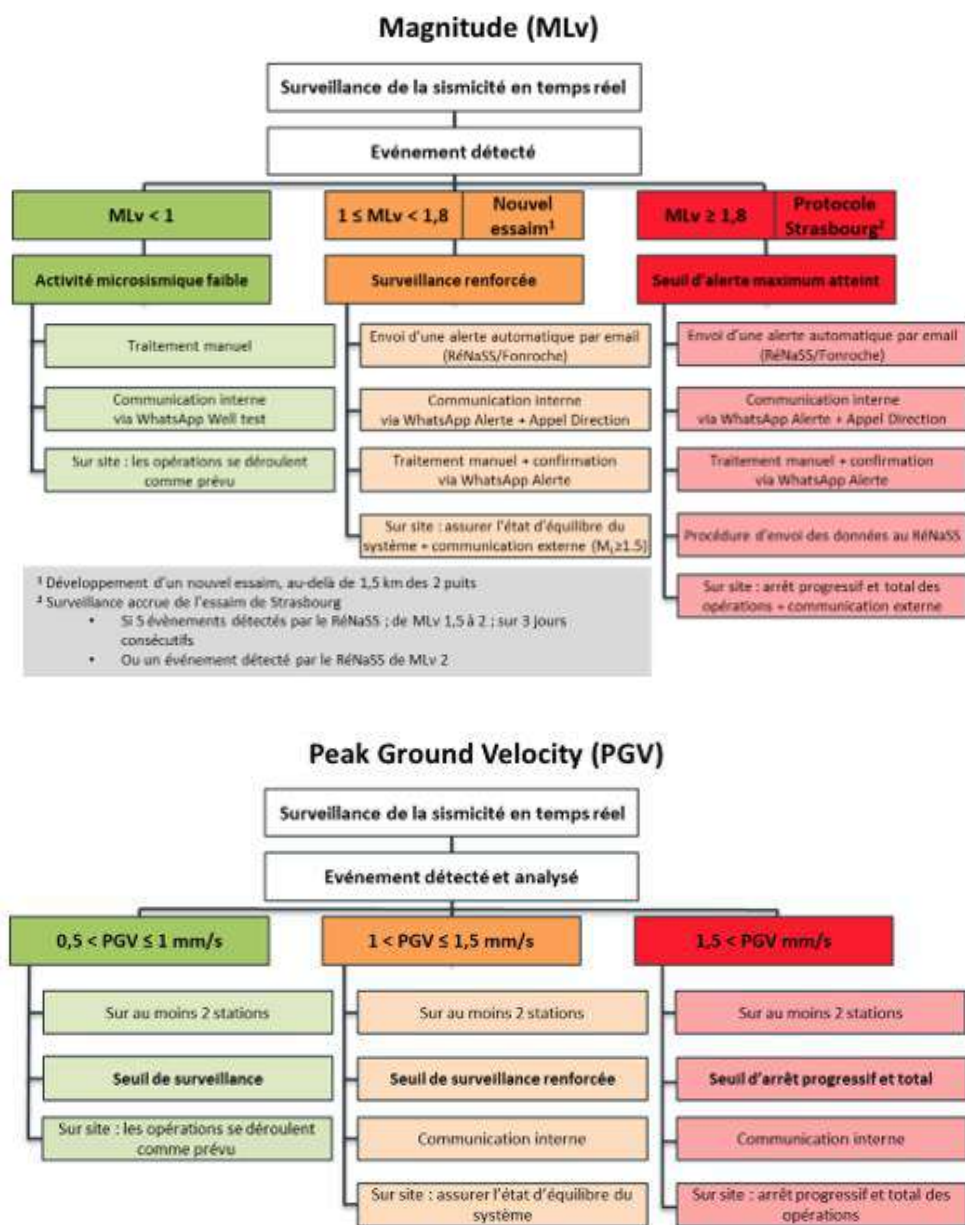


Figure 31 : Traffic Light System basé sur la magnitude (en haut) et sur le PGV (en bas).

4.5.5 Etude de l'aléa sismique sur le secteur ouest du PER

Afin de définir la notion d'aléa sismique, au regard des autorités nationales, nous proposons d'utiliser un extrait du guide méthodologique (dans sa version provisoire) mandaté par la DGPR :

« 3.2 DEFINITIONS ET GRANDEURS CARACTERISTIQUES DE LA SISMICITE

3.2.1 L'aléa et le risque sismique

L'évaluation du risque sismique consiste d'une part à analyser la probabilité d'occurrence d'un séisme d'intensité donnée en un lieu donné (aléa) et d'autre part à estimer la vulnérabilité physique, fonctionnelle (réseaux) et

sociale des enjeux exposés (conséquences sur les hommes, les constructions et l'environnement). Ces enjeux peuvent être de nature humaine, économique, ou même patrimoniale.



Figure 32: L'aléa sismique

Pour le cas particulier de la sismicité induite par les activités anthropiques, au-delà de ces enjeux, il faut aussi prendre en compte la perception humaine, la sensibilisation et le contexte local du projet avec ses conséquences sur la population (Cf. annexe du rapport Maury et Branchu, 2020).

La magnitude caractérise l'énergie du séisme libérée sous forme d'ondes. Elle est calculée à partir des ondes enregistrées par les sismomètres. Il existe plusieurs types de magnitudes qui diffèrent par la méthode de calcul employée. Cela explique pourquoi, pour un même séisme plusieurs valeurs de magnitude peuvent être données. La magnitude de richter est la plus ancienne et la plus connue du grand public mais elle devient moins utilisée par les sismologues. Depuis quelques années, la magnitude de moment est la référence internationale, étant la seule réellement reliée à la surface et à l'amplitude de la rupture. D'un point de vue pratique, la magnitude locale est la plus utilisée, car elle est calculée plus facilement et rapidement, en particulier dans un contexte opérationnel. A noter que dans la suite de ce guide, le terme générique de magnitude sera utilisé pour tous types de magnitudes. Augmenter la magnitude d'une unité équivaut à multiplier par 32 l'énergie libérée : un séisme de magnitude 4 libère 32 fois plus d'énergie qu'un séisme de magnitude 3 et 1000 fois plus d'énergie qu'un séisme de magnitude 2. La magnitude permet aussi d'apprécier les dimensions de la faille activée.

En général, la microsismicité couvre les séismes dont la magnitude ne dépasse pas une valeur proche de 2, équivalant à la rupture d'une faille sur une longueur d'une cinquantaine de mètres avec un déplacement de quelques millimètres de part et d'autre de la surface de rupture. »

4.5.5.1 Limites de l'étude géomécanique avant forage

Ces résultats préliminaires indiquent un état de stabilité des failles ciblées sur les projets d'Eckbolsheim et Hurtigheim. Au regard du retour d'expérience du site de Vendenheim, où la stabilité des failles principales avant forage était annoncée par l'étude géomécanique, la présence potentielle de réseaux de failles secondaires dans le socle au potentiel de sismicité avéré peut modifier le potentiel de sismicité induite suite à l'injection.

En effet, ces structures d'orientation N040, N070 et N130 non visibles car non détectables au moyen de la sismique réflexion 2D conventionnelle, ont porté la sismicité ressentie et ont été révélées par l'analyse a posteriori des mécanismes au foyer.

Afin de renforcer l'étude géomécanique et la connaissance de l'aléa sismique sur les sites d'Eckbolsheim et Hurtigheim, Georhin a déposé une déclaration de levé géophysique de sismique réflexion pseudo 3D qui devrait permettre une meilleure caractérisation du réservoir et des failles secondaires, après calage sur la zone Nord de l'EMS qui comportent le plus d'information géosciences sur le territoire de l'EMS.

Grâce à la cartographie de ce système de failles potentiellement sismogènes du socle hercynien, il sera possible d'inclure ces structures dans une analyse géomécanique actualisée dans l'objectif d'évaluer l'aléa sismique le plus complet possible.

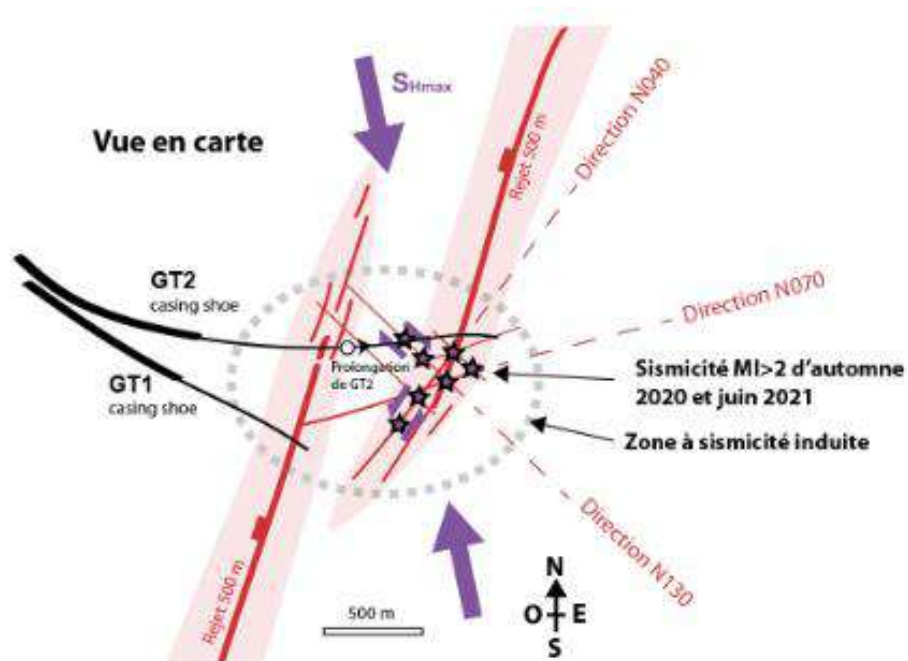


Figure 33: Schéma de synthèse de la zone de failles sur le site de Vendenheim issu du rapport du comité d'experts du 28 mars 2022.

4.5.6 Surveillance de la nappe

4.5.6.1 Projet d'Eckbolsheim

Dimensionné pour assurer un suivi qualitatif et quantitatif de la nappe alluviale rhénane, en accord avec l'Article 16.7 de l'arrêté du 14 Octobre 2015, 3 piézomètres ont été réalisés.

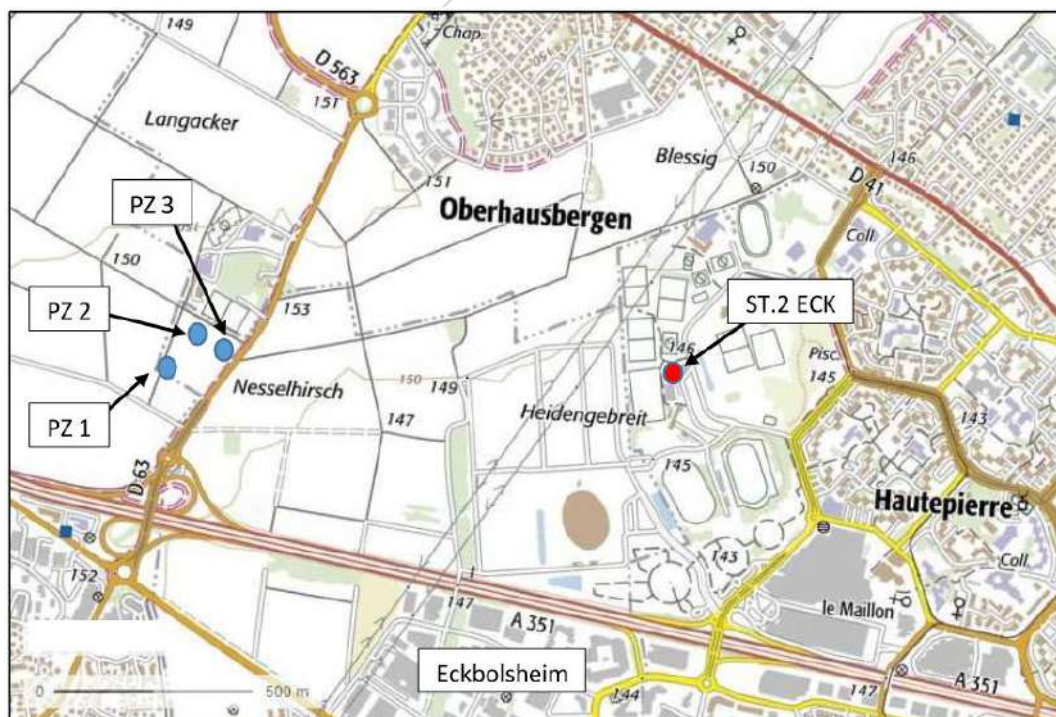


Figure 34 : Localisation des piézomètres constitutifs du réseau de surveillance de la nappe sur le projet d'Eckbolsheim.

Ces piézomètres font l'objet de prélèvements bimensuels, analysés pour constituer la composition de référence de la nappe à proximité de l'implantation du projet, depuis juillet 2017.
Les coordonnées en longitude/latitude, relevées par un GPS de terrain, sont les suivantes (altitude au sol de l'ordre de 150 m) :

4.5.6.2 Projet d'Hurtigheim

Les forages superficiels, ont été effectués dans le cadre de la préparation du chantier d'un doublet géothermique profond appelé « Projet de Hurtigheim ».

Il s'agit de la réalisation de 3 piézomètres profonds, atteignant le substratum de la nappe, dans l'objectif de permettre un contrôle qualitatif et quantitatif de la nappe. Ces 3 piézomètres captent toute la hauteur des alluvions rhénanes. Ils ont été réalisés en novembre 2017.

Les sites des forages ont été définis par Georhin et les implantations sont indiquées sur la Figure 35.
Un échantillon de terrain a été prélevé à chaque mètre traversé par l'entreprise de forage et disposé au sol. Un prélèvement et conditionnement a été effectué sur chacun des échantillons issus du piézomètre 1.



Figure 35: Vue générale des implantations piézométrique (d'après vue aérienne Google Earth).

4.6 Réalisation sur la Partie Nord du PER de Strasbourg

4.6.1 Projet de faisabilité et d'implantation à proximité de Haguenau

Le secteur de Haguenau a fait l'objet d'une pré-étude de faisabilité structurale et thermique (Figure 36). Cette étude a clairement défini un potentiel géothermique important au droit de Haguenau, avec une température de l'ordre de 200°C en fond de bassin.

Sur cette base, le potentiel industriel de distribution de chaleur a été identifié, synthétisé sur la Figure 37.
Les prochaines étapes sont les suivantes :

- Acquisition géophysique 3D et construction d'un modèle de réservoir
- Définition des cibles géothermiques potentielles et modélisation préliminaire du réservoir
- Définition d'un programme préliminaire de forage
- Définition de parcelles d'implantation en fonction de la disponibilité foncière et du potentiel d'utilisateurs de chaleur et maîtrise foncière
- Elaboration d'une Demande d'Autorisation d'Ouverture de Travaux Miniers (DAOTM)

- Définition d'un programme d'exploration géophysique (levé géophysique)
- Interprétation et modélisation géologique
- Choix de la parcelle de forage
- Définition d'un programme de forage

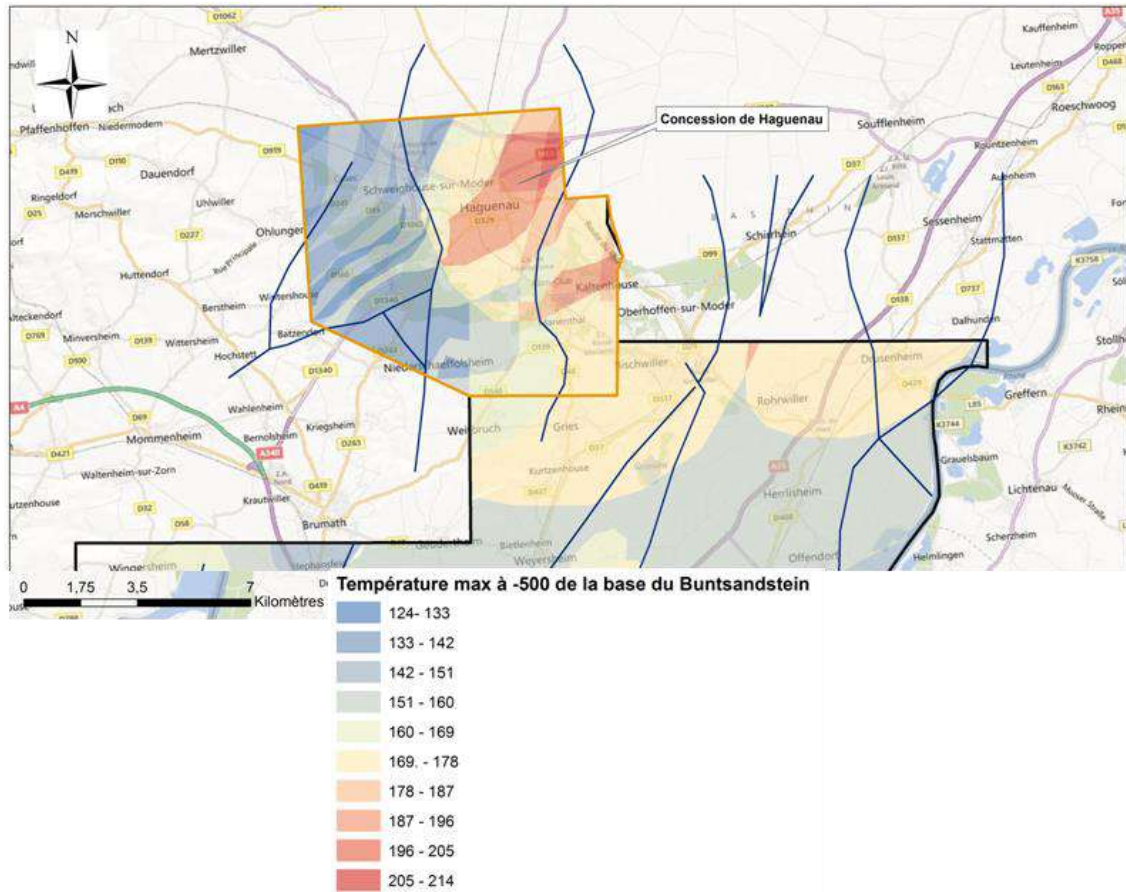


Figure 36: Schéma structural et thermique à proximité d'Haguenau

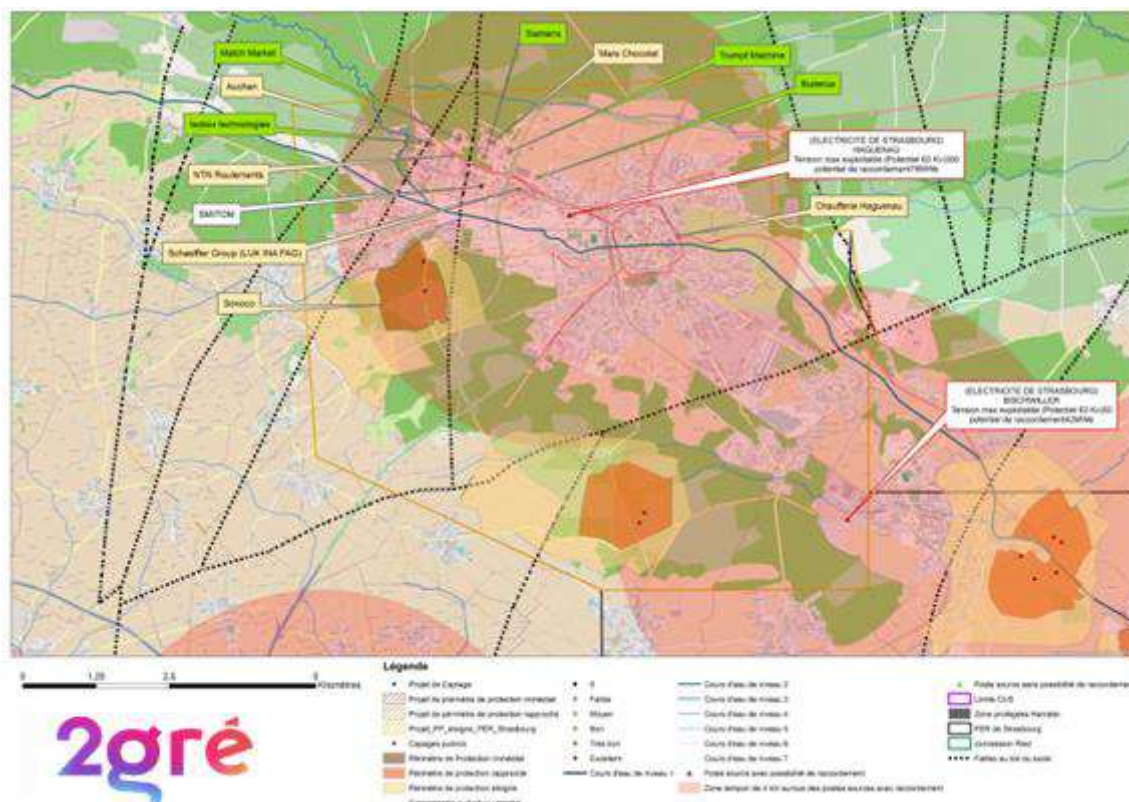


Figure 37: Potentiel de consommation de chaleur et postes sources à proximité d'Haguenau

4.6.2 Secteur de Bischwiller/Herrlisheim

Le premier forage VDH-GT1 réalisé sur l'ancienne raffinerie de Reichstett-Vendenheim a confirmé le potentiel de la faille ciblée pour ce projet à fournir les concentrations en lithium nécessaires.

La Figure 38 suivante présente le modèle géologique basé sur la sismique réflexion et la localisation de la faille ciblée durant le forage VDH-GT1. La faille régionale visée durant le forage VDH-GT1 s'étend au-delà de la limite Nord du PER de Strasbourg.

Les données du modèle régional GeORG sont issues des anciennes lignes sismiques disponibles sur le secteur du bassin rhénan. Les lignes sismiques utilisées sont présentées dans la Figure 39.

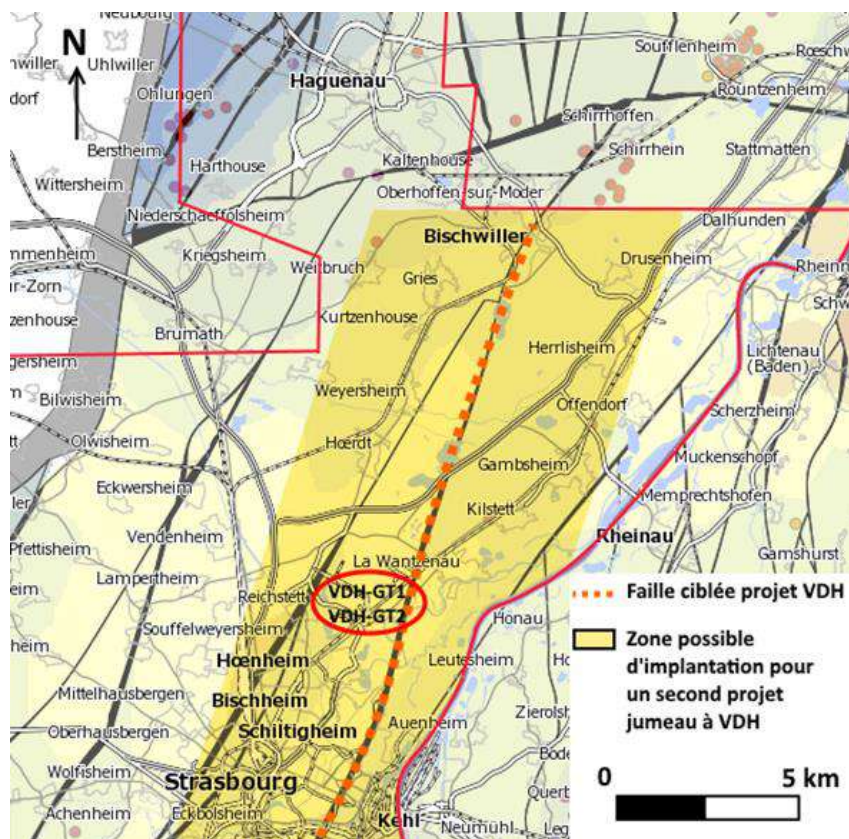


Figure 38: Localisation de la faille ciblée pour le doublet géothermique de Vendenheim et zone d'implantation possible pour de futurs clusters géothermiques.

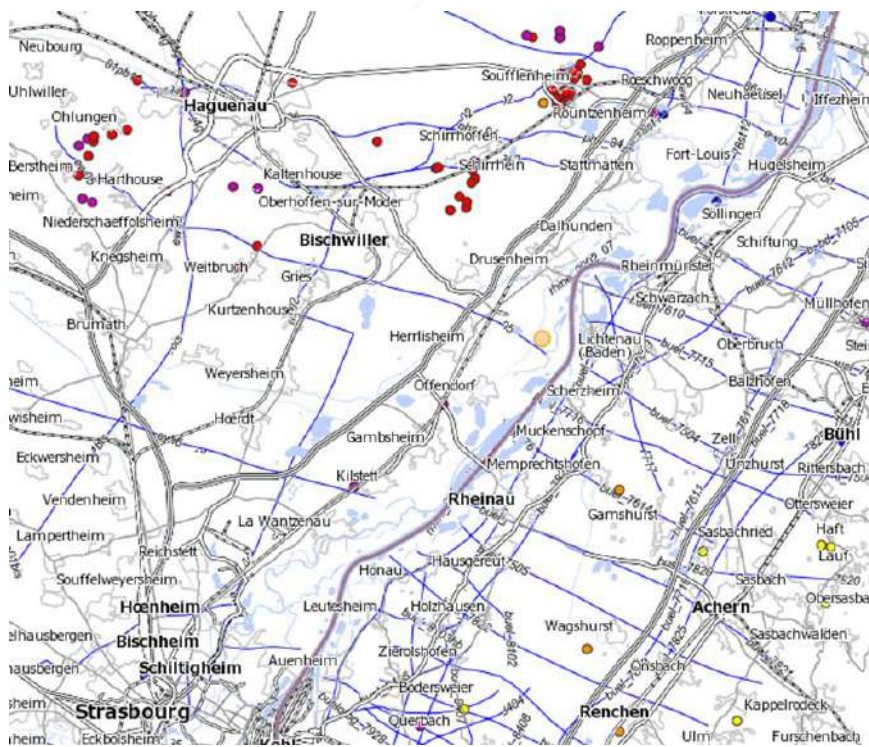


Figure 39: Localisation et mise en évidence des lignes sismiques utilisées dans la création du modèle structural GeORG.

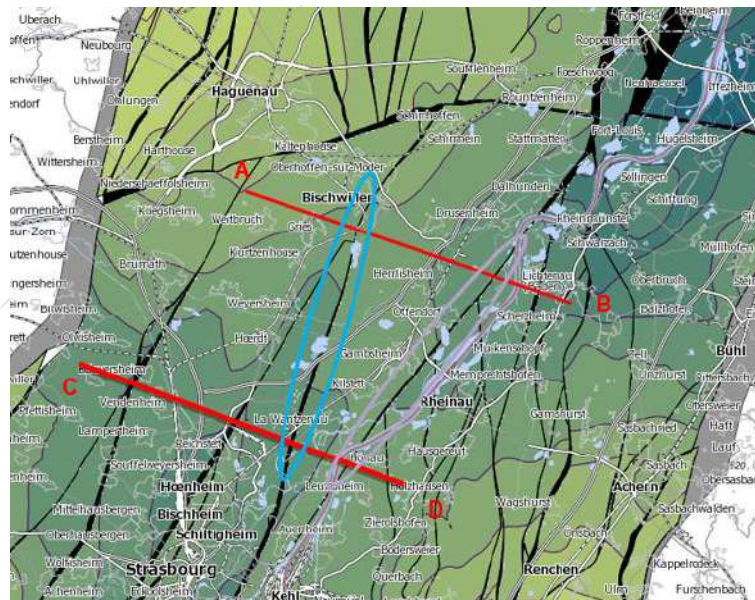
La parcelle d'intérêt faisant l'objet de cette étude est située sur une ancienne ligne sismique (phs84p, 75st5) d'orientation NW/SE opérée par CGG. Cette ligne sismique n'est pas dans la base de données acquises par Georhin dans la création du modèle sur le projet de Vendenheim. La coupe AB (Figure 40, b) correspond à la coupe verticale suivant cette ligne sismique en surface.

La Figure 40 suivante présente les localisations et l'agencement du système de failles de coupes géologiques verticales AB et CD du bassin Rhénan sur le secteur concerné. En bleu est identifiée la faille cible pour le projet VDH-GT1, en violet une faille majeure d'orientation NE-SW à pendage SE.

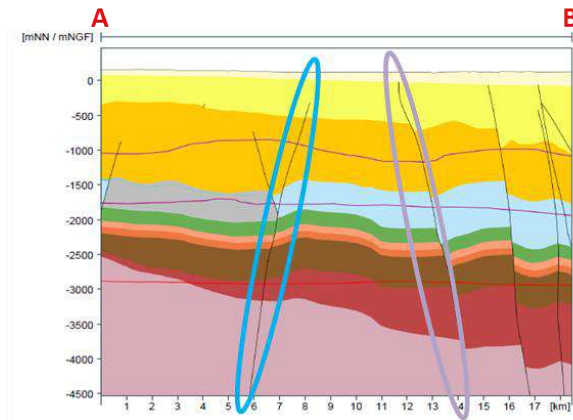
Ces coupes mettent en évidence l'atténuation du rejet de la faille cible VDH-GT1 sur son extension Nord (coupe AB) ainsi qu'une remontée du toit du socle (3000m).

En revanche la faille identifiée en violet présente un rejet plus important sur sa portion Nord (coupe AB) que sur sa portion Sud (coupe CD). La profondeur au toit du socle semble également plus intéressante, aux alentours de 3700 mTVD.

a)



b)



c)

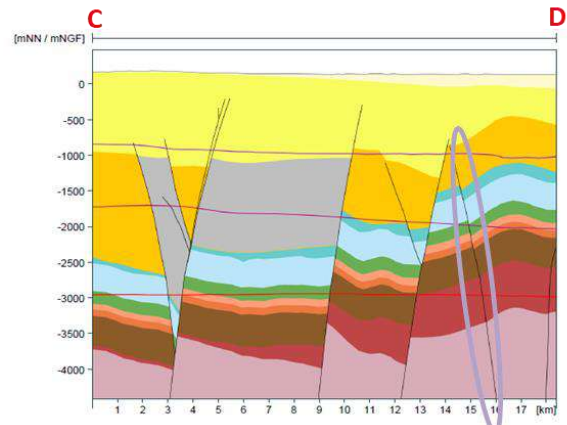


Figure 40: a) Carte structurale au toit du socle d'après GeORG, localisations des 2 coupes (AB) et (CD). b) Coupe géologique verticale AB. c) Coupé géologique verticale CD.

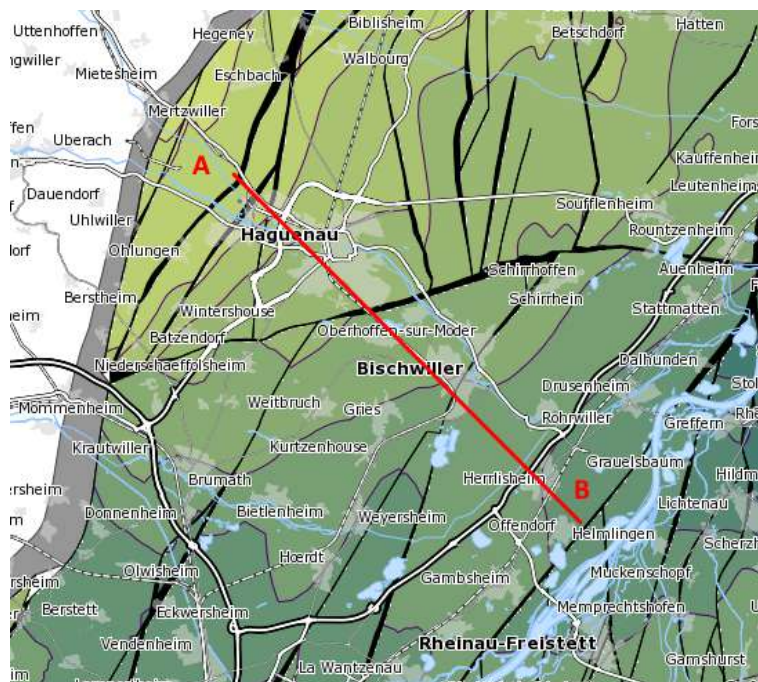
Au regard de ces premières observations, on peut dire :

- **Faïlle encadrée en bleu :** la distance trop éloignée de la faille ciblée sur VDH-GT1 par rapport au secteur identifié (4km) couplée à la remontée du socle sur le secteur de Herrlisheim, ne sont pas favorables à l'implantation d'un projet sur cette faille.
- **Faïlle encadrée en violet :** Avec une profondeur au toit du socle située autour de 3700m et une distance d'environ 1km de la parcelle d'intérêt, il pourrait éventuellement être intéressant de venir affiner la géométrie de cette faille grâce à l'acquisition de la ligne sismique identifiée précédemment (Synthèse du potentiel géothermique sur le secteur nord du PER de Strasbourg).

Le secteur nord du PER de Strasbourg présente un potentiel géothermique, étant donné l'anomalie du gradient géothermique identifié

Il semble à ce stade, et sous réserve de la mise en œuvre de la campagne géophysique pseudo 3D que les zones d'Herrlisheim et de Haguenau soient très favorables à l'implantation d'un doublet géothermal pour chacune d'elle et en font désormais une cible prioritaire pour 2gré.

a)



b)

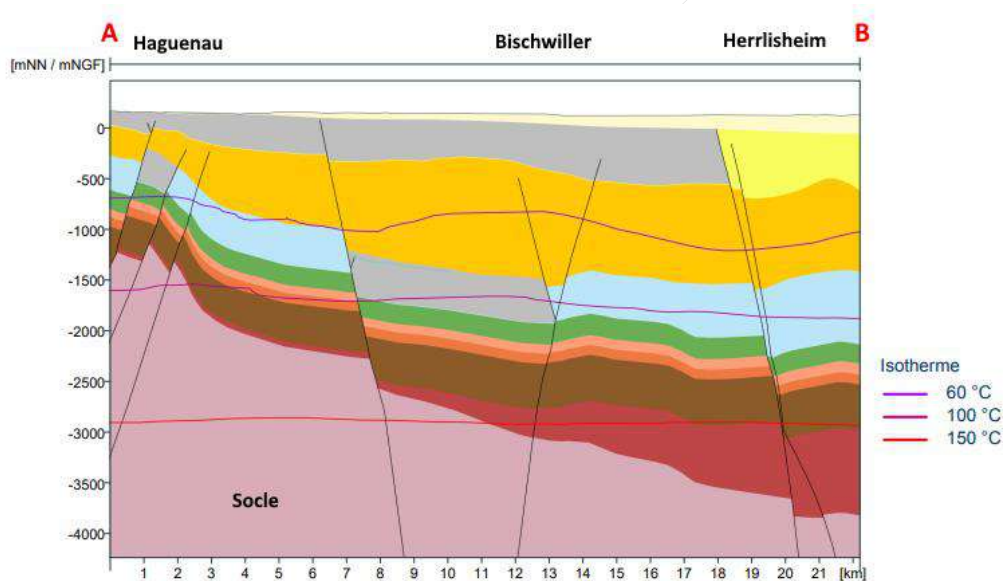


Figure 41: a) Coupe géologique NW-SE allant de Haguenau jusque Herrlisheim. b) Coupe géologique verticale AB

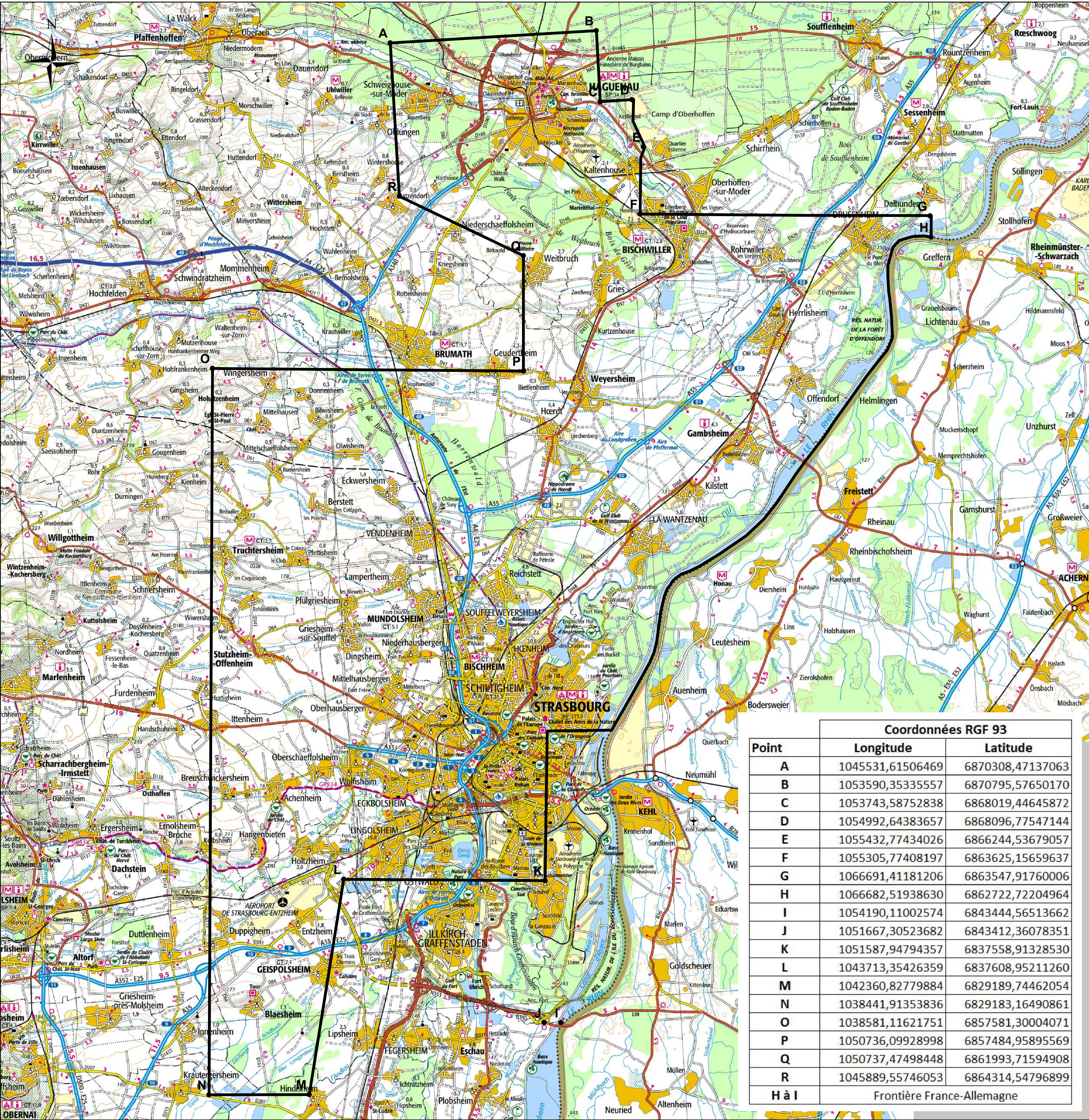
ANNEXES

- Carte du PER dit de « La Plaine du Rhin » au 1/100.000 °



Carte du Permis Exclusif de Recherche de lithium et Connexes dit de la "Plaine du Rhin" au 1/100 000

2gré



PER Minier de la Plaine du Rhin

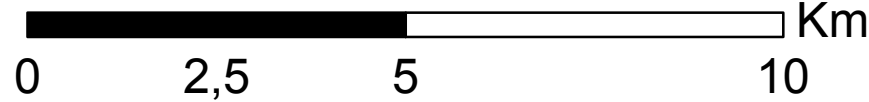
Carte du Permis Exclusif de Recherche Minier dit de "La Plaine du Rhin" au 1 / 100 000

2gré

Légende

Périmètre du PER dit de la Plaine du Rhin

Points délimitants le PER dit de la Plaine du Rhin



La superficie du périmètre du permis dit de "La Plaine du Rhin" est de 554 km²