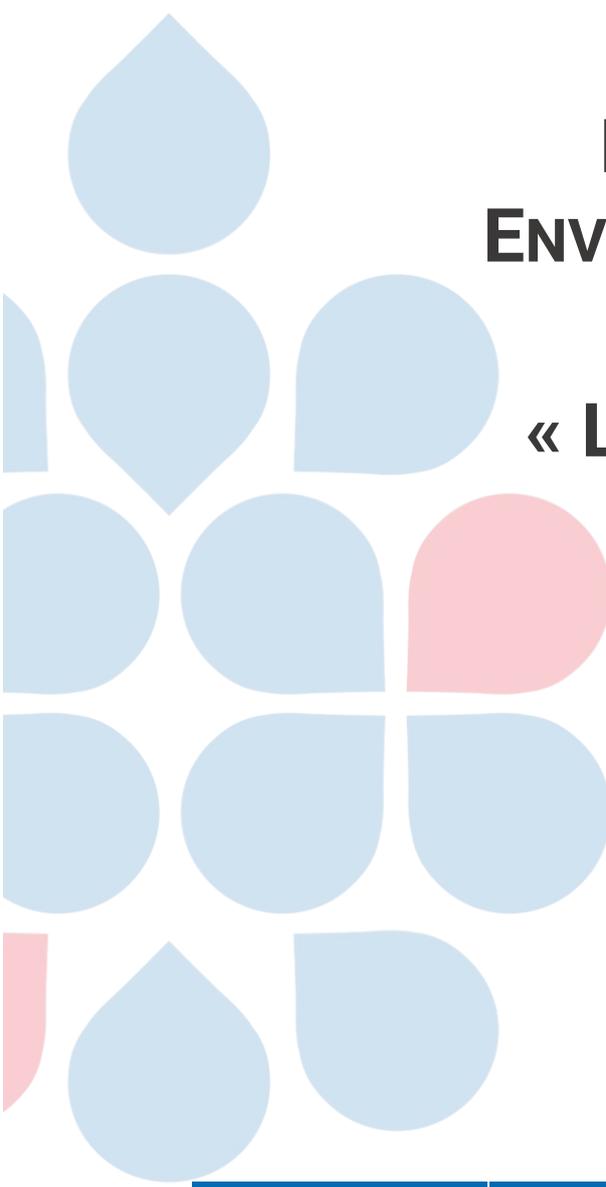


**DEMANDE D'AUTORISATION
ENVIRONNEMENTALE
D'OUVERTURE DE TRAVAUX
MINIERS « LES POTERIES
EXPLORATION »**

2

Note de
présentation non
technique



DEMANDE D'AUTORISATION ENVIRONNEMENTALE D'OUVERTURE DE TRAVAUX MINIERS « LES POTERIES EXPLORATION »

2 Note de présentation non technique

Référence interne	Rédacteur	Vérificateur	Approbateur
LPX_AE_002_Doc2_V1	Jeanne Vidal Gwendoline Wattelle Nicolas Wynants	Jérôme Jacquemont Laurent Nicolas	Guillaume Borrel

Date	Destinataire	Organisme
27/12/2024	M. le Préfet	Préfecture du Bas-Rhin
27/12/2024	Mme. Jacquot	DREAL – Grand Est



TABLE DES MATIERES

1	Introduction générale	6	6	Prévention de la sismicité induite	32
1.1	Lithium de France	6	6.1	Sismicité naturelle.....	32
1.2	L'ambition de Lithium de France en Alsace du Nord	7	6.2	Sismicité induite.....	33
1.3	Un projet de territoire	9	6.3	Bruit ambiant	34
1.4	Le projet « Les Poteries Exploration »	11	6.4	Configuration du réseau de stations de surveillance sismique en fonction du forage, développement et exploitation	35
2	Contexte réglementaire.....	12	6.5	Evaluation de l'aléa sismique avant forage	37
2.1	Etapes clés d'un projet de coextraction de chaleur et de lithium géothermal.....	12	6.6	Evaluation de l'aléa sismique post-forage.....	38
2.2	Autorisation Environnementale de travaux miniers	14	6.7	Protocoles opérationnels et systèmes de feux de signalisation (TLS) 39	39
2.3	Composition du dossier d'autorisation environnemental « Les Poteries Exploration »	15	6.8	Conclusions du rapport d'expertise	40
3	Identification de la ressource géothermale	16	7	Gouvernance des données et mise à jour des modèles	42
3.1	Préparation du dossier et suivi des recommandations	16	8	Prévention des risques généraux.....	43
3.2	Présentation du champ géothermal du Fossé rhéna	17	8.1	Plan d'Urgence	43
3.3	Etudes d'exploration réalisées depuis l'octroi du PER « Les Poteries »	19	8.2	Le Document Unique (DUERP)	43
3.3.1	Acquisition de données historiques.....	19	9	Bibliographie.....	44
3.3.2	Acquisition de la ligne S2D2023.....	20			
3.3.3	Campagne de mesure du bruit ambiant	20			
4	Localisation du projet.....	21			
5	Programme des travaux.....	22			
5.1	Travaux préliminaires de préparation du site	22			
5.2	Réalisation du forage exploratoire	26			
5.3	Acquisitions de données.....	29			
5.4	Arrêt des travaux	30			
5.5	Planning prévisionnel des opérations	31			

TABLE DES FIGURES

Figure 1.1 : L'ambition du projet global de Lithium de France	8
Figure 1.2 : localisation géographique des quatre PER de Lithium de France	10
Figure 1.3 : Carte de localisation des explorations réalisées par Lithium de France dans le nord de l'Alsace et des données historiques achetées	11
Figure 2.1 : Cycle de vie d'un projet de géothermie	13
Figure 3.1: Carte de la partie centrale du Fossé rhénan d'après Richard et al. (2024). Les isothermes à 2 km sont indiquées d'après Baillieux et al. (2013). Les traces des failles principales au toit du socle est indiquée d'après le géoportail GeORG (GeORG Team, 2017). Les caractéristiques forages et des fluides sont indiquées d'après Bosia et al. (2021), Pauwels et al. (1993), Sanjuan et al. (2021, 2016).....	17
Figure 3.2 : Coupe schématique O-E des circulations de fluides à l'échelle du Fossé rhénan.....	18
Figure 3.3 : Coupe NO-SE de l'écoulement des fluides au niveau du projet « Les Poteries Exploration » (LPX), Soultz-sous-Forêts (SsF) et Rittershoffen (R) (Freymark et al., 2019)	18
Figure 3.4 : Données acquises dans le cadre de la campagne d'exploration du projet « Les Poteries Exploration ».....	19
Figure 3.5 : Carte de la position des 200 capteurs WiNG dans le cadre de la campagne de mesures de bruit sismique réalisée en juin 2024 sur le PER « Les Poteries ».	20
Figure 4.1 : Carte de localisation du projet sur la commune de Soufflenheim	21
Figure 5.1 : Les grandes phases du projet exploratoire "Les Poteries Exploration"	22
Figure 5.2 : Plan de masse de la phase chantier.....	23
Figure 5.3 : Vue globale du chantier de forage avec l'appareil ADS B04	26
Figure 5.4 : Modélisation de l'appareil de forage au droit du site en sortie Sud de Soufflenheim.....	27
Figure 5.5 : Cuvelage du puits GPX.....	28
Figure 5.6 : Données acquises dans le forage exploratoire afin de caractériser le réservoir et la ressource. Les exemples d'imageries de paroi et la carotte sont issus de la publication de Vidal et al. (2017). ¹	30
Figure 5.8 : Planning prévisionnel du projet exploratoire sur le PER "Les Poteries"	31
Figure 5.7 : Schéma simplifié de fermeture du puits GPX.....	31
Figure 6.1 : Localisation des séismes naturels de magnitude supérieure ou égale à 2.5 entre 1980 et 2024 dans le Bas-Rhin et ses environs.	32
Figure 6.2 : Séismes induits extraits des catalogues Réness depuis 2012 jusqu'en juillet 2024 autour du site et leur impact potentiel sur le site d'étude en termes de PGV. Les magnitudes de moment (Mw) sont comprises entre 0.9 et 3.6.....	33
Figure 6.3 : Cartes du bruit sismique à 10 Hz et 30 Hz pour un jour de semaine pendant a) la période silencieuse (percentile 16), b) la période intermédiaire (percentile 50), c) la période bruitée (percentile 84). Les cercles sont centrés sur la coordonnée du fond du puits GPX et sont espacés de 1 km.	34
Figure 6.4 : Localisation des 7 stations prévisionnelles pour le projet « Les Poteries Exploration » ainsi que des stations sismologiques existantes des réseaux publics et privés à proximité.	35
Figure 6.5 : Cartes de magnitude de complétude à différentes profondeurs (2 et 3 km), réalisées à partir des niveaux de bruit médians (percentile 50, a et b) et en période bruitée (percentile 84, c et d) simulée avec la station 4 à 100 m de profondeur.	36
Figure 6.6 : Arbre de décision pour l'évaluation du niveau d'aléa d'un projet avant tout forage profond d'après Maury et al., (2023).....	37
Figure 6.7 : Arbre de décision prévisionnel pour l'évaluation post-forage du niveau d'aléa du projet « Les Poteries Exploration ». Cette évaluation sera mise à jour après le forage et les premiers tests hydrauliques de caractérisation du réservoir et transmise à la DREAL et à la préfecture....	38

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 5.1 : Caractéristiques technique de l'architecture du puits GPX ..28

Tableau 6.1 : Seuils du TLS proposés pour le projet « Les Poteries Exploration » avec les PGVs et les magnitudes estimés..... 39

GLOSSAIRE ET ABREVIATIONS

Accéléromètre	Capteur permettant de mesurer l'accélération du sol produite par des ondes sismiques.
Bruit ambiant	Ensemble de vibrations acoustiques permanentes du sol causé par des phénomènes naturels (vent, vagues, ...) et par l'activité humaine.
Cube géologique 3D	Image en 3D du sous-sol obtenue après traitement des données acquises lors d'une campagne d'exploration active 3D. Il est souvent fait référence à une « échographie » ou une « imagerie » du sous-sol. Le volume obtenu permet de voir les différentes couches et structures géologiques situées au droit de la zone d'acquisition.
Diagraphie	Mesure de paramètres physiques dans un forage.
Direct Extraction (DLE)	Lithium Technique consistant en plusieurs procédés chimiques permettant de produire rapidement du lithium isolé sous des formes commercialisables.
Direction générale de l'aménagement, du logement et de la nature (DGALN)	Direction d'administration centrale française qui octroie les PER de « mines » de lithium et substances connexes.
Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC)	Direction d'administration centrale française qui octroie les PER de gîtes géothermiques.
Doublet	Ensemble de 2 puits, un producteur et un injecteur
Eaux météoriques	Eau issue du ruissèlement direct des eaux de pluie et leur infiltration.
Ecart azimutal	Angle maximal entre les segments de droite reliant l'épicentre d'un séisme et les stations d'un réseau de stations de surveillance sismique ayant enregistrées l'évènement. Il informe sur la précision de la localisation d'un évènement sismique.
Epicentre	Projection en surface de la localisation du foyer (ou hypocentre) d'un séisme.

Fluide de forage

Fluide, aussi nommée "boue de forage", injecté par l'appareil de forage, au travers des garnitures tubulaires jusqu'à la zone de découpe de la roche, permettant l'évacuation des déblais de forage et leur remontée en surface.

Gaz à effet de serre (GES)

Gaz présent dans l'atmosphère qui retient dans l'atmosphère une partie de la chaleur reçue du soleil.

Géomécanique

Relatif à l'étude du comportement mécanique des roches et du sol et leurs processus physiques associés.

Garniture tubulaire

Éléments tubulaires permettant de transférer la puissance et le couple de rotation depuis le moteur de rotation en surface jusqu'à l'outil de coupe, ainsi que de transférer le fluide de forage.

Horizon sismique

Structure continue définissant une interface entre deux formations géologiques de propriétés acoustiques différentes, déterminée à partir du traitement de données sismiques.

Installations classées protection de l'environnement (ICPE)

Installation susceptible de créer des risques ou de provoquer des pollutions ou nuisances sur la santé humaine ou l'environnement et soumis à une législation spécifique.

Injectivité/Productivité

Capacités hydrauliques du puits, représentées par le rapport entre le débit et le différentiel de pression pendant respectivement l'injection et la production. Elle est exprimée en L/s/bar.

Intensité épiscopentrale

Caractérisation de la sévérité de la secousse au sol au niveau de l'épicentre du séisme. Cette intensité est souvent la plus forte. Plusieurs échelles d'intensité existent et celle adoptée actuellement en France est l'EMS98 (European Macroseismic Scale 1998). La détermination de l'intensité d'un séisme est fonction du ressenti des habitants, des effets sur les objets et l'environnement, et des dégâts sur les bâtiments. Il n'existe pas de relation directe entre l'intensité (effet en surface) et la magnitude (énergie à la source) d'un séisme.

2. NOTE DE PRESENTATION NON TECHNIQUE

Levé géophysique	Evaluation des propriétés physiques du sous-sol à travers diverses méthodes indirectes géophysiques (sismique, électromagnétique, gravimétrique, ...).	Système convectif	Circulations à grande échelle de fluides géothermaux au sein du réseau de failles et fractures naturelles à la base de la couverture sédimentaire et dans le socle granitique.
Magnitude	Caractérisation de l'énergie libérée lors d'une rupture sismique. Il existe différentes échelles de magnitude, dépendant de l'amplitude du signal, de la distance à la station du séisme ou du type d'onde utilisé pour le calcul. Il n'existe pas de relation directe entre l'intensité (effet en surface) et la magnitude (énergie à la source) d'un séisme.	Vélocimètre	Capteur permettant d'enregistrer la vitesse du mouvement au sol (par exemple les géophones). Ce capteur peut être uniaxial et ne mesurer qu'une seule composante du signal sismique, ou triaxial et mesurer le signal dans les trois directions spatiales.
Magnitude complétude	de Magnitude minimale au-dessus de laquelle tous les événements sismiques d'une zone donnée sont détectés.		
Microsismique (événement)	Séisme de magnitude inférieure à 2.		
Permis exclusif recherches (PER)	de Permis qui confère à son titulaire l'exclusivité du droit d'effectuer tous travaux de recherches dans le périmètre qu'il définit et de disposer librement des produits extraits à l'occasion des recherches et des essais uniquement.		
Permittage	Recherche des autorisations d'implantation des équipements de mesure dans les parcelles privées, dans le domaine communal ou dans le domaine public		
Pétrophysique	Relatif aux propriétés physiques des roches, telles que la lithologie, la porosité, la perméabilité, les modules élastiques, ou encore les propriétés acoustiques.		
Régime tectonique	Système de contraintes responsables du mouvement des failles.		
Sismicité induite	Ensemble d'événements de nature sismique (i.e. ruptures de discontinuités rocheuses s'accompagnant de l'émission d'ondes sismiques, pouvant être détectées) provoqué entièrement ou partiellement par l'activité humaine.		

1 INTRODUCTION GENERALE

1.1 Lithium de France

Créé en 2020, Lithium de France, 1er opérateur indépendant français de chaleur et lithium géothermal, a pour vocation d'accélérer la transition énergétique par la fourniture de chaleur en circuit courts aux entreprises, aux agriculteurs comme aux collectivités territoriales, et par la production de lithium bas-carbone destinée à la fabrication de batteries. Son siège social est en Alsace, à Haguenau.



La valorisation du fluide géothermal présent naturellement dans le sous-sol alsacien offre de nombreux bénéfices dont notamment :

- **La production de chaleur renouvelable** au bénéfice du développement économique et sociétal des territoires. Lithium de France vise ainsi à favoriser l'ancrage ou l'essor d'acteurs industriels locaux et apporter aux communes les avantages d'une chaleur décarbonée ;
- Une réponse industrielle aux enjeux de souveraineté de la France et de l'Europe vis-à-vis d'une partie des besoins en **approvisionnements en lithium**, avec une production bas carbone, en opposition aux exploitations dites « conventionnelles » de mines et de salars.

Ainsi, en coordination avec les autres projets du groupe Arverne, l'entreprise a pour ambition de participer au développement des territoires grâce à la fourniture de chaleur géothermale et à l'autonomie de la France par la fourniture de lithium.

Afin que cette vision se traduise concrètement en actions, Arverne s'est engagé dans une démarche environnementale en devenant "entreprise à mission", selon la loi Pacte. Cette mission, a été formulée de la manière suivante :

« Par son savoir-faire unique, le groupe Arverne libère le potentiel des géo-ressources et les valorise durablement pour une transition énergétique pragmatique au service de la prospérité des territoires. »

Les objectifs principaux de cette mission étant :

- Agir en énergéticien audacieux pour défendre une transition énergétique pragmatique ;
- Encourager une société vertueuse en s'appuyant sur les femmes et les hommes au sein de l'entreprise et des territoires.

Afin de porter ce projet à bien, Lithium de France bénéficie d'un actionariat de fonds privés majoritairement français, dont notamment le groupe Arverne avec plus de 60% des actions. Au travers de deux levées de fonds, de grands groupes tels que **Equinor**, énergéticien leader mondial dans son domaine en investissant énormément dans les énergies renouvelables et **Norsk Hydro** spécialisé dans la production, le raffinage, la fabrication et le recyclage de produits et ressources du sous-sol, ont rejoint les actionnaires principaux avec respectivement 24,6% et 12% de parts.

Lithium de France a pourvu plus de 40 emplois directs entre octobre 2020 et décembre 2024, afin de monter son équipe dans le nord de l'Alsace à Bischwiller puis à Haguenau depuis le 16 décembre dernier. Les équipes opérationnelles sont réparties dans quatre disciplines principales :

- Exploration du sous-sol ;
- Ingénierie forage ;
- Ingénierie thermique en surface ;
- Développement du procédé Lithium.

En plus de ces équipes, tout un écosystème de collaborations, de partenariats académiques et industriels ainsi que des implications auprès des associations nationales et internationales (AFPG, EGEC, A3M, iLiA..) permettront de mener à bien ce projet exploratoire dit, « Les Poteries Exploration ».

1.2 L'ambition de Lithium de France en Alsace du Nord

Lithium de France ambitionne la valorisation à une grande échelle des ressources exceptionnelles du territoire d'Alsace du Nord, aussi bien en chaleur qu'en lithium géothermal.

En premier lieu, la géothermie profonde contribue très largement à la politique de transition énergétique et de décarbonation des territoires en donnant aux utilisateurs de chaleur (industrie, agriculture, activités tertiaires ou particulier) un accès à des calories dont l'émission de *Gaz à Effet de Serre (GES)* lors de la production est très faible. En effet, une émission de 40 000 tonnes par an de CO₂ d'une chaudière gaz peut être évitée par la production annuelle de chaleur d'un doublet de puits d'une puissance thermique de 20 MW_{th} (cf. Fiche Ademe "Clés pour agir" et publication dans *Geothermics* de A. Pratiwi et al; 2018 *Life-cycle climate-change impact assessment of enhanced geothermal system plants in the Upper Rhine Valley*). La géothermie profonde est par ailleurs une énergie renouvelable non intermittente, silencieuse, faiblement émettrice en CO₂ et avec un impact en surface très réduit comme illustré par les deux projets en fonctionnement dans la région, à Soultz-Sous-Forêts et Rittershoffen. Cette énergie produite localement contribuera au développement et à l'attractivité du territoire en favorisant les acteurs locaux qui ont besoin de calories et qui souhaiteraient décarboner leurs productions.

Les besoins en chaleur pressentis et accessibles depuis le site de notre projet s'élèvent à plusieurs centaines de GWh par an et représentent de nombreux emplois directs et indirects. Nous étudions aussi la possibilité d'alimenter les réseaux de chaleur existants ou futurs dans les communes traversées par les canalisations enterrées reliant la centrale géothermique et les gros consommateurs. Ces réseaux offriront ainsi l'opportunité aux habitants du secteur de bénéficier directement de la chaleur extraite du sous-sol. Les travaux seront menés en partenariat avec les pouvoirs publics pour être combinés avec de futures infrastructures irriguant le territoire (transports en commun, pistes cyclables...), accélérant ainsi leur déploiement.

En second lieu, la demande en lithium pour la mobilité électrique est en croissance et devrait continuer de croître dans les années à venir. Actuellement, l'exploitation du lithium a lieu principalement dans de grandes mines à ciel ouvert riches en pegmatites comme en Australie ou dans les Salars comme ceux des plateaux andins. Ces deux modes d'extraction ont un impact écologique très négatif et génèrent de grandes émissions de GES aussi bien durant leur extraction que durant leur transport. Afin de réduire notre dépendance à ces sources de minerais et renforcer notre souveraineté, il est très important de mettre en valeur nos propres ressources de lithium et de les exploiter avec des méthodes présentant une empreinte environnementale réduite.

En Alsace du Nord, les saumures géothermales profondes présentent des teneurs en lithium dissout très élevées et la possibilité d'extraire ce lithium des eaux géothermales est une alternative bien plus vertueuse que les techniques usuellement utilisées à ce jour. Au travers des saumures extraites, nous espérons pouvoir produire, à terme, 1 700 tonnes par an de carbonate de lithium de qualité batterie par doublet de géothermie, de quoi équiper environ 35 000 véhicules électriques par an. En comparaison avec les méthodes actuelles d'extraction, cette production responsable de lithium permettra d'économiser l'émission de près de 6 tonnes de CO₂ par tonne de lithium produite. De plus, en phase d'exploitation, les fluides traités circuleront en boucles fermées et les eaux industrielles nécessaires au traitement du lithium seront recyclées.

Ce projet industriel, dont le schéma de principe est donné en Figure 1.1 ci-dessous, attirera des compétences nouvelles et mettra en avant la capacité d'innovation de l'Alsace du Nord à faire naître des activités tournées vers l'avenir, respectueuses de notre environnement et de notre cadre de vie.

1.3 Un projet de territoire

Entre 2022 et 2024, quatre Permis Exclusifs de Recherches (PER) ont été octroyés à Lithium de France pour une durée de 5 ans dans le nord de l'Alsace. Deux de ces PER sont situés au nord de la forêt de Haguenau :

- Le **PER « Les Sources »**, de 171 km² relatif aux titres de recherches et d'exploitation de gîtes géothermiques dont l'arrêté ministériel a été signé le 22 juin 2022 (JO n°0149, 29 juin 2022, texte n°48, p. 88 à 90) ;
- Le **PER « Les Sources Alcalines »**, de 158 km², relatif aux mines de lithium et toutes autres substances connexes dont l'arrêté ministériel a été signé le 24 juillet 2023 (JO n°0176, 1^{er} août 2023, texte n°5, p. 12 à 13).

Les deux autres PER octroyés sont situés à l'Est de la forêt de Haguenau :

- Le **PER « Les Poteries »**, de 151 km², relatif aux titres de recherches et d'exploitation de gîtes géothermiques dont l'arrêté ministériel a été signé le 10 août 2023 (JO n°0195, 24 août 2023, texte n°42, p. 202 à 203) ;
- Le **PER « Les Poteries Minérales »**, de 151 km², relatif aux mines de lithium et toutes autres substances connexes dont l'arrêté ministériel a été signé le 31 janvier 2024 (JO n°0039, 16 février 2024, texte n°5, p. 11).

En avril 2024, deux demandes de permis ont été déposés aux administrations respectives (DGEC et DGALN) au Sud-Ouest de l'Eurométropole de Strasbourg :

- Le **PER « Les Coteaux »**, de 175 km², relatif aux titres de recherches et d'exploitation de gîtes géothermiques, déposé le 30 avril aux autorités compétentes ; il est en cours d'instruction ;
- Le **PER « Les Coteaux Minéraux »** de 175 km² relatif aux mines de lithium et toutes autres substances connexes, déposé le 30 avril aux autorités compétentes ; il est également en cours d'instruction.

Ces deux dossiers sont en instruction à la date du dépôt du présent dossier.

Sur la Figure 1.2 page suivante, deux autres PER présents dans le portefeuille de titres miniers de 2gré, société sœur, ont été illustrés afin de mettre en évidence la stratégie et la cohérence territoriale des PER octroyés et en cours de demande, à l'échelle du Groupe Arverne.

- Le **PER « Strasbourg »**, de 572 km² relatif aux titres de recherches et d'exploitation de gîtes géothermiques, dont l'arrêté ministériel a été signé le 10 juin 2013 (JO n°0144, 23 juin 2013, texte n°12, p. 36 à 37) puis prolongé pour 5 ans par l'arrêté ministériel du 29 avril 2019 (JO n°0113, 16 mai 2019, texte n°10, p. 25). La demande de seconde prolongation est en cours d'instruction à la date de dépôt du présent dossier.
- Le **PER « Plaine du Rhin »**, de 553 km² relatif aux mines de lithium et toutes autres substances connexes, déposé le 20 décembre 2018 aux autorités compétentes, il est en cours d'instruction à la date de dépôt du présent dossier.

Tous ces titres pourront accueillir plusieurs projets qui seront définis au fur et à mesure de l'identification des cibles géologiques en sous-sol grâce aux campagnes exploratoires sur le terrain. Lithium de France souhaite créer un réseau de chaleur étendu dans le nord de l'Alsace afin de tendre vers une indépendance du territoire pour cette ressource. Les PER « lithium » permettront quant à eux d'agir à l'échelle locale avec la création d'emplois directs et indirects sur le territoire mais également à l'échelle nationale pour assurer la souveraineté de ce métal critique.

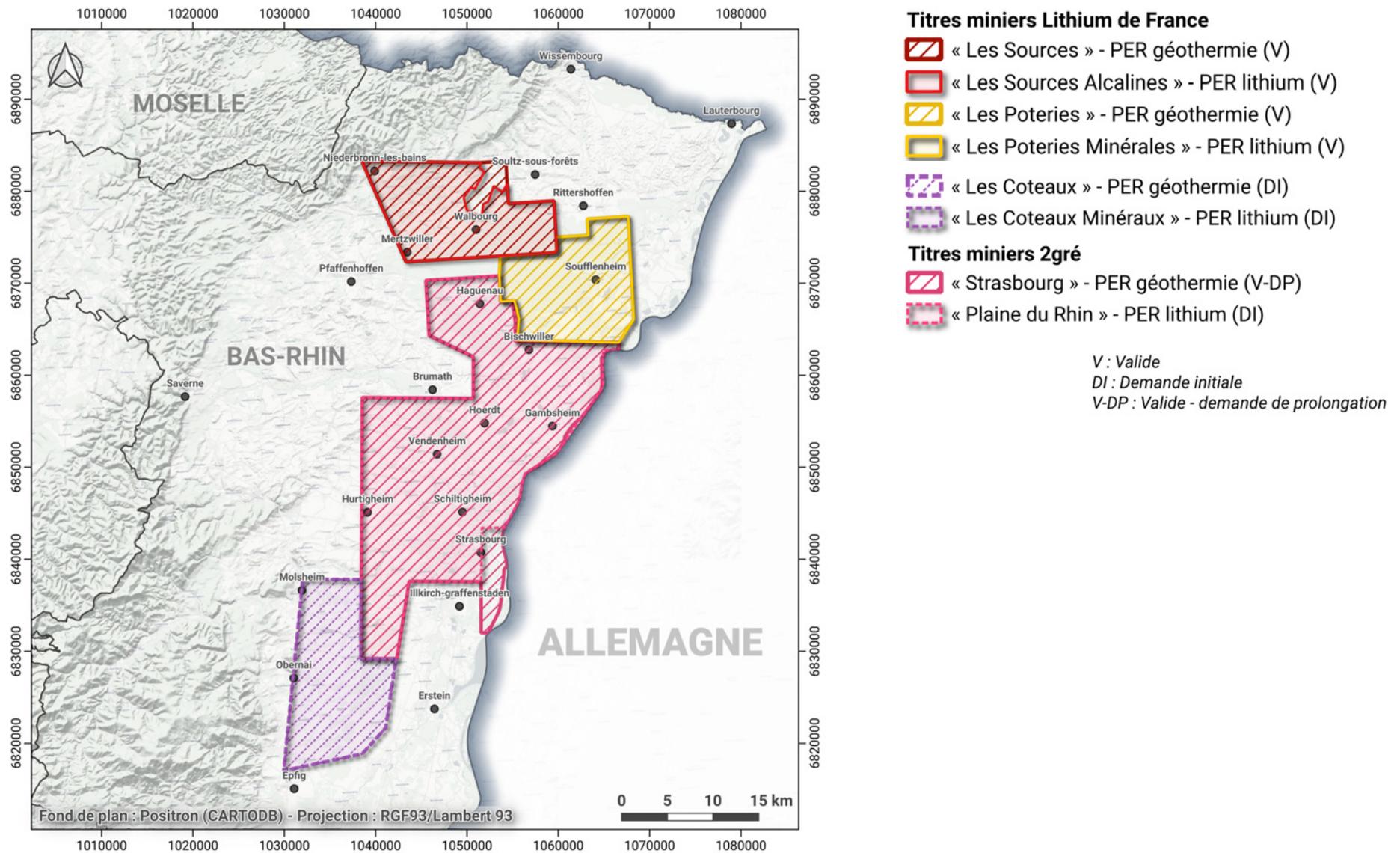
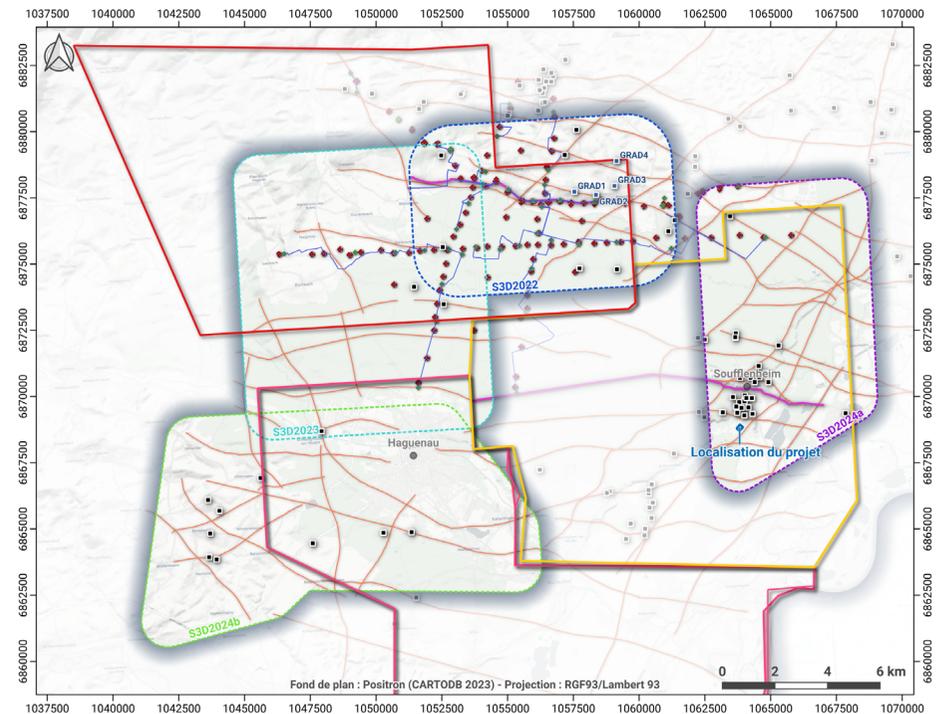


Figure 1.2 : localisation géographique des quatre PER de Lithium de France

1.4 Le projet « Les Poteries Exploration »

Depuis 2022, Lithium de France a engagé des travaux d'exploration pour évaluer les ressources potentielles dans les PER listés ci-avant. Ces travaux, illustrés sur la Figure 1.3 consistent notamment en la revue des modèles géologiques existants, le retraitement et la réinterprétation de données historiques, des campagnes d'acquisition de données géophysiques de diverses natures (sismique réflexion, mesures électromagnétiques, mesures de bruit), des données de température en proche surface, des mesures géologiques sur des échantillons de roches représentatifs du sous-sol de la région. Certains modèles géologiques régionaux concluent que les zones proches de la frontière franco-allemande, comme au droit du couple de PER « Les Poteries » / « Les Poteries Minérales » sont prospectives. Toutefois, aucun des puits forés par le passé dans le périmètre de ce PER n'a atteint le socle profond pour confirmer, entre autres, la profondeur réelle des formations profondes dont le socle lui-même ou la teneur en calories ou en minéraux des saumures y circulant.

C'est pourquoi, Lithium de France a jugé pertinent de proposer le projet « Les Poteries Exploration » pour forer un puits d'exploration (GPX) visant à confirmer la présence d'une ressource exploitable tant de chaleur géothermale que de lithium dans l'emprise des PER dits « Les Poteries » et « Les Poteries Minérales ». En fonction des résultats de ce puits d'exploration, la plateforme de chantier et le puits pourront être maintenus puis la réalisation d'un second forage sera étudiée et soumise aux autorités dans le cadre d'une demande d'autorisation environnementale d'ouverture d travaux miniers.



Carte des données géophysiques et de puits produites et acquises par Lithium de France en prévision de la construction du modèle géologique 3D régional

Carte mise à jour le 20/08/2024

Légende :

- Localisation du projet (Soufflenheim)
- Titres miniers**
- PER « Les Sources » (Lithium de France)
- PER « Les Poteries » (Lithium de France)
- PER « Strasbourg » (Zgré, filiale du groupe Averno)

- Mesures de températures (Lithium de France, 2023)**
- Puits de gradient
- Campagnes sismiques (Lithium de France, 2022-2024)**
- Sismique 3D - 2022
- Sismique 3D - 2023
- Sismique 3D - 2024a
- Sismique 3D - 2024b
- Lignes sismiques 2D (2022-2023)

- Campagne CSEM (Lithium de France, 2022 et 2024)**
- Câbles
- Récepteurs CSEM
- Emetteurs CSEM
- Données vintages acquises**
- Données de puits (BRGM)
- Lignes 2D (BRGM)



Figure 1.3 : Carte de localisation des explorations réalisées par Lithium de France dans le nord de l'Alsace et des données historiques achetées

2 CONTEXTE REGLEMENTAIRE

2.1 Etapes clés d'un projet de coextraction de chaleur et de lithium géothermal

La réalisation en France d'un projet produisant simultanément de la chaleur géothermique et du lithium géothermal comporte plusieurs étapes, à la fois technique et administrative, permettant d'aboutir à une exploitation opérationnelle (Figure 2.1).

Côté ministère :

En premier lieu, il est nécessaire d'obtenir un PER, conférant à son titulaire l'exclusivité du droit d'effectuer tous travaux de recherches dans le périmètre qu'il définit et de disposer librement des produits extraits à l'occasion des recherches et des essais (C. minier, art L. 122-1). A ce jour, afin de pouvoir réaliser l'exploration conjointe du lithium et des calories véhiculées par les fluides géothermaux, deux permis distincts doivent être instruits par deux autorités différentes, à savoir, la *DGEC (Direction générale du climat et de l'énergie)* qui est responsable des démarches pour les PER de gîtes géothermiques et la *DGALN (Direction générale de l'aménagement, du logement et de la nature)* qui est responsable des démarches pour les PER de « mines » de lithium. Les PER sont accordés, après mise en concurrence et pour une durée initiale maximale de cinq ans, par l'autorité administrative compétente et peuvent être prolongés deux fois 5 ans maximum (C. minier, art. L. 122-3, art. L. 124-2-5).

Une fois l'autorisation d'exploration obtenue par arrêté ministériel sur un territoire donné, il est nécessaire en Alsace de réaliser plusieurs campagnes d'exploration du sous-sol, afin d'obtenir une caractérisation complète des structures géologiques souterraines et voies de circulation des fluides dans le réservoir naturel. Ces campagnes combinent souvent différentes approches, principalement basées sur l'acquisition de données sismiques 2D et 3D ainsi que sur des méthodes électro-gravimétriques. Des forages à faible profondeur, dit forages de gradient, peuvent aussi apporter des informations complémentaires intéressantes sur le gradient géothermique

attendu, généralement corrélé aux teneurs en lithium. Les données obtenues pendant la phase d'exploration servent aussi à construire un modèle 3D du sous-sol qui permettra de définir les cibles des forages.

Afin de réaliser les opérations de forage, il est ainsi nécessaire d'obtenir une *Autorisation Environnementale (AENV)*, incluant une description de la nature des activités et des travaux envisagés, une étude d'impact et une note de présentation non technique (C. Envir., art. R. 181-13). L'AENV est certes focalisée sur les activités de forage et de développement de puits, mais inclut également une vision plus large du projet envisagé.

Les opérations de forage, qui suivent l'octroi de l'AENV permettent de caractériser et tester la ressource et de valider les paramètres opérationnels, notamment la concentration en lithium, la température, la pression et le débit, à prendre en compte pour la finalisation du design des infrastructures. Si les forages des doublets ont un premier objectif dit « exploratoire », ils sont souvent conçus dans les projets de géothermie profonde en milieu non-volcanique pour pouvoir aussi servir à l'exploitation dans le cas où l'exploration s'avère concluante.

Selon le projet envisagé, électrogène ou chaleur, et en fonction des techniques et procédés réalisés sur sites, plusieurs demandes de permis doivent être entreprises, notamment pour les installations géothermiques et les équipements d'extraction directe du lithium (*Direct Lithium Extraction - DLE*). En particulier, on retrouve à ce stade une ou plusieurs demandes de permis de construire et, suivant les installations sur site, des procédures pour l'exploitation *d'installations classées protection de l'environnement (ICPE)*, pouvant relever des différents régimes d'enregistrement, de déclaration ou d'autorisation.

Une fois en phase opérationnelle, une concession ou un permis d'exploitation, selon la puissance primaire produite, est à demander pour le gîte géothermique et peut être octroyé pour une durée maximale respective de 50 et 30 ans (C. minier, L. 134-2-1, L. 134-4).

Si les différentes phases, technique et administrative, peuvent avoir des délais d'instruction et de réalisation très variés, en fonction des éléments exigés et de la complexité technique des travaux réalisés, la durée attendue pour développer un projet de lithium géothermal varie généralement de 5 à 10 ans.

2. NOTE DE PRESENTATION NON TECHNIQUE

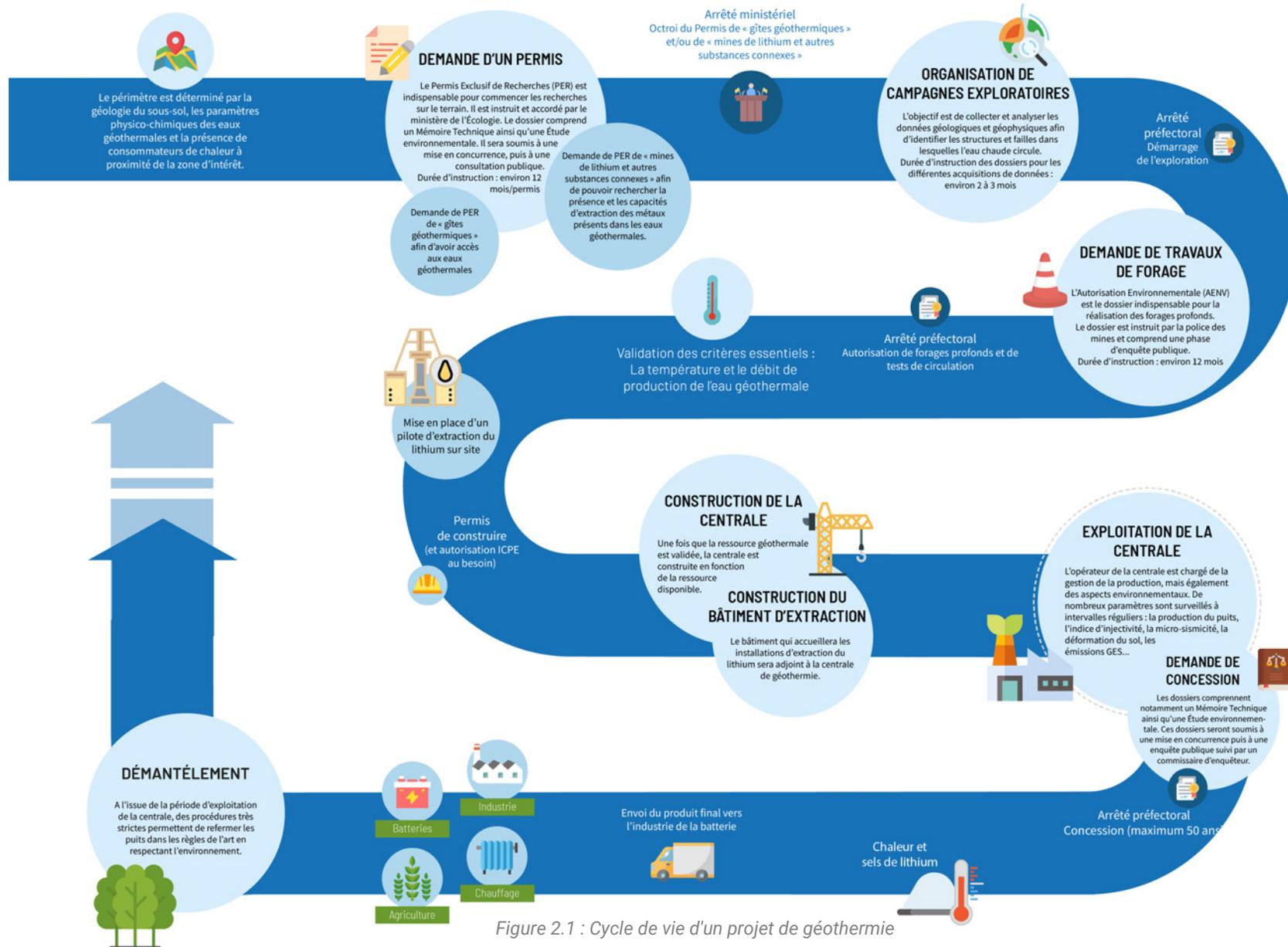


Figure 2.1 : Cycle de vie d'un projet de géothermie

2.2 Autorisation Environnementale de travaux miniers

Une demande d'autorisation environnementale d'ouverture de travaux miniers est strictement encadrée par le Code de l'environnement et comprend trois étapes d'instruction distinctes obligatoires qui sont : une phase d'examen, une de consultation publique et une phase de décision.

Zoom sur le déroulement de la phase de consultation du public :

Pendant la durée de la phase de concertation, les citoyens peuvent prendre connaissance du dossier des travaux envisagés et formuler des observations. Celles-ci sont consignées dans un « registre d'enquête » par un commissaire enquêteur, en présentiel lors de permanences sur la commune concernée par le projet ou bien en distanciel via un site indépendant.

L'enquête publique vise à :

- Informer le public ;
- Recueillir, sur la base d'une présentation argumentée des enjeux et parfois d'une étude d'impact, avis, suggestions et éventuelles contre-propositions du public ;
- Elargir les éléments nécessaires à l'information du décideur et des autorités compétentes avant toute prise de décision.

Depuis le 24 octobre 2024, la consultation a une durée de 3 mois, commençant et se terminant par une réunion publique, à laquelle l'exploitant est invité. L'exploitant aura la possibilité, grâce à cette nouvelle procédure, de répondre en continu aux observations du public.

Ainsi, l'AENV d'ouverture de travaux miniers ne permet pas à elle seule une exploitation de la ressource mais uniquement une confirmation de la présence du potentiel géothermal. D'autres autorisations seront nécessaires pour que le projet puisse passer en phase d'exploitation.

SCHEMA DE LA PROCEDURE DE DEMANDE D'AENV POUR LES DOSSIERS DEPOSES APRES LE 24/10/2024, UNE FOIS LA COMPLETUDE DU DOSSIER DONNEE



2.3 Composition du dossier d'autorisation environnemental « Les Poteries Exploration »

Le dossier de demande d'ouverture de travaux est déposé selon les modalités de téléprocédure des autorisations environnementales sur service-public et/ ou du CERFA n°15964-03. Il comprend les pièces suivantes :

PIÈCE 1 - DESCRIPTION DU PROJET

Ce document présente la justification de la demande, le périmètre du projet exploratoire ainsi que les 4 grandes étapes du projet « Les Poteries Exploration »

PIÈCE 2 - NOTE DE PRESENTATION NON TECHNIQUE

Les informations réglementaires de la procédure, la description de l'objet de l'enquête, le plan de situation et la présentation non-technique des différentes phases du projet exploratoire sont rassemblés dans ce volume. Le plan de situation permet de localiser géographiquement la zone d'étude.

PIÈCE 3 - JUSTIFICATIF DE MAITRISE FONCIERE

PIÈCE 4 A - ÉTUDE D'IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT

L'étude d'impact vise à estimer, en fonction des éléments d'appréciation disponibles, les conséquences du projet sur son environnement pour tenter d'éviter, de réduire et, le cas échéant, de compenser les éventuels impacts négatifs.

PIÈCE 4 B - ÉTUDE D'IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT – ANNEXES

- Étude acoustique
- Diagnostic écologique

PIÈCE 4C - ÉTUDE D'IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT - RNT

Ce résumé non technique permet une compréhension globale et facilitée des impacts du projet sur son environnement.

PIÈCE 5 - QUALITE DU DEMANDEUR

La justification que le demandeur a qualité, en application du Code minier, pour présenter le dossier dont notamment les capacités techniques et financières du demandeur.

PIÈCE 6 - DOCUMENT UNIQUE D'ÉVALUATION DES RISQUES

PIÈCE 7 - GESTION DES RISQUES INDUSTRIELS SUR LA SECURITE PUBLIQUE

PIÈCE 8 - CONDITIONS D'ARRÊT DES TRAVAUX

PIÈCE 9 - GARANTIES FINANCIERES

PIÈCE 10 A – EXPLORATION ET MODELISATION -**CONFIDENTIEL**

La localisation et la conception du forage proposé aux autorités sont le résultat de l'intégration des travaux d'exploration et du savoir-faire développé au sein de Lithium de France. Dans le cadre du respect des lois des affaires, ces éléments sont protégés au titre de la propriété intellectuelle. Une synthèse des conclusions sont disponibles dans la note de présentation non technique (Pièce n°1).

PIÈCE 10 B - CONFIGURATION DE LA PHASE CHANTIER

Ce document détaille de façon technique toutes les opérations de terrassement et de génie civil et des opérations de forage qui seront menées dans le cadre du projet « Les Poteries Exploration »

DANS LE CADRE DE LA CONSULTATION DU PUBLIC, LES AVIS DES SERVICES SOLlicitÉS (DRAC, ARS, DDT, MRAE,...) SERONT AJOUTÉS AU FUR ET A MESURE DE LEUR RECEPTION PAR LES SERVICES INSTRUCTEURS SUR LE REGISTRE DEMATERIALISE.

3 IDENTIFICATION DE LA RESSOURCE GEOTHERMALE

3.1 Préparation du dossier et suivi des recommandations

La campagne d'exploration pour le projet « Les Poteries Exploration » et la modélisation avant forage du réservoir ciblé a suivi les recommandations du [Guide de bonnes pratiques pour la maîtrise de la sismicité induite par les opérations de géothermie profonde](#) produit conjointement par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) et l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris) à la demande de la direction générale de la prévention des risques (DGPR) au sein du ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires et de la direction générale de l'énergie et du climat (DGEC) au sein du ministère de la Transition énergétique (Maury et al., 2023). Les recommandations de cet ouvrage, publié en 2023, ont été scrupuleusement suivies dans l'élaboration de ce document de demande d'Autorisation Environnementale d'ouverture de travaux miniers, notamment dans les études de caractérisation de réservoir et le choix de la cible du projet. Le projet exploratoire mené sur les deux PER, celui de gîtes géothermiques dit « Les Poteries » et celui de mines de lithium et substances connexes dit « Les Poteries Minérales », a pour objectif de pallier le manque de données dans le réservoir ciblé. Il s'inscrit dans une campagne d'exploration qui a démarré en septembre 2023 avec le retraitement de lignes sismiques 2D (S2D) historiques retraitées et réinterprétées. Une campagne sismique 3D (S3D), réalisée en septembre 2024, permettra d'imager le réseau de failles de manière plus détaillée comme cela a été le cas pour les précédentes campagnes S3D menées par Lithium de France (Strobbia et al., 2024; Vidal et al., 2023). Cependant, le champ de contrainte, la nature du socle et la présence de la ressource restent des inconnus auxquelles la S3D ne répondra pas.

En résumé, le forage exploratoire décrit dans le document 10a de l'AENV « Les Poteries Exploration » a pour objectif :

- Une estimation de la température, de la pression, du champ de contrainte et du *régime tectonique* du réservoir ciblé ;

- La caractérisation de la fracturation naturelle à l'échelle du puits et des altérations hydrothermales associées ;
- L'identification de la nature du socle et la présence de ressource géothermale ;
- La précision de la profondeur des horizons géologiques ;
- Un échantillonnage des fluides circulant dans les réservoirs profonds.

Les études préliminaires menées pour ce projet exploratoire s'appuient sur les données historiques comme les lignes S2D retraitées et des mesures de puits profonds.

L'objectif de ces travaux est de :

- Caractériser le réseau de failles en termes de géométrie et perméabilité naturelle ;
- Anticiper la tendance au glissement des failles et le comportement Thermo-Hydraulique (TH) du réservoir ciblé ;
- Identifier l'aléa sismique de la zone du futur puits exploratoire.

Une synthèse des éléments et des conclusions du rapport sont disponible dans le Chapitre 6 « Prévention de la sismicité induite »

3.2 Présentation du champ géothermal du Fossé rhénan

A l'échelle régionale, on constate une série d'anomalies thermiques, comme dans les régions de Sultz-sous-Forêts et Rittershoffen en Alsace ou Landau et Insheim dans le Palatinat et Bruchsal dans le Bade-Württemberg, avec des températures supérieures à 150°C à 2000 m de profondeur (Baillieux et al., 2013; Schellschmidt and Clauser, 1996), cf. Figure 3.1. Ces phénomènes très locaux montrent que la distribution de la température n'est pas homogène dans le Fossé rhénan supérieur. Ils sont principalement situés dans la partie ouest du Fossé, à des latitudes où la faille rhénane est orientée N45°E (Dezayes et al., 2015).

L'anomalie de Soufflenheim a été mise en évidence avec les données de températures acquises dans les puits pétroliers forés dès le début des années 50. A proximité du champ pétrolier de Donau, plusieurs puits montrent un gradient de 70-75°C/km avec des températures atteignant 140°C au toit du Buntsandstein. Ces mêmes puits ont rencontré des venues d'eau salée dans les sédiments triasiques suggérant un *système convectif* similaire à celui connu à Sultz et Rittershoffen (Benderitter et al., 1995; Pribnow and Clauser, 2000; Pribnow and Schellschmidt, 2000). Les remontées de fluides dans le réseau de fractures naturelles associées aux grandes failles locales sont principalement observées dans le premier kilomètre du socle, dans les sédiments gréseux du Buntsandstein et dans les sédiments calcaires du Muschelkalk. La formation du Keuper pourrait jouer un rôle de couverture isolant le système convectif profond (Vidal et al., 2015). On peut donc supposer une chute de gradient à 5°C/km dans les sédiments gréseux et le socle comme dans les autres réservoirs géothermaux connus. La température attendue à 3 km de profondeur serait donc de 150°C et cohérente avec les modèles existants (Baillieux et al., 2013).

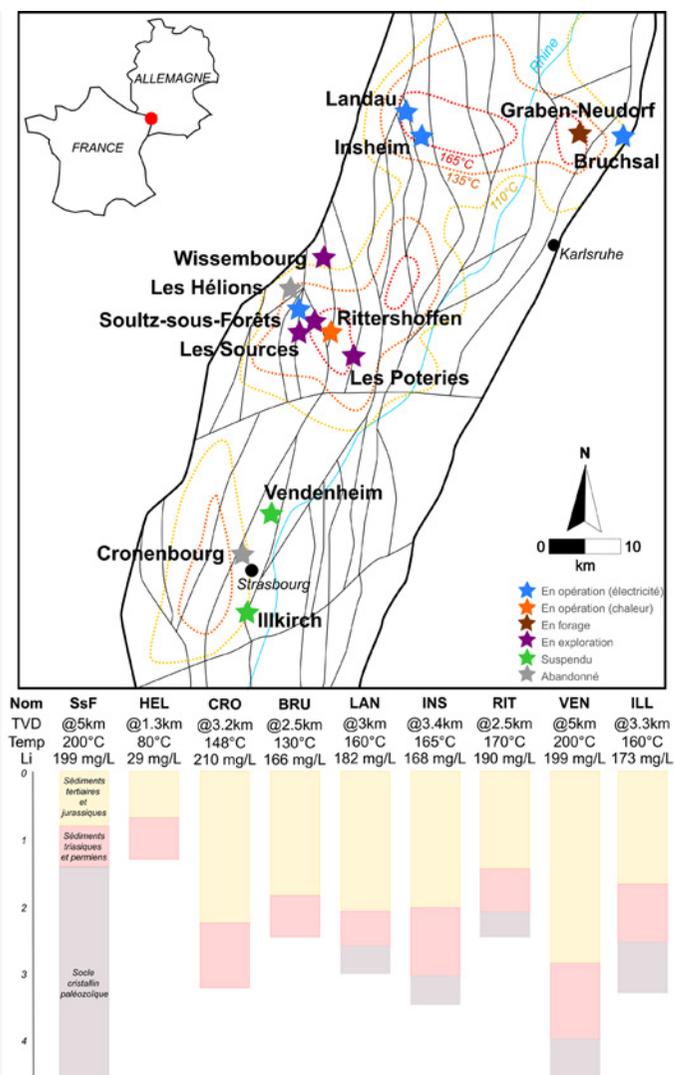


Figure 3.1: Carte de la partie centrale du Fossé rhénan d'après Richard et al. (2024). Les isothermes à 2 km sont indiquées d'après Baillieux et al. (2013). Les traces des failles principales au toit du socle est indiquée d'après le géoportail GeORG (GeORG Team, 2017). Les caractéristiques forages et des fluides sont indiquées d'après Borgia et al. (2021), Pauwels et al. (1993), Sanjuan et al. (2021, 2016)

L'origine de la convection est discutée dans de nombreuses études. La géométrie et les vitesses de circulation ont été modélisées par différents auteurs (Frey et al., 2021; Freymark et al., 2019; Guillou-Frottier et al., 2013; Koltzer et al., 2019; Le Carlier et al., 1994; Magnenet et al., 2014). Les récents travaux de modélisation de Lemgruber-Traby et al. (2023) suggèrent une infiltration météorique majoritairement via la faille bordière Est qui joue un rôle de recharge important dans les fosses profondes triasiques à l'est du Fossé (Figure 3.2).

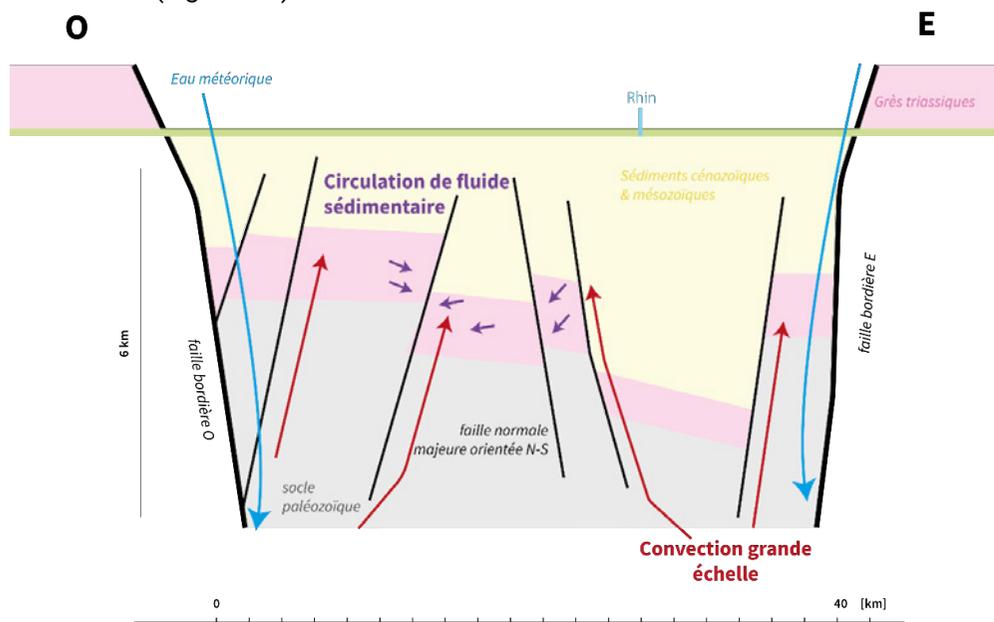


Figure 3.2 : Coupe schématique O-E des circulations de fluides à l'échelle du Fossé rhénan

Dans la zone du PER, le fluide circulerait dans le socle profond vers l'ouest et remonterait dans les grandes failles associées à des structures de horst à l'ouest du Fossé (Dezayes and Lerouge, 2019; Schill et al., 2009). Les modélisations hydrauliques proposées par Freymark et al. (2019) suggèrent des écoulements importants pouvant être associés aux failles normales N-S de la zone de Soufflenheim-Donau (Figure 3.3). Les données hydro-géochimiques de l'ensemble des fluides du Fossé indiquent un mélange entre les *eaux météoriques* et des eaux marines très salées venant des horizons sédimentaires circulant d'Est en Ouest (Cathelineau and Boiron,

2010; Sanjuan et al., 2016; Stober and Bucher, 2015). Il n'existe pas de données géochimiques du fluide géothermal sur le champ de Soufflenheim ou dans le périmètre du PER « Les Poteries ».

Depuis les années 80, plusieurs projets ont cherché à exploiter ces circulations hydrothermales. Le projet pilote de Soultz-sous-Forêts avait pour ambition de développer le réservoir profond granitique selon le concept du Hot Dry Rock mais a surtout permis d'acquérir une large base de données géologiques, géophysiques, hydrauliques, géochimiques et sismologiques. En s'appuyant sur l'expérience de Soultz, les projets industriels de Landau, Insheim et Rittershoffen ont cherché à exploiter le réservoir à l'interface sédiments-socle en optimisant leurs forages selon le réseau de fractures et failles naturellement perméables (Frey et al., 2022; Vidal and Genter, 2018) (Figure 3.3). Le succès de ces projets basés sur le concept hydrothermal est encourageant pour le développement de nouveaux projets. En parallèle, des projets visant le réservoir gréseux à Cronenbourg, Bruchsal et Brühl présentent des productivités plus aléatoires mais dont le potentiel reste à définir.

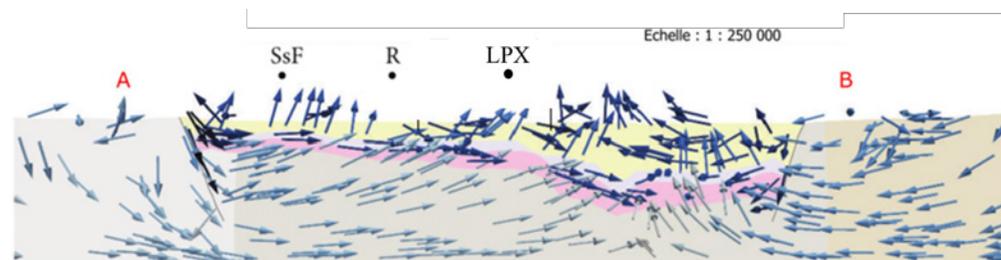


Figure 3.3 : Coupe NO-SE de l'écoulement des fluides au niveau du projet « Les Poteries Exploration » (LPX), Soultz-sous-Forêts (SsF) et Rittershoffen (R) (Freymark et al., 2019)

3.3 Etudes d'exploration réalisées depuis l'octroi du PER « Les Poteries »

Depuis l'octroi de son PER « Les Poteries » le 10 août 2023, Lithium de France a mené une campagne d'exploration de plusieurs mois avec l'achat de plusieurs lignes S2D historiques qui ont fait l'objet d'un retraitement puis d'une réinterprétation (Figure 3.4). Cette réinterprétation a été corrélée avec des données de puits anciens situés sur le périmètres permis. L'acquisition d'une ligne S2D à l'été 2023 avec la technologie des basses fréquences a permis d'évaluer la géologie plus profonde à proximité du projet. Une campagne de mesure de bruit ambiant a également été mise en œuvre à l'été 2024 afin de déployer un réseau de stations de surveillance sismiques optimisé pour le projet « Les Poteries Exploration ».

3.3.1 Acquisition de données historiques

Dans le cadre de son programme d'exploration, Lithium de France a fait l'acquisition auprès du BRGM de 9 lignes S2D acquises entre 1978 et 1984 par Total ainsi que de données issues de 21 puits voisins dont 4 avec des données de vitesse (Figure 3.4). Les lignes S2D ont été retraitées en 2023 par la société Real Time Seismic puis interprétées par la société ExploGIS (Figure 3.4). Le retraitement a permis de lever des incertitudes sur le positionnement des discontinuités notamment dans la partie sédimentaire. Il permet également d'identifier deux réflecteurs sous le Muschelkalk. La qualité des données sismiques historiques étant bonne, leur interprétation permet de dé-risquer le futur forage dans la partie sédimentaire de cette zone. Les résultats de cette interprétation ont permis d'identifier des structures majeures sur le PER « Les Poteries » dont certaines proches du site de Soufflenheim.

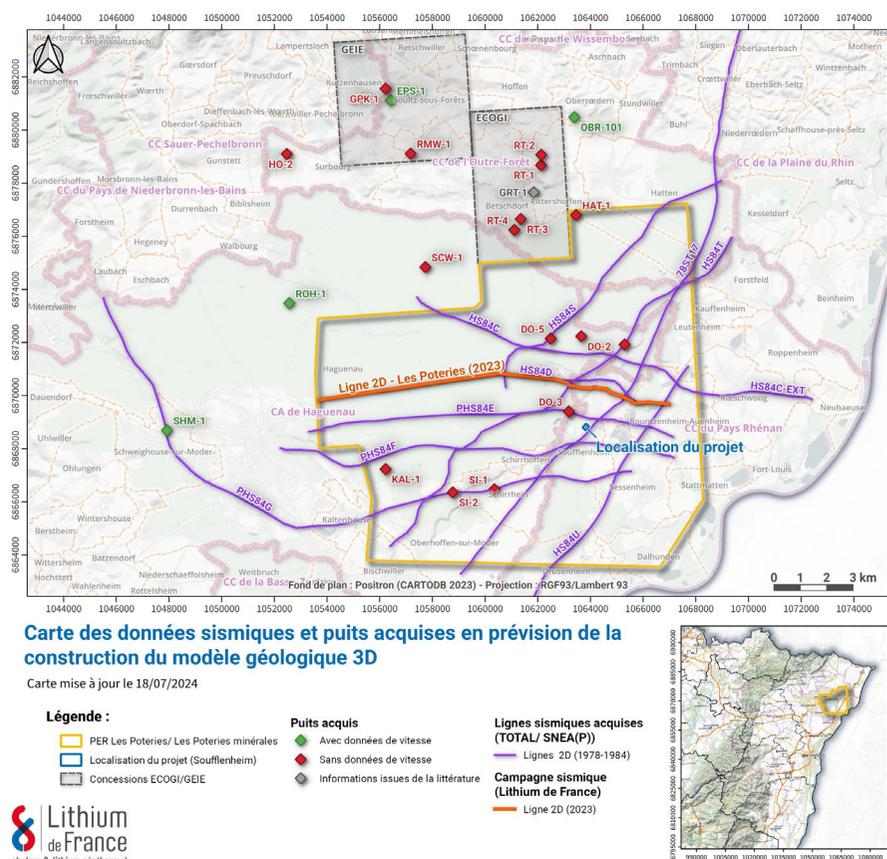


Figure 3.4 : Données acquises dans le cadre de la campagne d'exploration du projet « Les Poteries Exploration »

3.3.2 Acquisition de la ligne S2D2023

A l'été 2023, une ligne S2D a été acquise (Figure 3.4). Cette ligne avait pour but d'évaluer l'apport des basses fréquences sur l'imagerie des horizons géologiques profonds. Une première acquisition de type « SRS » (Simultaneous Random Sweep) avec des tirs de vibration aléatoires a été réalisée le jour. Une seconde acquisition utilisant les basses fréquences (2-10 Hz) qui sont plus faiblement atténuées dans le sous-sol avec des tirs de vibration linéaires a été réalisée la nuit. Cette acquisition nocturne complémentaire s'affranchit d'une partie du *bruit ambiant* anthropique non désiré provenant des activités industrielles ou du transport routier, permettant ainsi de détecter des signaux provenant de formations plus profondes.

3.3.3 Campagne de mesure du bruit ambiant

La conception du réseau de stations de surveillance sismiques est un point clé dans le développement du projet « Les Poteries Exploration ». Afin qu'il réponde au mieux aux exigences de surveillance microsismique évoquées dans le 'Guide de bonnes pratiques pour la maîtrise de la *sismicité induite* par les opérations de géothermie profonde' (Maury et al., 2023), 200 capteurs sismologiques de type WiNG ont été déployés temporairement par la société Smart Seismic Solution (S³) sur une surface d'environ 100 km² dans la partie est du PER « Les Poteries » (Figure 3.5). La période d'acquisition des mesures sismologiques de niveau de bruit s'est étendue du 3 au 28 juin 2024. Si la majorité des capteurs a été implantée au sein du PER « Les Poteries », une douzaine de capteurs ont été disposés à l'est de celui-ci et se retrouvent dans le PER de lithium « Outre-Forêt » d'Electricité de Strasbourg. Cette répartition avait pour but de garantir une couverture homogène de données sur une large zone du PER autour du site du projet, zone encore non investiguée par des mesures de niveau de bruit ou vierge de stations de surveillance sismologiques.

Des cartes interpolées de niveau de bruit ont été générées pour différentes bandes de fréquences (correspondant à des sources de bruit différentes). Les résultats de cette étude sont des données importantes afin de correctement appréhender la variabilité temporelle et spatiale du bruit sismique ambiant autour de la zone du projet « Les Poteries Exploration »,

en analysant par exemple les différences nuit vs jour, ou jour de semaine vs jour de week-end, etc. Ces informations deviennent des paramètres d'entrée pour concevoir le futur réseau de stations de surveillance sismique et évaluer sa sensibilité pour la détection d'évènements microsismiques.

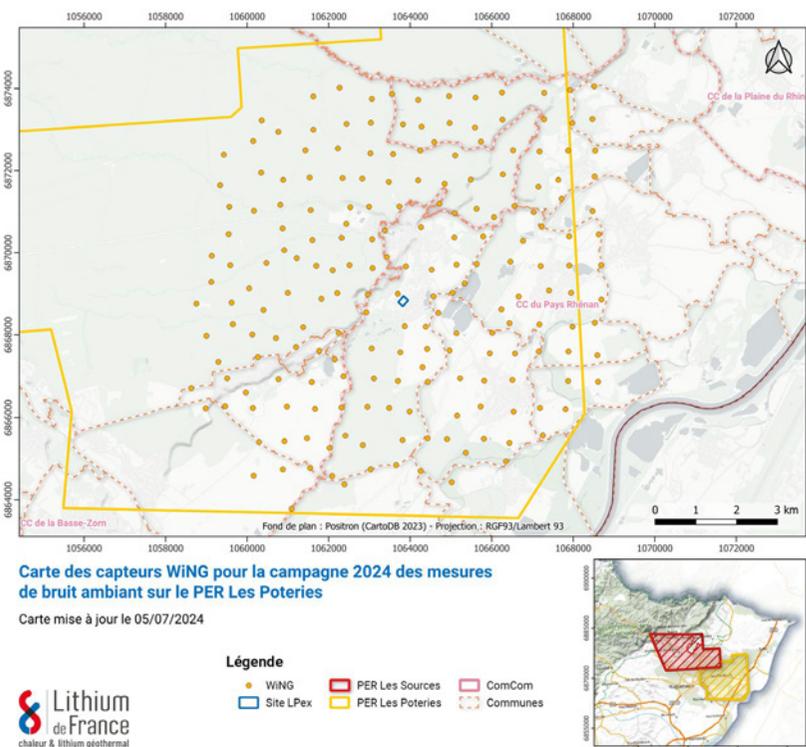


Figure 3.5 : Carte de la position des 200 capteurs WiNG dans le cadre de la campagne de mesures de bruit sismique réalisée en juin 2024 sur le PER « Les Poteries ».

4 LOCALISATION DU PROJET

Le chantier de forage est implanté au sud du village de Soufflenheim sur une partie des parcelles 767 et 252, section 30, feuille 1 de la commune de Soufflenheim, dans le département du Bas-Rhin (cf. Figure 4.1).

La juxtaposition des deux parcelles constitue la base foncière dans laquelle est découpée l'emprise du forage du puits GPX. L'accès au terrain est assuré par la rue Jean Lenoir, rejoignant la D138 à quelques centaines de mètres au niveau du croisement.

L'emprise sera entourée de la façon suivante :

- Sur la zone située à l'ouest de la D138 : Zone d'activités comprenant supermarché, entreprises de transport, menuiserie et fournisseurs de matériels électriques. Un parc solaire photovoltaïque sera développé sur le pourtour nord et est du site. Le terrain sera éloigné de la départementale D138 de 150m environ et cette zone tampon, actuellement friche industrielle sera convertie en une zone de développement artisanale.
- A l'est de la départementale se situent des habitations qui se trouvent pour la plus proche à 230m de la position prévisible du puits ;
- Au sud, les premières habitations se trouvent à 230m en troisième rangée derrière la zone industrielle ;
- Au nord, à 275 m du site se situe une voie de chemin de fer désaffectée qui limite une zone forestière.

Côté urbanisme

Le projet est implanté au droit de terrains classés UXm dans le PLUi. Ce classement fait référence aux zones urbaines spécialisées, destinées principalement aux activités économiques. Elles constituent des zones d'activités économiques mixtes. En d'autres termes, le zonage UXm autorise des destinations complémentaires à celles strictement « économiques » et qui participent à la vie d'une zone d'activités (certains équipements, services publics, restaurants, hôtels et autres hébergements touristique etc.).

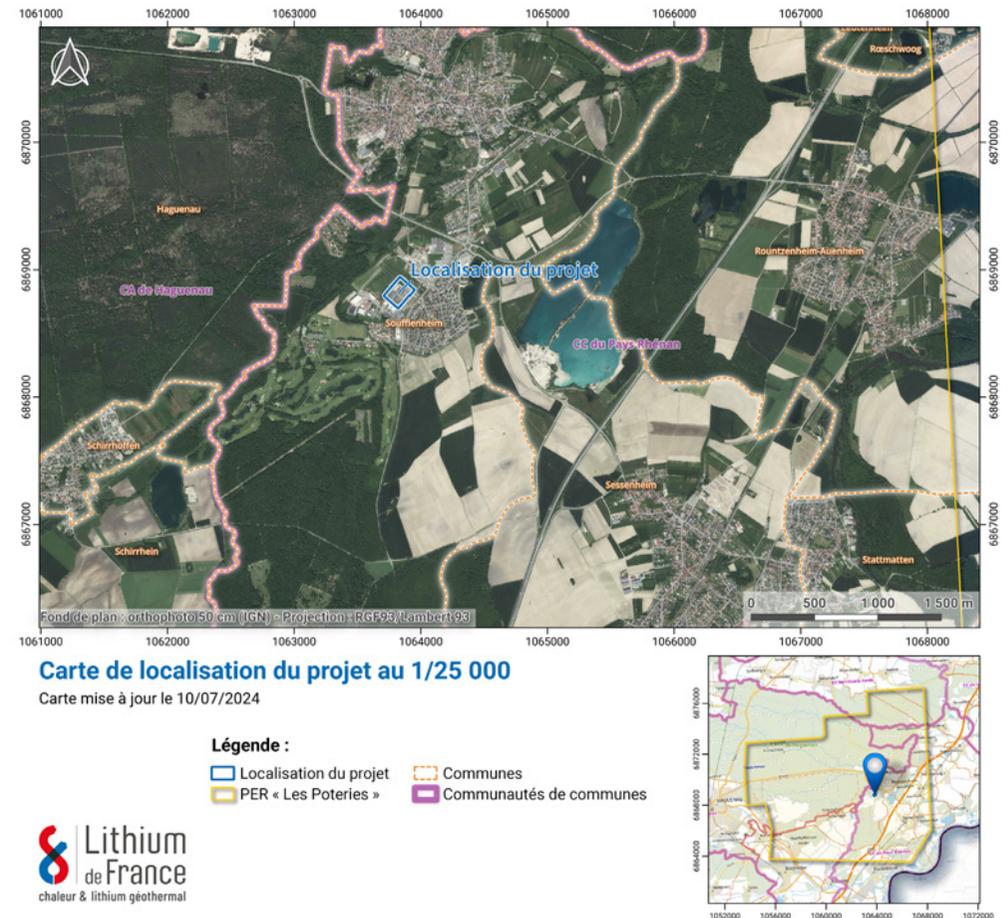


Figure 4.1 : Carte de localisation du projet sur la commune de Soufflenheim

5 PROGRAMME DES TRAVAUX

Le phasage du programme exploratoire, objet de la présente demande d'autorisation environnementale d'ouverture de travaux miniers est synthétisé dans la figure 5.1 ci-dessous :



Figure 5.1 : Les grandes phases du projet exploratoire "Les Poteries Exploration"

5.1 Travaux préliminaires de préparation du site

Ces travaux, préalables à l'installation d'un appareil de forage, ont pour objectif l'aménagement d'une plateforme de chantier suffisamment dimensionnée pour recevoir toutes les installations et matériels indispensables à la bonne exécution du forage exploratoire. La plateforme de chantier a pour fonction de réceptionner l'ensemble du chantier dont le forage exploratoire.

La plateforme de chantier correspond à une aire préparée, nécessitant l'emploi de méthodes et moyens standards de terrassement et de génie civil et faisant succinctement appel à des travaux d'arasement, de nivelage, d'excavation, de pose de géotextiles, de recouvrement, de compactage, de coulage de radier, de mise en place de dalles et parois renforcées et d'implantation de drains et merlons.

La plateforme de chantier sera préparée et réceptionnée préalablement à la mobilisation sur site de l'appareil de forage et des différents services d'assistance aux opérations de forage.

Elle comprend :

- Les branchements au réseau électrique de distribution et au réseau d'eau ;
- La mise en place des dispositifs de gestion des eaux (drainage et collecte des eaux pluviales/eaux usées) ;
- Le dispositif de traitement des eaux usées ;
- Les dispositifs de stockage, de traitement et de la collecte de déchets de toutes natures ;
- Les moyens de sécurité pour la prévention et le traitement des nuisances et des incidents ;
- Les moyens de la protection de l'environnement et la protection du personnel.

La durée des travaux de préparation du site est estimée à 5 mois. Lorsqu'elle sera finalisée, la plateforme de chantier sera clôturée et sous surveillance permanente.

2. NOTE DE PRESENTATION NON TECHNIQUE

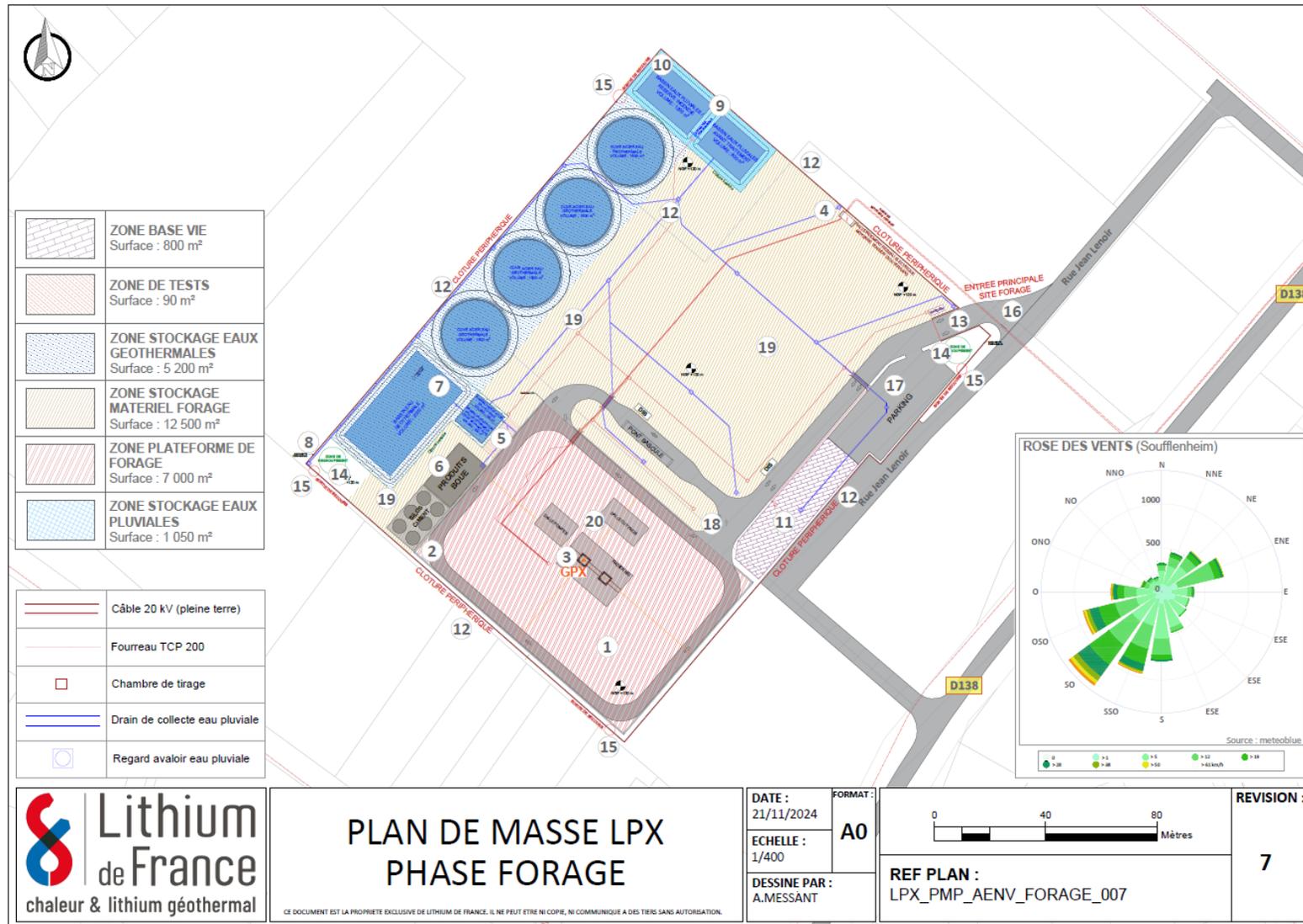


Figure 5.2 : Plan de masse de la phase chantier

La Figure 5.2 ci-dessus résume l'implantation du chantier sur le terrain.

Les éléments essentiels sont les suivants :

1 Plateforme de forage pour accueil de l'appareil de forage avec un radier cimenté en fonction de la répartition des charges de l'appareil de forage, des pompes et des générateurs.

L'ensemble des services nécessaires aux opérations forage et puits sera installé sur cette zone.

2 Un système de drainage pour la récupération des fluides résiduels sans contamination du sol.

La réserve de carburant, nécessaire en cas de coupure de courant, sera positionnée avec self-rétention et confinement.

L'ensemble de la plateforme de forage est nivelé, en concassé-compacté avec une géomembrane sous-jacente.

La structure radier à portance renforcée est une structure stable, en béton renforcé, adaptée aux semelles de l'appareil de forage et aux charges en place.

L'ensemble est drainé pour assurer l'écoulement des eaux.

3 L'emplacement de la tête de puits est positionné pratiquement au centre de la zone de forage.

Simultanément à la réalisation de la plateforme de forage sera construite une cave pour la tête de puits sur l'emplacement mentionné. Les dimensions approximatives de la cave seront 5 m L x 4 m l x 2,50 m P.

Le design de la cave prend en compte les éléments suivants :

- Tube guide, diamètres 30", installés par battage à 30 – 40 m de profondeur et cimenté en fond de cave. Le tube guide constitue la première continuité hydraulique entre le puits et la surface pour la première phase forage.
- Adapteurs et tête de puits pour supports des tubages suivants et du BOP (« Blow Out Preventer » ou bloc de fermeture d'urgence du puits, positionné au-dessus de la cave en élévation).

4 La zone alimentation Haute-Tension (20 kV) en bordure Nord-Est du chantier.

5 La zone de test de puits comprend le collecteur / distributeur pour séparation des effluents, échantillonnages et mesures de débit. Un merlon est prévu pour la rétention et le drainage des effluents en cas de fuite en surface de tout type de fluide.

6 La zone de produits boue et de nettoyage est prévue pour le stockage des produits chimiques sur une dalle stable avec système de rétention et confinement pour prévenir des impacts potentiels des produits chimiques sur la qualité des sols.

7 La zone de bassins de stockage est destinée à recevoir les fluides (eau pour formulations ou traitements des fluides de forage), le retour des fluides de forage et leur stockage provisoire, le retour des fluides récupérés lors du séchage des déblais, et le stockage des fluides géothermaux lors de la réalisation de tests de puits.

La capacité totale des bassins est calculée pour qu'ils aient la possibilité d'absorber les fluides géothermaux durant les tests de puits aux débits souhaités. Une capacité de 7500 – 8000 m³ permet jusqu'à 30 h de test en continu à un débit de 250 m³/h. Cette capacité totale de 7500 à 8000 m³ sera fournie par 3 à 4 bassins indépendants de 2000 à 2500 m³ chacun. Cette division permet d'opérer individuellement avec chaque bassin et ainsi de mieux ségréger les fluides ; elle augmente également la flexibilité opérationnelle et limite l'impact au sol des travaux de génie civil et facilite la remise en état finale. Le fluide géothermal atteindra les bassins de stockage à une température inférieure à 100°C après être passé par les équipements de test.

En fin de test du puits, le fluide géothermal sera réinjecté dans son réservoir naturel d'origine.

8 Le système de drainage de l'ensemble du site qui récupère tous les fluides résiduels et les dirige vers les bassins de rétention. L'altitude est la même pour l'ensemble du site.

9 Le bassin de traitement des eaux pluviales et huileuses (avant traitement) est implanté au Nord.

- 10 Un bassin destiné à la réserve anti-incendie (Nord) qui est alimenté par les eaux pluviales traitées. Le trop plein de ce bassin est raccordé à l'assainissement pour évacuation (avec une vanne de sectionnement de secours).
- 11 Les zones de vie comprennent les zones de bureaux pour superviseurs et compagnies de services, la base de vie incluant les zones d'hygiène et récréatives.

Les principaux éléments relatifs aux aspects sûreté et sécurité sont :

- 12 La zone clôturée.
- 13 L'accès est contrôlé par une barrière et un gardiennage.
- 14 Les 2 points de rassemblement en cas d'alerte.
- 15 Les sorties de secours (x4) au Nord, Sud, Est et Ouest pour palier tout incident selon son emplacement, sa nature et un blocage éventuel des accès liés au sens du vent.

Les bassins creusés seront clôturés et une alarme générale modulée sera opérationnelle.

Les dispositifs pour circulation et stockage sont :

- 16 Les aires de dégagements et d'accès.
- 17 Les aires de stationnement.
- 18 Les aires de livraison et retournement.
- 19 Les aires de stockage.

Des zones de circulation piétonnes, les principaux accès aux puits ainsi que les zones de circulation vers les points de rassemblement et vers les sorties de secours seront également prévues.

Les zones de travaux de génie civil et constructions sont :

- 20 Les zones construites (plateformes et radiers béton) qui sont soumises à études préalables, incluant sans s'y limiter topographie, études géotechniques, compte rendu de stabilité, ...
- Pour les zones de circulation, stockage, test de puits, base vie et bassins, une préparation de type décapage, nivelage, compactage, couche de finition en matériaux naturels calibrés est suffisante. Cette option permet une remise en état avec moindre impact sur le milieu.

5.2 Réalisation du forage exploratoire

L'appareil de forage sélectionné est un appareil spécifique pour les forages de puits géothermaux, fonctionnant à l'énergie électrique et avec un système hydraulique et automatique pour les manœuvres.



Figure 5.3 : Vue globale du chantier de forage avec l'appareil ADS B04

- 1 Générateurs Diesel pour une alimentation électrique de secours
- 2 Transformateur HTA/BT
- 3 Centre de contrôle
- 4 Quartiers fluides de forage : Préparation, stockage, traitements
- 5 Pompes de forage

- 6 Retours fluides de forage du puits, séparation des solides (sans pression)
- 7 Sous structure de l'appareil. Les caissons supportent les charges de l'appareil en opération. Les têtes de puits sont au sol (caves) dans l'espace entre les caissons, le bloc de fermeture du puits (pour le contrôle des éruptions) est dans l'axe du puits, sous le plancher de forage.
- 8 Plancher de forage, centre de manipulation et manœuvres des garnitures, centre de contrôle du forage
- 9 "Top Drive swivel" ou organe d'entraînement des garnitures de forage en rotation/translation haut/bas
- 10 Mat, support des mouvements haut et bas des garnitures de forage
- 11 Dispositif de collecte, levage et livraison automatique des équipements tubulaires au plancher de forage pour utilisation dans le puits
- 12 Support horizontal pour collecte de tubulaires
- 13 Refroidisseur de fluide de forage
- 14 Ateliers de maintenance et stockage des pièces de rechange
- 15 Réserve de Diesel pour les générateurs pour une alimentation électrique de secours
- 16 Pont-Bascule pour la vérification du poids total des camions
- 17 Silos de ciment

L'intégration paysagère de la machine de forage dans le secteur sud industrialisé de Soufflenheim est présentée dans le montage photographique en Figure 5.4 ci-après.

2. NOTE DE PRESENTATION NON TECHNIQUE



Figure 5.4 : Modélisation de l'appareil de forage au droit du site en sortie Sud de Soufflenheim

2. NOTE DE PRESENTATION NON TECHNIQUE

L'architecture du puits sera conçue pour que l'ouvrage réponde aux spécificités et contrastes géologiques (stratigraphie, caractéristiques des formations, isolement des formations hydrauliquement ou mécaniquement incompatibles avec des réservoirs et des aquifères), aux contraintes en place (pressions, températures, contraintes mécaniques) et aux nécessités de fonctionnalités du puits.

L'équipement du forage (casing ou cuvelage) s'effectuera au fur et à mesure de son avancement. L'espace entre le tubage et le trou est cimenté à l'avancement ce qui isolera parfaitement les terrains du puits et également les éventuels aquifères traversés, garantissant ainsi leur protection.

Les caractéristiques envisagées de l'ouvrage sont résumées dans le tableau suivant et illustrées à la suite dans la Figure 5.5.

Tableau 5.1 : Caractéristiques technique de l'architecture du puits GPX

Diamètre extérieur	Description	Cote sabot	Cote top	Ciment	Observation
30" (76.2 cm)	Tube guide	18 – 25 m	Surface	Du sabot à la surface	Installé par le génie civil, battage
20" (50.8 cm)	Tubage de surface	± 510 m	Surface	Du sabot à la surface	Support tête de puits, support BOP, ancrage puits/sol et connexion puits/surface
13 3/8" (34 cm)	Tubage intermédiaire	± 1520 m	Surface	Du sabot à la surface	/
9 5/8" (24.5 cm)	Tubage de production, Liner	± 2000 m	± 1400 m	Du sabot au top	/
8 1/2" (21.6 cm)	Open hole	/	± 2000 m	/	Zone de réservoir potentiel

La bonne réalisation du forage est conditionnée par l'étanchéité entre le casing et les terrains traversés. La cimentation est une opération déterminante à laquelle une attention particulière sera apportée. Une fois cimenté, le casing sera inamovible et demeurera étanche pendant toute la durée de vie de l'ouvrage

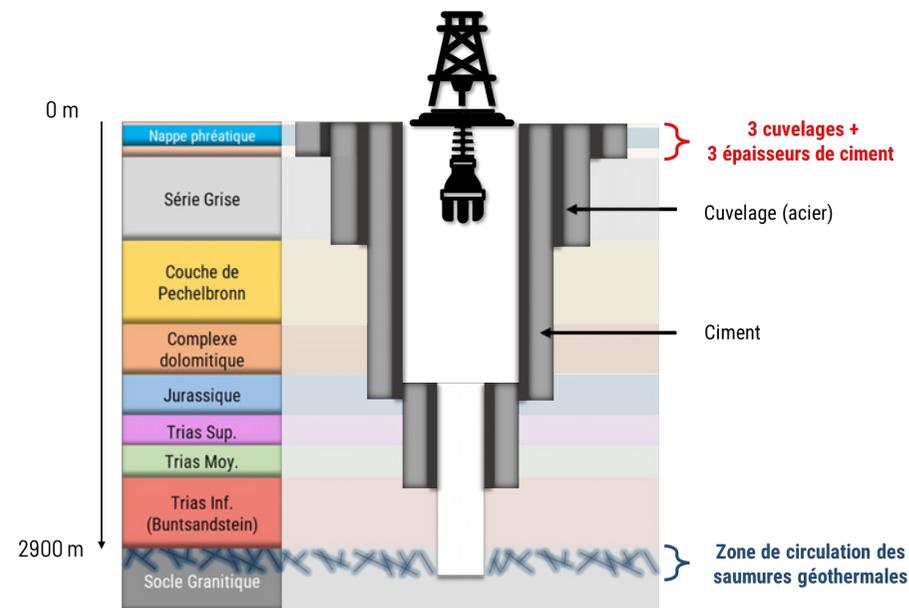


Figure 5.5 : Cuvelage du puits GPX

5.3 Acquisitions de données

Le socle profond n'ayant pas été atteint par d'autres puits profonds sur l'emprise du PER et sa nature ainsi que la présence et les propriétés thermiques et géochimiques de la ressource restant incertaines, plusieurs types de données vont donc être acquises dans le puits. Quelques exemples de données sont décrits à la Figure 5.6 ci-après.

C'est pourquoi, le forage exploratoire, objet de la demande d'AENV « Les Poteries Exploration » a pour objectif :

- Une estimation de la température, de la pression, du champ de contrainte et du régime tectonique du réservoir ciblé ;
- Une caractérisation de la fracturation naturelle à l'échelle du puits et des altérations hydrothermales associées ;
- L'identification de la nature du socle et la présence de ressource géothermale ;
- La précision de la profondeur des horizons géologiques ;
- L'échantillonnage des fluides circulant dans les réservoirs profonds ;
- L'échantillonnage suivi de l'analyse du fluide géothermal pour confirmer les teneurs en lithium. Pour réaliser cet échantillonnage, un dégorgement du puits sera opéré au préalable après un premier nettoyage du puits suivi d'une circulation d'eau douce afin de débarrasser l'ouvrage des boues de forage pouvant colmater les parois.
- Une évaluation de l'*injectivité et/ou de la productivité* du puits menée en fonction des indices préalablement identifiés du réseau naturel de fractures

La corrélation de l'ensemble de ces données permettra de confirmer la nature du réservoir, la présence de la ressource et la faisabilité d'un projet industriel.

ZOOM SUR LES MESURES ET DONNEES ACQUISES GRACE AU FORAGE

- (1) Des mesures en cours de forage comme l'enregistrement des paramètres de forage, les paramètres de boue et la détection des indices gazeux (CH₄, CO₂ et H₂S) permettant de renseigner sur les zones de circulations de la ressource à l'échelle du puits.
- (2) Un échantillonnage régulier des déblais de forage une observation microscopique et une mesure de la calcimétrie. Elle permettra de renseigner sur les profondeurs des horizons géologiques et la nature du réservoir ciblé. La caractérisation minéralogique, géochimique et structurale des formations sera complétée par des acquisitions de carottes de paroi (*Side Wall Coring*) ou de plus gros diamètre si les conditions techniques sont réunies et si la stabilité du puits le permet.
- (3) Des mesures de *diagraphie* permettant de caractériser les formations rencontrées. Ces données ont pour but de renseigner sur la fracturation naturelle, le champ de contrainte ou encore les propriétés *pétrophysiques* du réservoir. Deux types de conduites des diagraphies peuvent être utilisées ; les diagraphies en cours de forage (type *Logging while Drilling* ou LWD) et les diagraphies au câble (type *Wire Line Logging*) réalisées à l'issue de la section de forage et avant la descente du cuvelage. Le choix entre ces deux types de mesures dépend des contraintes techniques, notamment de la stabilité des puits. Toutes les précautions seront prises pour que les données acquises soient de bonne qualité et suffisantes.
- (4) Des mesures dynamiques avec notamment les mesures de températures acquises sous forme de profil après les opérations de forage mais également à l'équilibre après plusieurs semaines de repos du puits. Des mesures de température au niveau du réservoir permettant d'évaluer la température d'exploitation finale seront également effectuées à l'issue du forage.
- (5) Les caractéristiques des fluides circulant en profondeur (densité, pH, salinités, composition, conductivité, potentiel d'oxydo-réduction...)

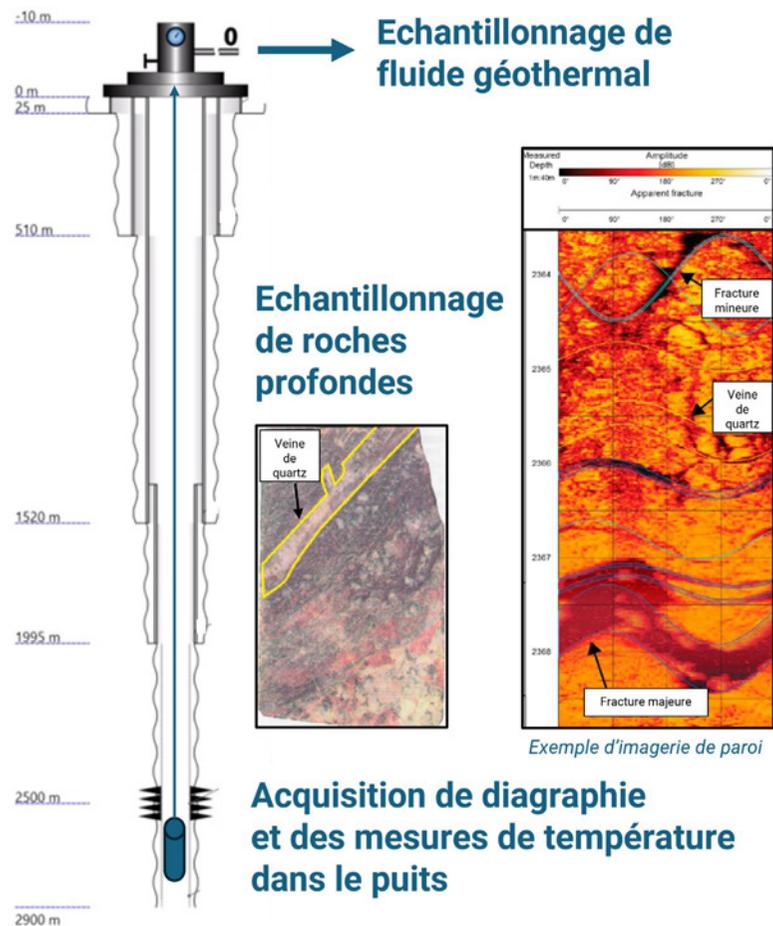


Figure 5.6 : Données acquises dans le forage exploratoire afin de caractériser le réservoir et la ressource. Les exemples d'imageries de paroi et la carotte sont issus de la publication de Vidal et al. (2017).¹

5.4 Arrêt des travaux

Lorsque les échantillons auront été prélevés et les tests de puits réalisés, si les conclusions ne sont pas favorables pour la poursuite du projet, Lithium de France procédera à la fermeture du puits dans les règles de l'art et en conformité avec la réglementation en vigueur.

Ci-après,

Figure 5.8, un schéma simplifié de la fermeture du puits GPX selon les règles actuellement en vigueur.

Dans le cas où un gîte serait identifié au droit du forage exploratoire, Lithium de France étudiera la faisabilité d'un futur projet de doublet géothermique et, si un tel projet était envisagé, procédera à une modification complète du dossier pour la réalisation d'un doublet de géothermie. Les obligations d'abandon seront maintenues mais reportées à la fin des activités envisagées qui seront régies sous le régime d'une concession d'exploitation.

¹ Source: Vidal, J., Genter, A., Chopin, F., 2017. Permeable fracture zones in the hard rocks of the geothermal reservoir at Rittershoffen, France. J. Geophys. Res. Solid Earth 122. <https://doi.org/10.1002/2017JB014331>

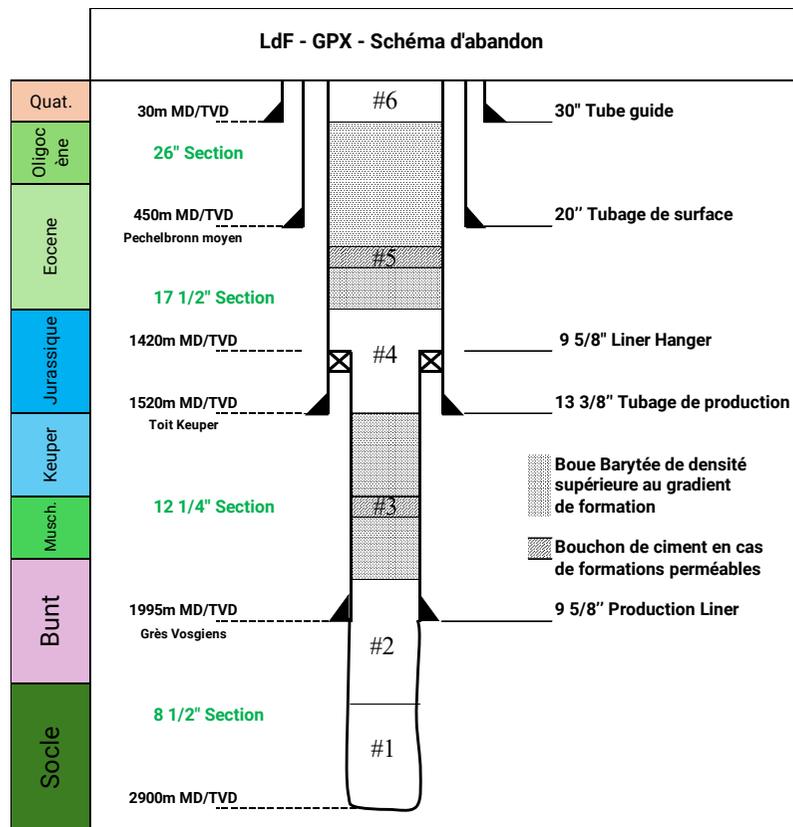


Figure 5.8 : Schéma simplifié de fermeture du puits GPX

5.5 Planning prévisionnel des opérations

La chronologie du projet exploratoire est reportée sur la frise présentée ci-dessous en Figure 5.8.

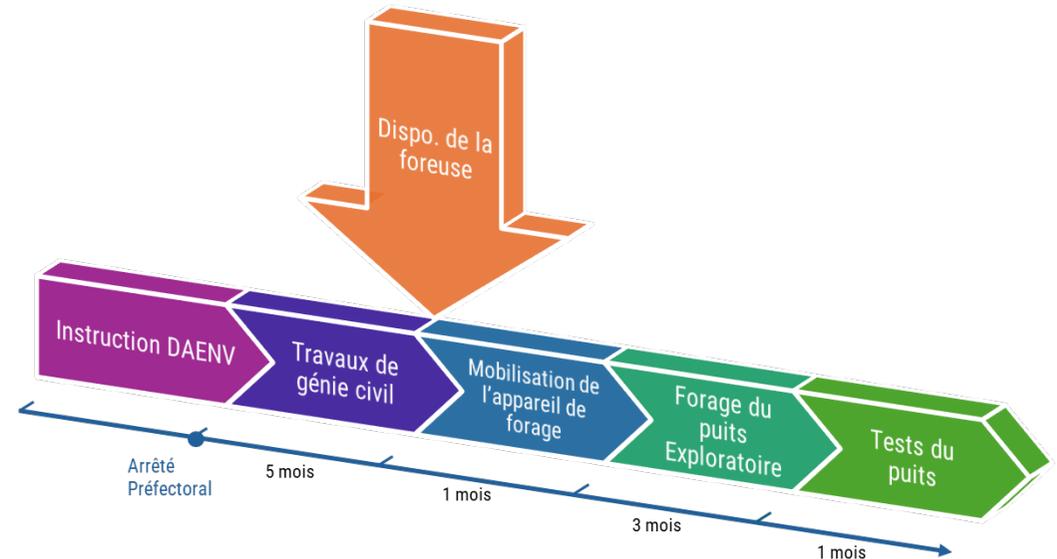


Figure 5.7 : Planning prévisionnel du projet exploratoire sur le PER "Les Poteries"

En l'absence de mesures concluantes sur le potentiel du gîte géothermique et de sa concentration en lithium dissout, Lithium de France procédera à la fermeture du puits dans les règles de l'art, et une remise en état de la zone de travaux.

Dans le cas où un gîte serait identifié au droit du forage exploratoire, Lithium de France étudiera la faisabilité d'un futur projet de doublet géothermique qui fera l'objet d'une nouvelle demande d'autorisation environnementale d'ouverture de travaux miniers.

6 PREVENTION DE LA SISMICITE INDUITE

6.1 Sismicité naturelle

L'activité sismique historique du Fossé rhénan est modérée et régulière avec au total ~170 séismes ressentis entre 782 et 1964 ayant une *intensité épacentrale* $I_0 \geq V$ et 17 séismes destructeurs avec une intensité épacentrale $I_0 \geq VII$ d'après le catalogue SisFrance (<http://www.sisfrance.net>). Le séisme le plus important de la région correspond au séisme de Bâle du 18 octobre 1356 qui causa plusieurs centaines de morts. Son intensité épacentrale a été estimée à IX dans SisFrance, dans le cadre du recalcul de la *magnitude* des événements historiques par Traversa et al. (2018).

Le Fossé rhénan est caractérisé par une sismicité régulière de magnitude de moment estimée de l'ordre de 5 à 5,5, comme les séismes de Lahr en Allemagne du 3 août 1728 ($I_0=VII$, $M_W \sim 6$), du Kaiserstuhl - Rastatt du 18 mai 1737 ($I_0=VII$, $M_W \sim 5,3$), d'Ebingen en Allemagne du 16 novembre 1911 ($I_0=VII-VIII$, $M_W \sim 5,7$), d'Offenburg en Allemagne du 30 décembre 1935 ($I_0=VII$, $M_W \sim 5,3$).

Depuis 60 ans, la répartition de la sismicité instrumentale enregistrée laisse globalement apparaître les mêmes caractéristiques que la sismicité historique, à savoir **une sismicité modérée et régulière**. Sur cette période instrumentale d'après le catalogue SI-Hex (Cara et al., 2015), 10 séismes ont été enregistrés avec une magnitude de moment $M_W > 4,0$. Le plus important est le séisme du 3 septembre 1978 ($M_W=5,0$), situé en Allemagne dans la région de Souabe. Trois autres séismes ont été enregistrés avec des magnitudes M_W comprises entre 4,5 et 5 : le séisme de Tailfingen en Allemagne daté du 26 février 1969 ($M_W=4,7$), le séisme de Tübingen en Allemagne daté du 22 janvier 1970 ($M_W=4,8$) et celui de Rambervilliers du 22 février 2003 ($M_W=4,9$).

Lorsqu'on se restreint à la période entre 1980 et 2024, 43 événements sismiques de magnitude 2,5 ou supérieure ont été localisés dans le Bas-Rhin, d'après le RéNaSS (Réseau National de Surveillance Sismique, <https://renass.unistra.fr/>) (Figure 6.1). 7 d'entre eux ont leur épigénètre situé

à moins de 10 kilomètres du projet « Les Poteries Exploration » ; les magnitudes de ces séismes sont toutes inférieures à 3.

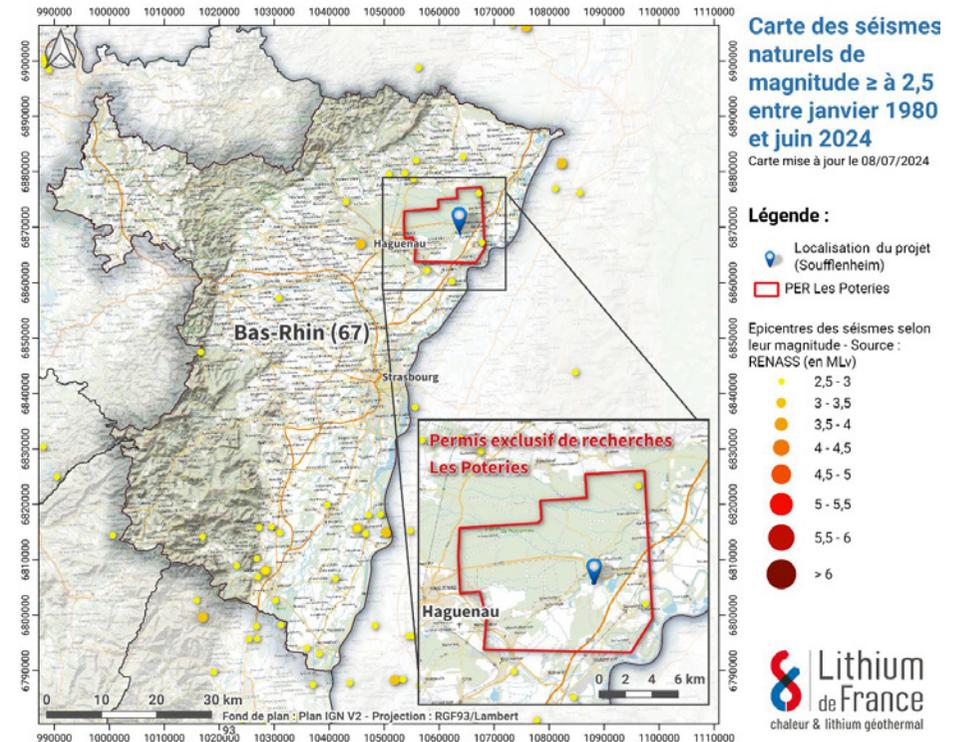


Figure 6.1 : Localisation des séismes naturels de magnitude supérieure ou égale à 2.5 entre 1980 et 2024 dans le Bas-Rhin et ses environs.

6.2 Sismicité induite

Le bilan de sismicité induite effectué sur le site du projet « Les Poteries Exploration » a pour but d'estimer les mouvements du sol qui ont pu être atteints sur le site d'après le pic maximal de vitesse (Peak Ground Velocity – PGV) ou le pic maximal d'accélération (Peak Ground Acceleration – PGA) du sol associé. Ce bilan s'appuie sur la sismicité induite détectée à proximité du site entre 2012 et 2024, correspondant majoritairement à des événements déclenchés par l'activité géothermale des projets de Soultz-sous-Forêts, de Rittershoffen et de Vendenheim. Ces mesures permettent de faire un premier étalonnage du réseau de stations de surveillance sismiques qui est proposé pour surveiller les impacts du projet.

La figure suivante (Figure 6.2) localise les séismes induits répertoriés dans le catalogue du Réness depuis 2012 jusqu'en juillet 2024 et leur impact potentiel sur le site en termes de PGV. Les valeurs de PGV moyen sont systématiquement inférieures à 0,5 mm/s, premier seuil d'alerte du feu de signalisation mis en place pour le projet géothermique de Bâle. Très peu d'évènements ont un PGV supérieur à 0,15 mm/s. Cela est dû au fait que depuis 2012, aucun séisme induit de magnitude de moment supérieure à 3 n'a été enregistré au voisinage direct du site. Les séismes induits les plus forts (magnitude de moment M_w comprise entre 3 et 4) sont localisés juste au nord de Strasbourg. Les évènements enregistrés les 07/05/2024 et 24/07/2024 à proximité de Rittershoffen ont généré un pic d'accélération relativement fort ($PGA > 2.5 \text{ mm/s}^2$) au vu de leur magnitude $M_w = 2.2$; ils ne sont toutefois pas assez proches du site du projet « Les Poteries Exploration » pour que des pics de vitesse significatifs y soient enregistrés ($PGV < 0.2 \text{ mm/s}$).

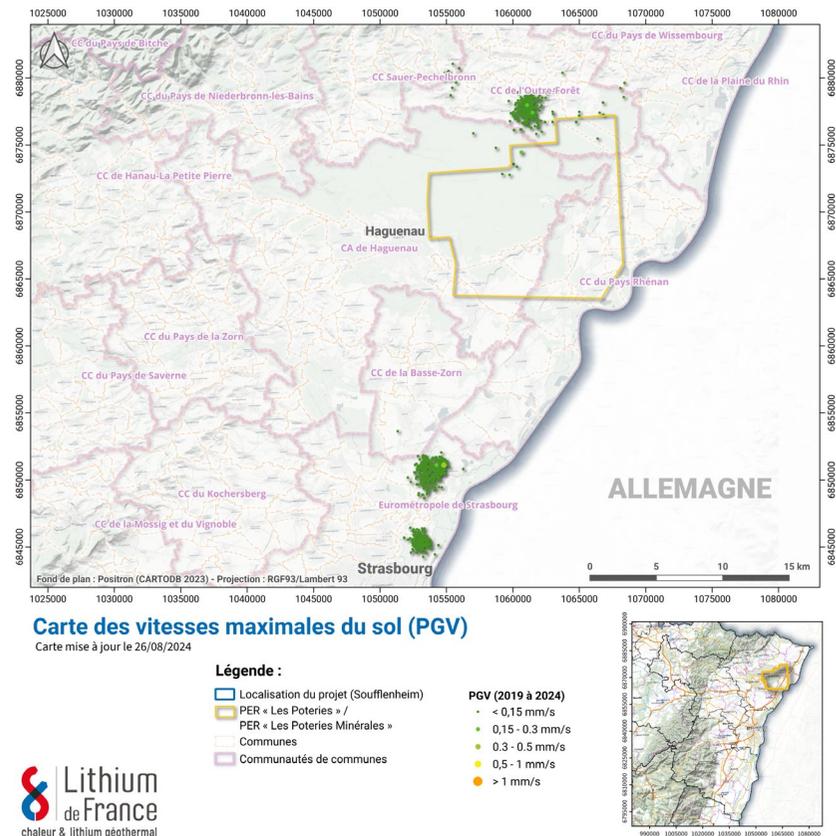


Figure 6.2 : Séismes induits extraits des catalogues Réness depuis 2012 jusqu'en juillet 2024 autour du site et leur impact potentiel sur le site d'étude en termes de PGV. Les magnitudes de moment (M_w) sont comprises entre 0.9 et 3.6.

6.3 Bruit ambiant

La conception du réseau de stations de surveillance sismique est un point clé du dispositif de surveillance du projet « Les Poteries Exploration ». Deux cents capteurs de type WiNG ont été déployés pour caractériser le niveau de bruit sismique ambiant sur une zone d'environ 100 km² autour du projet et ce durant trois semaines. L'intégrité des données a pu être garantie sur les trois semaines d'enregistrement à l'exception d'un seul capteur en bordure de zone qui n'a finalement pas fourni de données exploitables pour le traitement.

Ces mesures ont permis de générer des cartes de bruit ambiant pour identifier les zones les plus calmes et donc les plus propices au déploiement d'équipement de mesure permanent. Sur ces cartes – voir Figure 6.3-, la source de bruit principale est l'axe autoroutier A35 qui recoupe le sud-est de la zone. Les villages de Soufflenheim (4788 habitants), Drusenheim (5292 habitants), Sessenheim (2314 habitants) et Schirrheim (2272 habitants) sont également des sources de bruit. Certains capteurs ponctuels sont affectés par du bruit dans la zone forestière en lien avec des axes routiers ou la sablière de Fulchiron, mais de manière générale, la forêt indivise de Hagenau sur la moitié Nord-Ouest est la plus calme.

Cette étude confirme que le bruit atteint des seuils acceptables pour accueillir des stations permanentes de surveillance microsismique dès lors que l'on s'éloigne des villes et villages et des axes routiers principaux.

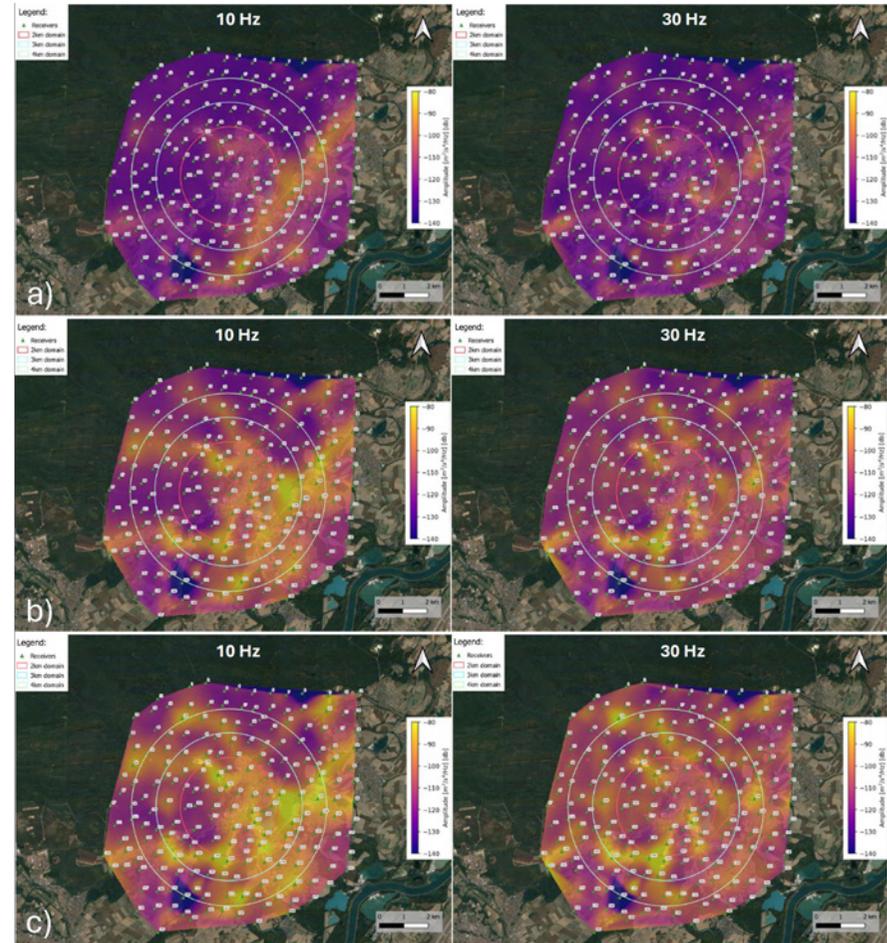


Figure 6.3 : Cartes du bruit sismique à 10 Hz et 30 Hz pour un jour de semaine pendant a) la période silencieuse (percentile 16), b) la période intermédiaire (percentile 50), c) la période bruitée (percentile 84). Les cercles sont centrés sur la coordonnée du fond du puits GPX et sont espacés de 1 km.

6.4 Configuration du réseau de stations de surveillance sismique en fonction du forage, développement et exploitation

À la lumière de cette étude de bruit ambiant, une étude complémentaire a été réalisée par la société ISAMGEO afin de déterminer un réseau de surveillance microsismique préférentiel. Cette étude s'appuie sur une approche numérique afin de déterminer la localisation optimale des différentes stations du réseau respectant les recommandations du Guide de bonnes pratiques pour la maîtrise de la sismicité induite (Maury et al., 2023). Ce réseau comprend 7 *vélocimètres* triaxiaux permanents. Positionnées dans les zones à faible niveau de bruit, les stations prévisionnelles sont présentées dans la Figure 6.4. Il est prévu d'installer la station 4 à l'aplomb du puits exploratoire GPX à 100 m de profondeur. Il est également envisagé de déployer un *accéléromètre* en complément d'un vélocimètre sur cette station 4 de manière à pouvoir mesurer un fort mouvement du sol qui saturerait les vélocimètres.

La mise en place du réseau est prévue de manière progressive à partir du premier semestre 2025. Ce réseau permettra un suivi en quasi-temps réel de l'activité microsismique pendant les opérations sur le puits GPX. Il est à noter que les positions des stations ne sont pas définitives et vont dépendre du permittage (recherche des autorisations d'implantation) effectué dans la zone. Depuis mai 2023, Lithium de France a commencé l'installation de son réseau sismologique sur son PER « Les Sources » avec 5 stations de surface et 2 stations enterrées à 100 m de profondeur.

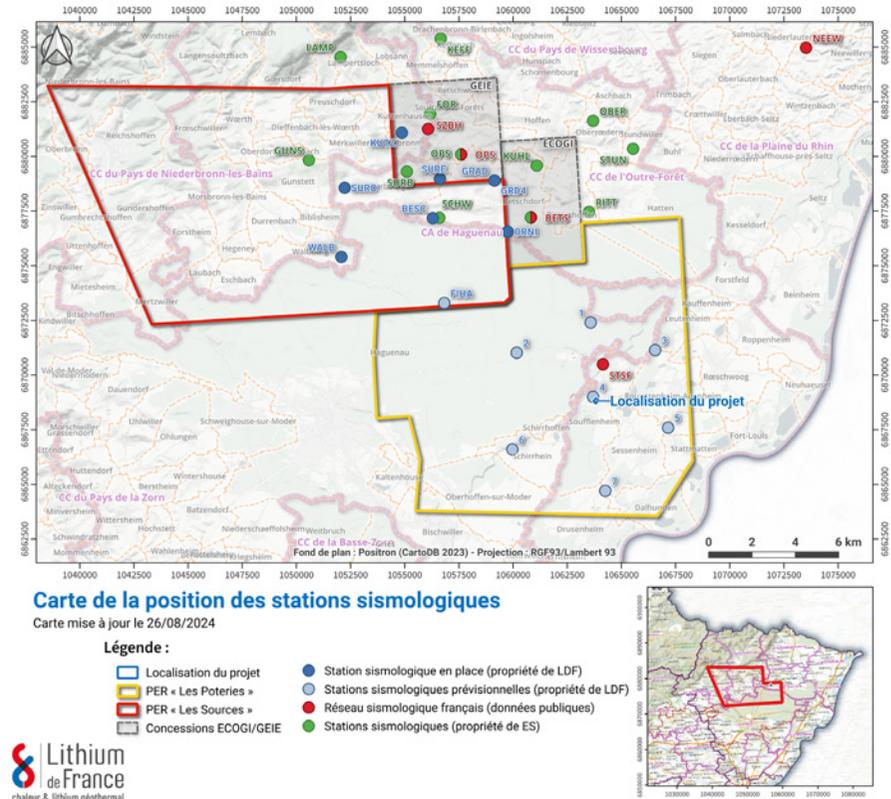


Figure 6.4 : Localisation des 7 stations prévisionnelles pour le projet « Les Poteries Exploration » ainsi que des stations sismologiques existantes des réseaux publics et privés à proximité.

2. NOTE DE PRESENTATION NON TECHNIQUE

Les caractéristiques du réseau de stations sismologiques ainsi conçu sont les suivantes :

- La zone présentant un *écart azimutal* inférieur à 120° couvre un rayon de 2 km autour du puits exploratoire ;
- La magnitude de complétude estimée pour ce réseau est inférieure à 0 jusqu'à 3 km de profondeur, sur un rayon de 2 km autour du puits exploratoire GPX pour la période intermédiaire (Figure 6.5a et b). La magnitude de complétude estimée pour ce réseau est inférieure à 0,3 à 2 km profondeur et 0,4 à 3 km de profondeur, sur un rayon de 2 km autour du puits exploratoire GPX pour la période la plus bruitée (Figure 6.5c et d). Ces valeurs restent inférieures à la magnitude de complétude maximale conseillée, fixée à 0,5 dans un rayon de 2 km autour du puits ;
- Les incertitudes de localisation des événements sismiques sont inférieures à 100 mètres horizontalement et à 500 mètres verticalement dans un rayon de 2 km autour du puits exploratoire GPX jusqu'à 3 km de profondeur.

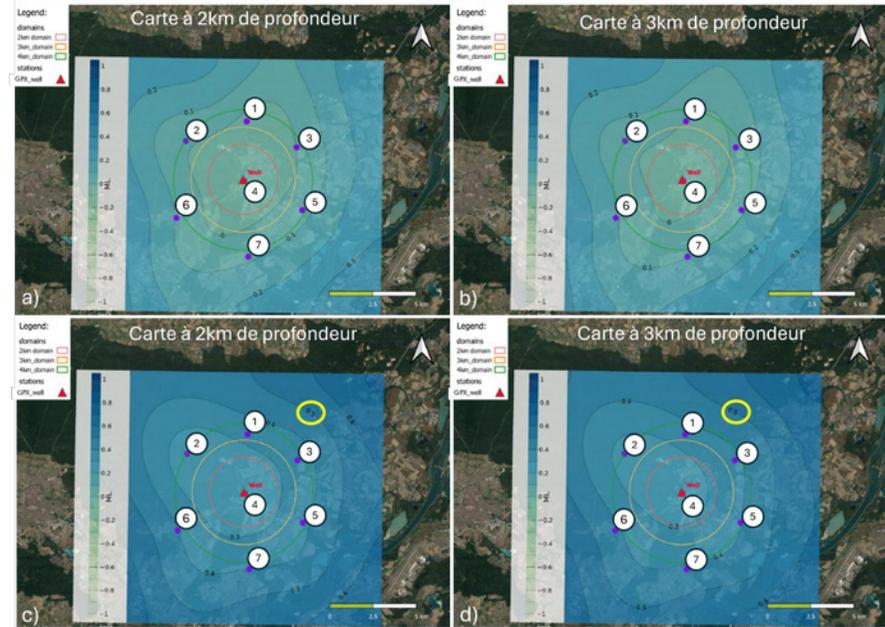


Figure 6.5 : Cartes de magnitude de complétude à différentes profondeurs (2 et 3 km), réalisées à partir des niveaux de bruit médians (percentile 50, a et b) et en période bruitée (percentile 84, c et d) simulée avec la station 4 à 100 m de profondeur.

6.5 Evaluation de l'aléa sismique avant forage

L'aléa sismique caractérise la prédisposition de l'occurrence d'un incident sismique, c'est-à-dire d'un événement dont l'intensité est de nature à provoquer des nuisances pour la population et les enjeux exposés, et à affecter les conditions de déroulement voire la poursuite du projet. Le projet « Les Poteries Exploration » est implanté dans une petite commune faiblement industrialisée associée à une intensité de référence IV sur l'échelle EMS98 et un PGV seuil de 5 mm/s qui sera pris en considération dans l'élaboration du système de feu de signalisation (TLS) dans la section suivante.

Pour le projet « Les Poteries Exploration », l'aléa sismique a été évalué selon les critères définis par le Guide de bonnes pratiques pour la maîtrise de la sismicité induite par les opérations de géothermie profonde (Maury et al., 2023). L'arbre de décision pour définir le niveau d'aléa sismique d'un projet de géothermie profonde est décrit dans la Figure 6.6 ci-après. Les

circulations de la ressource dans le Fossé rhénan sont contrôlées par le système de failles et de fractures, ce qui implique une réponse positive au critère E0. Les indices de perméabilité mis en évidence par les forages voisins indiquent la présence de ces circulations dans le réservoir ciblé par le projet « Les Poteries Exploration », le critère E2 est donc également positif. Enfin, l'état de contrainte suggéré par la littérature défend un système où les failles sont critiqueusement chargées, ce qui valide positivement le critère E4. Le niveau d'aléa 2 (modéré) est retenu pour le projet selon la méthodologie avancée par le Guide des bonnes pratiques. La mise en place des mesures de surveillance, le programme prévisionnel de données à acquérir et le système de feu de signalisation (TLS) ont donc pris en compte les recommandations du Guide des bonnes pratiques pour un aléa de niveau 2.

Ce niveau d'aléa est amené à évoluer au cours de la vie du projet, grâce à l'acquisition de connaissances nouvelles notamment et sera réévalué selon les recommandations du Guide des bonnes pratiques.

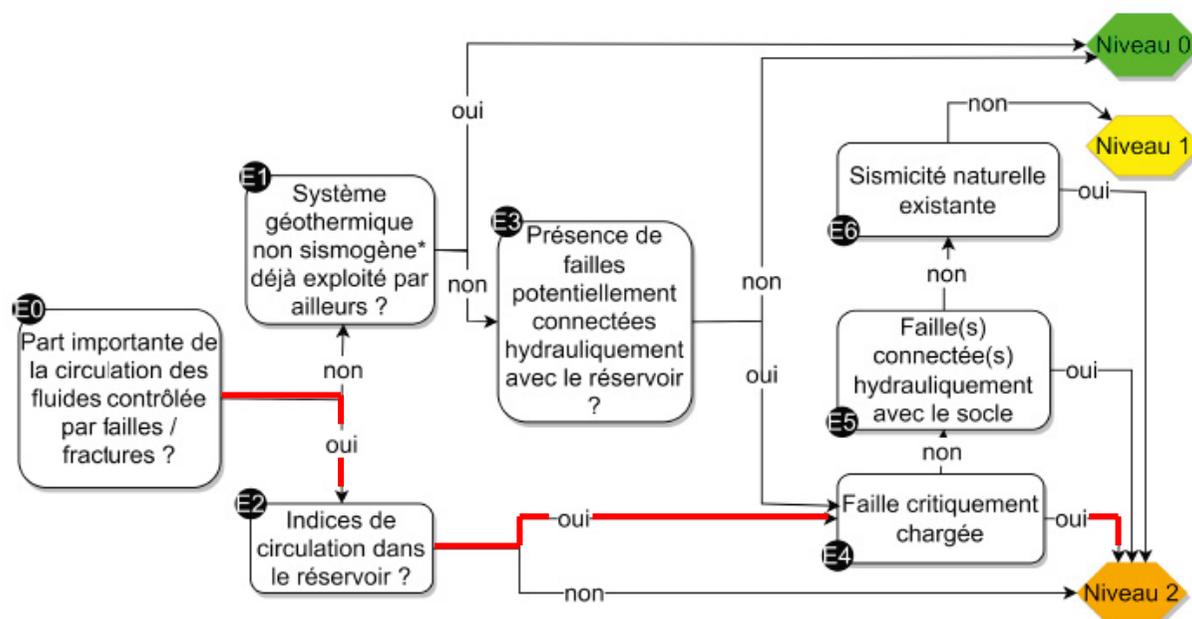


Figure 6.6 : Arbre de décision pour l'évaluation du niveau d'aléa d'un projet avant tout forage profond d'après Maury et al., (2023)

6.6 Evaluation de l'aléa sismique post-forage

Le projet « Les Poteries Exploration » étant de niveau 2, l'aléa sismique avant forage sera réévalué après le forage selon le Guide des bonnes pratiques (Maury et al., 2023) (Figure 6.7). L'évaluation de cet aléa sera transmise à la DREAL et à la préfecture à l'issue du forage et des premiers essais et tests permettant de caractériser le réservoir.

Cette évaluation s'appuiera sur trois critères :

- Le critère initial F0 est un **critère mécanique** : il porte sur le chargement (en termes de contraintes) des failles recoupées par le forage ou à proximité. Ce critère, déjà évalué dans l'arbre de décision précédent (critère E4) sera réévalué au regard des données nouvellement acquises, à savoir, d'une part, les informations sur la structure du réservoir, qui auront permis d'identifier les directions des discontinuités majeures recoupées par l'ouvrage, et, d'autre part, les mesures de contraintes réalisées dans le puits.
- Le second critère F1 est un **critère sismique** : il évalue la sensibilité du réservoir aux faibles modifications de contraintes en se basant sur la présence ou l'absence de sismicité induite par les opérations de forage. L'enregistrement d'une microsismicité significative au cours d'une opération de forage témoigne d'un état mécanique

instable du réservoir, et par conséquent peut être favorable à la survenue d'un incident sismique. Comme préconisé par Maury et al. (2023), si la sismicité enregistrée pendant l'opération de forage, dans un rayon de 1 km autour du forage, est de magnitude supérieure à 0,5 et/ou avec un PGV en surface supérieur à 0,5 mm/s à au moins deux stations et si cette sismicité est ressentie, l'aléa passera en niveau 3, sinon il restera en niveau 2.

- Le troisième critère F2 est un **critère hydraulique** : à l'issue du forage, seuls des essais hydrauliques permettront de caractériser le comportement hydraulique du système puits-réservoir. Une première évaluation de l'indice d'injectivité et/ou de productivité sera disponible. Si celui-ci apparaît trop faible au regard de l'indice ciblé pour l'exploitation, alors il est probable que Lithium de France ait à utiliser des méthodes d'amélioration de l'injectivité et de la productivité. Une réponse positive à ce critère classera le projet « Les Poteries Exploration » en niveau 3 à moins que tous les autres facteurs soient négatifs, auquel cas il restera en niveau 2. Si des opérations de stimulations chimiques, hydrauliques et/ou thermiques sont choisies par Lithium de France alors une nouvelle évaluation de l'aléa au cours du développement de puits adossée au programme de développement de puits sera soumise à la DREAL et à la préfecture.

F0 - Faille critique ment chargée	F1 - Microsismicité pendant le forage*	F2 - Indice d'injectivité « insuffisant »	Niveau d'aléa
oui	oui	oui	3
		non	2
non	non	oui	2
		non	2
	oui	oui	2
		non	2
non	non	oui	Si technologies EGS 2, sinon 1
		non	1

*Si un évènement est ressenti pendant le forage alors le niveau d'aléa passe immédiatement à 3.

Figure 6.7 : Arbre de décision prévisionnel pour l'évaluation post-forage du niveau d'aléa du projet « Les Poteries Exploration ». Cette évaluation sera mise à jour après le forage et les premiers tests hydrauliques de caractérisation du réservoir et transmise à la DREAL et à la préfecture.

6.7 Protocoles opérationnels et systèmes de feux de signalisation (TLS)

Le système de feu de signalisation (Traffic Light System, TLS) est un système de gestion et maîtrise de la sismicité induite basé sur plusieurs critères (magnitude, PGV, etc.) qui définissent différents niveaux d'alertes (trois à quatre) en fonction desquels l'activité industrielle en cours peut être modifiée (cf. Tableau 6.1). Ces derniers sont mis en place dans le but de réduire le risque sismique causé par la sismicité induite et les dommages pouvant être causés sur les bâtiments à proximité du site.

Il s'agit d'un protocole recommandé par le Guide des bonnes pratiques. Ce type de système a été introduit par Bommer et al. (2006) et a été testé sur plusieurs projets de géothermie pour la gestion et la mitigation de l'aléa sismicité induite. Il a pour principal objectif d'éviter l'occurrence d'un incident sismique. C'est donc un outil de pilotage qui permet d'ajuster en quasi-temps réel les paramètres opérationnels (ex : débit, pression injection et volume injecté) en fonction de la sismicité enregistrée par le ou les réseau(x) de sismologique(s) en place. En plus du réseau sismique en place, une mesure de la pression en tête de puits en temps réel sera enregistrée sur site.

Les seuils des feux de signalisation se basent sur deux paramètres : un niveau acceptable du mouvement du sol et la probabilité d'atteindre ce niveau. Le PGV est utilisé comme paramètre pour mesurer les mouvements du sol car ce dernier est un meilleur indicateur des dommages potentiels pouvant être causés par les vibrations que le PGA (Bommer and Alarcon, 2006). Considérant une étude menée par GINGER-CEBTP, 3 seuils basés sur le double critère PGV/magnitude ont été établis :

- Le premier seuil entre le feu vert et le feu jaune est proposé comme étant égal à **0,5 mm/s**. Il s'agit ici du premier niveau d'alerte établi dans le cadre du site de géothermie de Rittershoffen. Pour ces niveaux de PGV, les secousses ne sont pas ressenties par la population et les événements sismiques associés sont de très faible magnitude ($M_L < 1,3$).
- Le deuxième seuil, entre le feu jaune et le feu orange, est défini en fonction du ressenti de la population. Ce seuil est estimé à **1 mm/s**

par Bommer (2017) et correspond à la limite de perception de l'Humain auquel a été ajouté un facteur de sécurité de 2.

- Le troisième seuil, entre le feu orange et le feu rouge, est estimé en fonction des premiers dommages superficiels (dit « cosmétiques ») pouvant se produire sur une structure.

Tableau 6.1 : Seuils du TLS proposés pour le projet « Les Poteries Exploration » avec les PGVs et les magnitudes estimés

	Vert	Jaune	Orange	Rouge
Critère	Pas de ressenti de la population. $ML < 1.3$ PGV < 0.5 mm/s	Pas de ressenti de la population. $1.3 \leq ML < 1.7$ 0.5 mm/s \leq PGV < 1 mm/s	Ressenti de la population. $1.7 \leq ML < 2.5$ 1 mm/s \leq PGV < 5 mm/s	Premiers dommages superficiels. $ML \geq 2.5$ PGV \geq 5 mm/s
Protocoles	Système nominal. Pas de modification s à apporter.	Communication au superviseur. Poursuite du pompage, ne pas augmenter le débit.	Maintenir la pression de tête de puits en dessous de la pression à laquelle l'événement sismique s'est produit.	Arrêt progressif des opérations

Les protocoles proposés en fonction du niveau d'alerte déclenché sont les suivants :

- **Vert** : Les activités sont maintenues, aucun seuil n'est dépassé.
- **Jaune** : Les activités sont maintenues. Les injections et le pompage se poursuivent sans augmentation du débit. Aucune secousse n'est ressentie par la population. La pression en tête de puits est gardée constante. Le débit sera adapté pour que la pression soit constante et sera diminué pour cela si besoin.
- **Orange** : Un dépassement des seuils qui s'est produit a déclenché une notification, une documentation associée et la prise de décision d'atténuer le risque si nécessaire. La pression de tête de puits est maintenue en dessous de la pression à laquelle l'évènement s'est produit. Comme pour le seuil précédent, le débit sera adapté pour que la pression soit constante et sera diminué pour cela si besoin. Une étude complémentaire de l'évènement est réalisée par les équipes. L'évènement relié à cette alerte peut correspondre à une secousse ressentie à proximité du site sans générer d'impact sur le bâtiment.
- **Rouge** : Un dépassement des seuils qui s'est produit a déclenché l'alarme qui sera suivi rapidement de l'arrêt progressif des opérations par paliers. Une étude et une modélisation complémentaire est réalisée par les équipes, puis soumise à une expertise et transmise aux autorités locales. Comme l'alerte orange, la secousse en relation avec le déclenchement de l'alarme rouge correspond à une secousse ressentie à proximité du site sans que des dégâts importants sur les bâtiments aient lieu.

Les seuils de PGV proposés ci-dessus ne prennent pas en compte des effets de site qui sont au stade avant forage inconnus mais qui existent puisque les seuils résultant de l'étude menée par GINGER – CEBTP sont différents de ceux du projet voisin ECOGI à Rittershoffen. Ils seront donc à réévaluer avec les données acquises et spécifiques au projet. La DREAL sera contactée lors de chaque déclenchement de niveau d'alerte Jaune, Orange ou Rouge.

Le TLS pourra également prendre en compte la réponse sismique du réservoir (à travers des seuils en termes de densité ou de répartition spatio-

temporelle des événements sismiques, par exemple). Toutefois, une calibration de cette réponse est nécessaire avant toute application à un TLS, afin d'adapter les seuils au site considéré. Ainsi, cette amélioration du TLS n'est pas à considérer avant les tests de puits *a minima* et les premiers enregistrements sismiques induits.

6.8 Conclusions du rapport d'expertise

Le document présentant les études d'exploration, les modélisations du réservoir avant forage, les évaluations de l'aléa sismique et les dispositifs de prévention développés par Lithium de France a bénéficié d'une revue d'expert de Mariane Peter-Borie et Fabien Cubizolle de la société Lookup geoscience. L'avis porte sur l'aléa incident sismique induit et la mitigation de celui-ci produit à partir des informations contenues dans le mémoire technique traitant « les mesures mises en œuvre et celles envisagées pour connaître la géologie du sous-sol impacté par les travaux et de comprendre les phénomènes naturels, notamment sismiques, susceptibles d'être activés par les travaux » tel que défini dans le code minier (Article L. 164-1-2 du code minier et 15° de l'article D. 181-15-3 du Code de l'environnement). Cet avis s'appuie sur les recommandations du « Guide de bonnes pratiques » (Maury et al., 2023) et stipule en conclusions :

« Il est important de rappeler qu'une opération telle que proposée par le projet « Les Poteries Exploration », c'est-à-dire un forage dans lequel sera injecté et produit des fluides s'accompagnera très probablement de sismicité induite, c'est cependant la probabilité d'occurrence d'un incident sismique, défini comme un évènement sismique dont l'intensité est de nature à provoquer des nuisances pour la population et les enjeux exposés, et à affecter les conditions de déroulement voire la poursuite du projet, qui est ici expertisé.

Le forage GPX est un forage exploratoire qui s'inscrit dans l'exploration du réservoir géothermique au droit de Soufflenheim, au niveau du PER des Poteries. L'expertise considère ici sa vocation exploratoire et ne se prononce pas quant à une possible transformation de la finalité de forage en puits d'exploitation, car cela ferait l'objet d'une nouvelle Demande d'Autorisation Environnementale. Le statut exploratoire du projet le distingue des forages considérés habituellement par le guide des bonnes pratiques (Maury et al.,

2023), et nous considérons que le niveau de connaissance attendu pour un tel forage, peut, en conséquence, être moindre (ce forage a pour objectif d'apporter de la connaissance), en particulier concernant la recommandation d'acquérir une imagerie 3D du réservoir avant la demande de forage.

Le document technique fourni par Lithium de France expose une connaissance et un plan d'opérations qui nous paraissent globalement satisfaisant pour la finalité exploratoire du forage.

Nous notons et appuyons le principe de l'attente d'une validation par les autorités compétentes, en cas :

- de réalisations de stimulations pour évaluer la capacité du réservoir à être amélioré ;
- de la transformation de ce puits d'exploration en puits d'exploitation.

En effet, ces dispositions vont dans le sens de la sécurité en laissant le temps de l'analyse et de la réflexion avant d'entamer notamment la phase la plus sismogène, la stimulation du puits.

Nos recommandations d'amélioration du document technique portent ainsi principalement :

- sur les éléments géologiques incertains qui peuvent avoir un impact sur la circulation des fluides dans le réservoir ciblé par GPX, et notamment la faille EW en bordure sur de la zone ciblée et la nature du socle potentiellement volcanique et non granitique ;
- sur la définition d'un protocole d'essai sécuritaire (paliers de débit, suivi de la pression, critères et protocoles du TLS en accord avec la composante exploratoire du forage) et la mise en avant de la capacité de Lithium de France à s'adapter en cas de réponse du réservoir différent de celui prédit.

En conclusion, et sous réserve d'apports des compléments recommandés, les informations, connaissances et protocoles communiqués par Lithium de France nous semblent globalement adaptés à la mitigation de l'aléa incident sismique dans le cadre de la réalisation d'un forage exploratoire. »

L'ensemble des recommandations ont été prises en compte et les réponses aux questions posées par le rapport d'expertise ont été incluses dans la version finale du dossier de Demande d'Autorisation Environnementale d'Ouverture de Travaux Miniers « Les Poteries Exploration » soumis à la DREAL et à la préfecture.

7 GOUVERNANCE DES DONNEES ET MISE A JOUR DES MODELES

Le présent document décrit une certaine quantité de données acquises par Lithium de France lors de la campagne d'exploration mais également celles que l'opérateur prévoit d'acquérir dans le cadre du forage de ce premier puits.

Une base de données est en cours de construction au sein de la société afin de conserver et d'archiver les données et les métadonnées selon une méthodologie adaptée aux besoins du projet. Lithium de France prévoit d'utiliser, dans la mesure du possible, des outils « open-source » (accès libre) et des formats ouverts, dans l'esprit du principe FAIR :

- Une partie de nos données seront capitalisées au sein d'une base de données PostgreSQL (open-source, standard international) ou archivées sur un serveur ;
- Ces données pourront être extraites au besoin dans des formats standards et ouverts (csv, shapefile, mini-seed entre autres)

En revanche, pour certains types de données comme les modèles produits ou les interprétations sismiques, il sera plus difficile d'utiliser des formats ouverts en raison de l'utilisation incontournable de logiciels propriétaires.

Lithium de France s'engage à rédiger et stocker systématiquement les métadonnées associées aux jeux de données manipulées par l'entreprise au sein de sa base de données. Ces métadonnées seront au format Dublin Core et seront accessibles à l'administration via une liste ou un catalogue en ligne.

Cette gestion rigoureuse de la base de données permettra d'intégrer les futures données acquises lors de la vie du projet avec comme priorité la traçabilité et la mise à jour des modèles. En effet, les études de ce document présentent des modèles prédictifs avant forage basés sur des données de la littérature, mais ils seront mis à jour continuellement durant la vie du projet à partir des nouvelles données acquises sur le projet « Les Poteries Exploration ». Cette base de données et de modèles sera également organisée à des fins de partage avec les intervenants opérationnels et les parties prenantes mais aussi à des fins de rétro-analyse.

Lithium de France est dans une démarche de partage constructive pour les données de connaissances de réservoir avec les opérateurs de ce même réservoir. À la suite des discussions engagées avec les autres opérateurs, les données permettant de caractériser l'état géomécanique de ce réservoir type XLOT (Zoback et al., 2003) devraient être partagées. Lithium de France propose également que les Rapports de Fin de Sondage et Rapports Techniques de Sondage soient partagés.

Concernant les données sismologiques, des discussions sont en cours entre les opérateurs du Fossé rhénan, le RENASS et la DREAL Grand Est sur une mutualisation de stations sismologiques avec une homogénéisation des formats et une accessibilité grand public de la donnée sismologique. Lithium de France développe son réseau en parallèle ainsi que ses dispositifs de conservation et archivage de données sismologiques et de traitements de paramètres sismiques tout en prenant part à la discussion commune. Lithium de France souhaite que la publication des données au grand public se fasse après traitement (relocalisation, temps d'occurrence et magnitude) et vérification de la donnée par un sismologue dans un souci d'exactitude de l'information communiquée.

Lithium de France s'engage à rendre accessible, aux autorités et sur demande, un certain nombre de ses données via un portail d'échange de données (ex : SharePoint ou serveur FTP), notamment :

- les données de suivi sismologiques, stockées sur un serveur Lithium de France au format mini-seed. ;
- les données de suivi de la phase forage, stockées en base de données, exportables au besoin et visualisables via le rapport journalier de suivi de forage.

8 PREVENTION DES RISQUES GENERAUX

Notre politique Santé Sécurité Environnement, effective pour le projet « Les Poteries Exploration », s'articule sur 6 lignes directrices et se décline à travers nos supports de formation, nos évaluations de risques et la définition des mitigations à mettre en place. Ces éléments sont intégrés dans le *Document unique d'évaluation des risques professionnels (DUERP)*. Par ailleurs, pour gérer les incidents d'*Hygiène Santé et Sécurité (HSE)*, un *Plan d'Urgence* structuré est préparé et sera mis en œuvre dès la phase d'instruction du dossier, afin de permettre la maîtrise de ces incidents quelle que soit leur niveau de gravité.

8.1 Plan d'Urgence

Le Plan d'Urgence permet dans une large mesure de prévenir et limiter les accidents. Il sera revu au moins une fois par semestre.

Une formation est dispensée aux personnes intervenant dans le cadre de ce plan. Un exercice général semestriel permettra de conserver un haut niveau de performance.

Un document présentant les principes du Plan d'Urgence est présenté dans le dossier sous le nom « LPX_AE_007_Doc7_Sécurité publique_V1 ».

8.2 Le Document Unique (DUERP)

Le document unique fait état de la liste exhaustive et hiérarchisée des risques auxquels les personnes et l'environnement sont exposés. Ces risques doivent être assortis de mesures de mitigation afin de les supprimer ou de les réduire le plus possible.

Il s'agit d'une vision et d'une démarche globale qui intègrent tous les aspects de l'activité sur le site de forage, qu'ils soient technique, organisationnel ou humain.

La mise à jour du DUERP est effectuée au moins une fois par an. Toutefois, il existe des cas où l'actualisation du document sera immédiate, à savoir :

- Toute décision d'aménagement important modifiant les conditions d'hygiène et de sécurité ou les conditions de travail ;
- La survenance d'un accident du travail ou d'une maladie professionnelle ;
- L'acquisition ou utilisation de nouveaux matériels, outils ou engins ;
- Toute information supplémentaire concernant l'évaluation du risque (nouvelles technologies, améliorations des connaissances scientifiques ou médicales notamment).

Les risques sont d'abord évalués dans leur état initial (cote du risque initial), c'est-à-dire sans tenir compte des mitigations et barrières de sécurité qui seront mises en place. Puis, ils seront réévalués sous la forme de risques résiduels, sur la base de la liste des mitigations et barrières de sécurité de prévention et de protection qui sont prévues, c'est-à-dire compte tenu de ces mitigations et barrières de sécurité (cote du risque résiduel). L'acceptabilité d'un risque dépend du score de niveau de risque qui combine la probabilité d'occurrence et la gravité du risque, tel que défini dans la table de cotation du risque.

Le DUERP est présenté dans le dossier sous le nom « LPX_AE_006_Doc6_DUERP_V1 »

9 BIBLIOGRAPHIE

- Baillieux, P., Schill, E., Edel, J.-B., Mauri, G., 2013. Localization of temperature anomalies in the Upper Rhine Graben: insights from geophysics and neotectonic activity. *Int. Geol. Rev.* 55, 1744–1762. <https://doi.org/10.1080/00206814.2013.794914>
- Benderitter, Y., Tabbagh, A., Elsass, P., 1995. Calcul de l'effet thermique d'une remontée hydrothermale dans le socle fracturé. Application à l'anomalie géothermique de Soultz-sous-Forêts (Nord Alsace). *Bull. Société Géologique Fr.* 1, 37–48.
- Cathelineau, M., Boiron, M.-C., 2010. Downward penetration and mixing of sedimentary brines and dilute hot waters at 5km depth in the granite basement at Soultz-sous-Forêts (Rhine graben, France). *Comptes Rendus Geosci., Vers l'exploitation des ressources géothermiques profondes des systèmes hydrothermaux convectifs en milieux naturellement fracturés* 342, 560–565. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2009.08.010>
- Dezayes, C., Lerouge, C., 2019. Reconstructing paleofluid circulation at the Hercynian basement/Mesozoic sedimentary cover interface in the Upper Rhine Graben. *Geofluids* 2019.
- Dezayes, C., Lerouge, C., Sanjuan, B., Ramboz, C., Brach, M., 2015. Toward a better understanding of the fluid circulation in the Rhine Graben for a better geothermal exploration of the deep basins, in: *Proceedings of World Geothermal Congress 2015*. Melbourne, Australia.
- Frey, M., Bär, K., Stober, I., Reinecker, J., van der Vaart, J., Sass, I., 2022. Assessment of deep geothermal research and development in the Upper Rhine Graben. *Geotherm. Energy* 10. <https://doi.org/10.1186/s40517-022-00226-2>
- Frey, M., Weinert, S., Bär, K., van der Vaart, J., Dezayes, C., Calcagno, P., Sass, I., 2021. Integrated 3D geological modelling of the northern Upper Rhine Graben by joint inversion of gravimetry and magnetic data. *Tectonophysics* 813, 228927. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2021.228927>
- Frey, M., Bott, J., Cacace, M., Ziegler, M., Scheck-Wenderoth, M., 2019. Influence of the main border faults on the 3d hydraulic field of the central Upper Rhine Graben. *Geofluids* 2019.
- Guillou-Frottier, L., Carré, C., Bourguin, B., Bouchot, V., Genter, A., 2013. Structure of hydrothermal convection in the Upper Rhine Graben as inferred from corrected temperature data and basin-scale numerical models. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 256, 29–49. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2013.02.008>
- Koltzer, N., Scheck-Wenderoth, M., Cacace, M., Frick, M., Bott, J., 2019. Regional hydraulic model of the Upper Rhine Graben. *Adv. Geosci.* 49, 197–206.
- Le Carlier, C., Royer, J.J., Flores, E.L., 1994. Convective heat transfer at the Soultz-sous-Forêts geothermal site: Implications for oil potential. *First Break* 12. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.1994033>
- Lemgruber-Traby, A., Bossennec, C., Béthune, G., Souque, C., Divies, R., van der Vaart, J., Bär, K., Sass, I., 2023. Basin-scale 3D modelling of the northern Upper Rhine Graben: insights into basement fault-related geothermal flow pathways. *Geoenergy* 1, [geoenergy2023-002](https://doi.org/10.1144/geoenergy2023-002). <https://doi.org/10.1144/geoenergy2023-002>
- Magnenet, V., Fond, C., Genter, A., Schmittbuhl, J., 2014. Two-dimensional THM modelling of the large scale natural hydrothermal circulation at Soultz-sous-Forêts. *Geotherm. Energy* 2. <https://doi.org/10.1186/s40517-014-0017-x>
- Maurer, V., Gaucher, E., Grunberg, M., Koepke, R., Pestourie, R., Cuenot, N., 2020. Seismicity induced during the development of the Rittershoffen geothermal field, France. *Geotherm. Energy* 8, 1–31.
- Maury, J., Peter-Borie, M., Dominique, P., De Santis, F., Klein, E., Contrucci, I., 2023. Guide de bonnes pratiques pour la maîtrise de la sismicité induite par les opérations de géothermie profonde. BRGM & INERIS.
- Place, J., Diraison, M., Naville, C., Géraud, Y., Schaming, M., Dezayes, C., 2010. Decoupling of deformation in the Upper Rhine Graben sediments. Seismic reflection and diffraction on 3-component Vertical Seismic Profiling (Soultz-sous-Forêts area). *Comptes Rendus Geosci., Vers l'exploitation des ressources géothermiques profondes des systèmes hydrothermaux convectifs en milieux naturellement fracturés* 342, 575–586. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2010.01.001>
- Pribnow, D., Clauser, C., 2000. Heat and fluid flow at the Soultz Hot Dry Rock system in the Rhine Graben, in: *Proceedings of World Geothermal Congress 2000*. Kyushu - Tohoku, Japan.
- Pribnow, D., Schellschmidt, R., 2000. Thermal tracking of upper crustal fluid flow in the Rhine Graben. *Geophys. Res. Lett.* 27, 1957–1960. <https://doi.org/10.1029/2000GL008494>
- Sanjuan, B., Millot, R., Innocent, Ch., Dezayes, Ch., Scheiber, J., Brach, M., 2016. Major geochemical characteristics of geothermal brines from the Upper Rhine Graben granitic basement with constraints on temperature and circulation. *Chem. Geol.* 428, 27–47. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.02.021>
- Schellschmidt, R., Clauser, C., 1996. The thermal regime of the Upper Rhine Graben and the anomaly at Soultz. *Z. Für Angew. Geol.* 42, 40–44.
- Schill, E., Kohl, T., Baujard, C., Wellmann, J.-F., 2009. Geothermische Ressourcen in Rheinland-Pfalz: Bereiche Süd- und Vorderpfalz (Final report to the Ministry of Environment Rheinland-Palatine).
- Stober, I., Bucher, K., 2015. Hydraulic and hydrochemical properties of deep sedimentary reservoirs of the Upper Rhine Graben, Europe. *Geofluids* 15, 464–482.
- Strobbia, C., Chapart, A., Sweeney, D., Roche, P., Soubeyrand, D., Vidal, J., Foss, S., Bakke, R., Bianchi, T., 2024. Onshore Broadband Seismic Exploration for Geothermal Targets Using a Multiscale Shooting Grid. Presented at the 85th EAGE Annual Conference & Exhibition (including the Workshop Programme), European Association of Geoscientists & Engineers, pp. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024101276>
- Vidal, J., Genter, A., 2018. Overview of naturally permeable fractured reservoirs in the central and southern Upper Rhine Graben: Insights from geothermal wells. *Geothermics* 74, 57–73. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2018.02.003>
- Vidal, J., Genter, A., Schmittbuhl, J., 2015. How do permeable fractures in the Triassic sediments of Northern Alsace characterize the top of hydrothermal convective cells? Evidence from Soultz geothermal boreholes (France). *Geotherm. Energy* J. 3. <https://doi.org/10.1186/s40517-015-0026-4>
- Vidal, J., Wynants-Morel, N., Sy, T., Perez, R., Roche, P.-H., Soubeyrand, D., 2023. Exploring the deep fractured reservoirs for extracting heat and lithium from geothermal brine: a case study of Les Sources (Northern Alsace, France). Presented at the 10th UK Geothermal Symposium, The Geological Society of London.
- Zoback, M.D., Barton, C.A., Brudy, M., Castillo, D.A., Finkbeiner, T., Grollmund, B.R., Moos, D.B., Peska, P., Ward, C.D., Wiprut, D.J., 2003. Determination of stress orientation and magnitude in deep wells. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 40, 1049–1076. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2003.07.001>

Lithium de France

31 rue de la Redoute

67500 Haguenau

contact@lithiumdefrance.com

