



**DEMANDE D'AUTORISATION
ENVIRONNEMENTALE
D'OUVERTURE DE TRAVAUX
MINIERS « LES SOURCES 1 »**

2. Note de
Présentation Non
Technique

DEMANDE D'AUTORISATION ENVIRONNEMENTALE D'OUVERTURE DE TRAVAUX MINIERES « LES SOURCES 1 »

2. Note de Présentation Non Technique

Référence interne	Rédacteur	Vérificateur	Approbateur
LS1_AE_002_Doc2_V1	Jean Caurel Ricardo Perez Olivier Seibel Jeanne Vidal Gwendoline Wattelle Nicolas Wynants	Jérôme Jacquemont David Soubeyrand Laurent Nicolas	Guillaume Borrel
LS1_AE_002_Doc2_V2	Mise à jour du chapitre 6.5 sur le réseau de suivi microsismique		

Date	Destinataire	Organisme
30/05/2024	Mme la Préfète	Préfecture du Bas-Rhin
30/05/2024	Mme Jacquot	DREAL – Grand Est



TABLE DES MATIERES

1	Introduction générale	1
1.1	Lithium de France	1
1.2	L'ambition du Projet de Lithium de France	2
1.3	Un projet de territoire	3
2	Contexte réglementaire	5
2.1	Contexte réglementaire général	5
2.2	L'Autorisation Environnementale	7
3	Identification de la ressource géothermale	9
3.1	Suivi des recommandations	9
3.2	Stratégie exploratoire du premier doublet	10
3.3	Présentation du champ géothermal du Fossé rhénan	11
3.4	Etudes d'exploration réalisées depuis l'octroi du PER « Les Sources »	13
4	Configuration des travaux miniers	15
4.1	Travaux préliminaires de préparation du site	15
4.2	Appareil de forage et boues de forage	17
4.3	Gestion des déblais et des fluides	18
4.4	Approvisionnement en eau et électricité	19
5	Configuration à l'issue des travaux miniers	20
5.1	Exploitation de la boucle géothermale	20
5.2	Le réseau de chaleur	20
5.3	L'unité d'extraction du Lithium	22
5.4	Plan d'implantation et intégration paysagère	22
6	Prévention de la sismicité induite	26
6.1	Sismicité naturelle	26
6.2	Sismicité induite	28
6.3	Prédiction de la sismicité induite à travers des simulations numériques géomécaniques	30
6.4	Bruit ambiant	30
6.5	Configuration du réseau sismique en fonction du forage, développement et exploitation	32
6.6	Evaluation de l'aléa sismique avant forage	38
6.7	Evaluation de l'aléa sismique post-forage	39
6.8	Dispositifs de caractérisation du réservoir	40
6.9	Protocoles opérationnels et systèmes de feux de signalisation (TLS)	42
6.10	Conclusions du rapport d'expertise	43
7	Gouvernance des données et mise à jour des modèles	45
8	Prévention des risques généraux	46
8.1	Plan d'Urgence	46
8.2	Le Document Unique (DUERP)	46

TABLE DES FIGURES

Figure 1.1 : Schéma de concept d'un projet de co-valorisation de la chaleur et du lithium géothermal ..3	
Figure 1.2 : localisation géographique des quatre PER de Lithium de France4	
Figure 2.1 Les étapes clés d'un projet de lithium géothermal en France 6	
Figure 2.2: Etapes d'une procédure d'autorisation environnementale (source : Schéma simplifié du ministère de l'Environnement)..... 7	
Figure 3.1 : Carte de localisation du projet « Les Sources 1 » déposé par Lithium de France dans le cadre de l'Autorisation environnementale d'ouverture de travaux miniers. Stratégie exploratoire du premier doublet..... 10	
Figure 3.2 : Etudes et opérations menées par Lithium de France dans le cadre du projet « Les Sources 1 » selon les recommandations du Guide de bonnes pratiques pour la maîtrise de la sismicité induite par les opérations de géothermie profonde (Maury et al., 2023 ¹) 11	
Figure 3.3 : Schéma conceptuel du doublet forés pour le projet « Les Sources 1 » 12	
Figure 4.1: Implantation des travaux en surface..... 16	
Figure 4.2: Appareil de forage de type géothermie sur chantier (Source : photo d'un chantier de DeutscheErdwärme prise par Lithium de France lors d'une visite de site en 2023) 17	
Figure 4.3: Image des éléments principaux d'un appareil de forage 17	
Figure 5.1 : Schéma de principe de la boucle géothermale..... 20	
Figure 5.2 : Schéma de principe des boucles du réseau de chaleur..... 21	
Figure 5.3: Implantation prévisionnelle de la future centrale géothermique et d'extraction de lithium du projet « Les Sources 1 » 23	
Figure 5.4 : Croquis de structure architecturale de la centrale géothermique 24	
Figure 5.5 : Principe architectural envisagé d'Ouest en Est des bâtiments de boucle géothermale, d'accueil et du bâtiment d'extraction du lithium 24	
Figure 5.6 : Principe architectural du futur site du projet « Les Sources 1 » 25	
Figure 6.1 : Localisation des événements sismiques naturels de magnitude supérieure ou égale à 2.5 entre 1980 et 2023 dans le Bas-Rhin et ses environs..... 28	
Figure 6.2 : Séismes induits extraits des catalogues Réness-LDG depuis 2012 jusqu'en 2023 autour du site et leur impact potentiel sur le site d'étude en termes de PGV. Les magnitudes de moment sont comprises entre 0.9 et 3.6..... 29	
Figure 6.3 : Position des WiNGs dans le cadre de la campagne de mesure de bruit sismique réalisée en juin- juillet 2023 sur le PER Les Sources..... 31	
Figure 6.4 : Cartes du bruit à 10 Hz et 30 Hz pendant a) la période bruitée (en bleu sur les profils PSD), b) la période silencieuse (en rouge sur les profils PSD), c) la période intermédiaire (en vert sur les profils PSD). Les cercles sont centrés sur la coordonnée du fond du puits GS1B et sont espacés de 1.5 km. 32	
Figure 6.5 : Distribution des stations sismologiques en place et envisagées en 2023, à proximité de la localisation de surface du projet d'exploitation géothermique. Les stations installées appartiennent à des réseaux français public (Résif-Epos) et privé (ES : Electricité de Strasbourg). Sept stations ont initialement été proposées pour le projet Les Sources 1 de Lithium de France, en sachant que la station dénommée GRD4 a été installée en mai 2023. 33	
Figure 6.6 : Cartes de magnitude de complétude à différentes profondeurs (1 km, 2 km, 3 km et 4 km), réalisées d'après les DSPs (densités spectrales de puissance) fournies par S ³ 34	
Figure 6.7 : Calcul de l'écart azimutal a) en considérant les 7 stations du réseau envisagée, et b) en prenant en compte la station SZBH du réseau public Résif-Epos. Seule la zone avec un écart azimutal	

inférieur à 120° est représentée. Les cercles concentriques autour de la cible sont affichés tous les kilomètres.....35

Figure 6.8 : Site de la station sismologique de surface GRD4 sur la commune de Betschdorf.....35

Figure 6.9 : Carte de la couverture azimutale associée aux huit stations sismologiques du réseau de surveillance microsismique de Lithium de France.36

Figure 6.10 : Mise à jour des positions des stations sismologiques du réseau de surveillance microsismique de Lithium de France (LdF).....37

Figure 6.11 : Arbre de décision pour l'évaluation du niveau d'aléa d'un projet avant tout forage profond d'après Maury et al. (2023)¹.38

Figure 6.12 Arbre de décision prévisionnel pour l'évaluation post-forage du niveau d'aléa du projet « Les Sources 1 ». 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.40

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 6.1 : Séismes historiquement ressentis d'après la base SisFrance. L'intensité macroscopique a été recalculée avec la loi d'atténuation lorsque celle-ci n'était pas disponible dans SisFrance	27
Tableau 6.2 : Caractéristiques des séismes ayant les plus fortes vitesses au niveau du site.	29
Tableau 6.3 : Seuils du TLS proposés pour le projet « Les Sources 1 » avec les PGVs et les magnitudes estimés	42

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 sismique 3D	Image en 3D du sous-sol obtenue après traitement des données acquises lors d'une campagne de sismique 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.
Densité spectrale de puissance	Répartition de la puissance d'un signal sur une période donnée suivant les fréquences qui le composent. Elle permet de caractériser l'amplitude du bruit ambiant sur la gamme de fréquences considérée.
Diagraphie	Mesure de paramètres physiques dans un forage.
Direct Lithium Extraction (DLE)	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 (DGE)	Direction d'administration centrale française qui octroie les PER de gîtes géothermiques.
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 sismique ayant enregistré l'évènement. Il informe sur la précision de la localisation d'un événement sismique.
Effet de site	Modification du mouvement du sol liée à la nature et/ou la géométrie particulière des couches géologiques superficielles en un site géographique donné. Il en résulte une amplification ou une atténuation de l'intensité du séisme au niveau du site en fonction de la focalisation ou dispersion des ondes.
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 des processus physiques associés.
Garniture tubulaire	Eléments 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.
Hydrocyclone	Equipement permettant par centrifugation en phase liquide de séparer les éléments selon leur poids.
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 le pompage. Elle est exprimée en L/s/bar

Intensité épiscoptrale		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.
Levé géophysique		Evaluation des propriétés physiques du sous-sol à travers diverses méthodes indirectes géophysiques (sismique, électromagnétique, gravimétrique, ...).
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.
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.
Pétrophysique		Relatif aux propriétés physiques des roches, telles que la lithologie, la porosité, la perméabilité, les module élastiques, ou encore les propriétés acoustiques.
Régime tectonique		Système de contraintes responsables du mouvement des failles.
Seuil d'instabilité géomécanique		Limite entre le comportement élastique (sans déformation irréversible) et le comportement plastique (avec déformation irréversible) de la roche. Les événements sismiques ne peuvent avoir lieu qu'après atteinte de ce seuil géomécanique.
Simulation dynamique		Représentation numérique de l'évolution spatiotemporelle des propriétés d'un objet physique dans un but de prédiction et/ou de comparaison avec des données existantes.
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.
Stimulation hydraulique		Injection d'une grande quantité d'eau dans le réservoir afin de la pousser dans des fractures existantes. Cette opération peut également être chimique (injection de produits dissolvant les remplissages de fractures) ou thermique (injection d'eau froide après fermeture du puits afin de micro-fissurer les matrices silicatées et les remplissages silicatés des fractures).
Système convectif		Circulations à grande échelle de fluides géothermaux au sein du réseau de failles et fractures à la base de la couverture sédimentaire et dans le socle granitique.
Test hydraulique		Test du puits visant à caractériser l'état hydraulique du réservoir. Il est réalisé par l'action simultanée d'une mise en production ou dégorge­ment du puits de production (en régime naturel ou avec une méthode de pompage approprié) et une réinjection du fluide géothermal dans le puits d'injection.
Valeur efficace		Moyenne quadratique d'un signal sur une période donnée, mettant en évidence la présence de valeurs anormales du signal sur la période.
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.
Zone de faille		Zone déformée et altérée, pouvant aller jusqu' à plusieurs centaines de mètres d'épaisseur, à proximité d'une discontinuité majeure séparant deux compartiments rocheux.

1 INTRODUCTION GENERALE

1.1 Lithium de France

Créée en octobre 2020, Lithium de France SAS a pour vocation la valorisation du fluide géothermal selon deux formes: les calories, via le développement de projets de géothermie locaux pour le territoire, dans une démarche de circuits courts ; et le lithium, produit à partir des eaux géothermales selon des procédés respectueux de l'environnement.



Lithium de France souhaite ainsi lier ces deux ressources présentes naturellement dans le sous-sol alsacien pour développer son activité. Les bénéfices d'un tel projet sont nombreux, dont notamment :

- **La production de chaleur renouvelable** au bénéfice du développement industriel territorial. Lithium de France vise ainsi à ancrer son projet dans le territoire, en favorisant l'ancrage ou l'essor d'acteurs industriels locaux ;
- 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.

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 en 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 30 emplois directs entre octobre 2020 et décembre 2023, afin de monter son équipe dans le nord de l'Alsace à Bischwiller. 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, LiA ...) permettront de mener à bien ce premier projet « Les Sources 1 ».

1.2 L'ambition du Projet de Lithium de France

Le projet « Les Sources 1 » de Lithium de France détaillé dans la suite de ce dossier vise à explorer et exploiter les ressources en chaleur et en lithium contenues dans les saumures géothermales circulant en profondeur en Alsace du Nord.

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 réduction de 40 000 tonnes par an d'émission de CO₂ peut être évitée par la production de chaleur correspondant à chaque doublet de puits, soit environ 20 MW_{th}. La géothermie profonde est par ailleurs une énergie renouvelable non intermittente, silencieuse 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 dizaines de MW_{th} 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 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 contiennent des teneurs en lithium 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 de chaque doublet, nous espérons pouvoir produire, à terme, des sels de lithium pour la fabrication de batteries, avec pour objectif d'équiper environ 35 000 véhicules électriques par an. En comparaison avec les méthodes actuelles d'extraction, cette production responsable de lithium permettra d'économiser près de 6 tonnes de CO₂ par tonne de lithium. De plus, en phase d'exploitation, les fluides traités circuleront en boucles fermées et les eaux industrielles nécessaires au traitement du lithium seront recyclées.

Tel que nous envisageons ce projet, la centrale géothermique ainsi que les installations d'extraction et de concentration du lithium accolées à celle-ci seront totalement intégrées dans le paysage

Ce projet industriel, dont le schéma de principe est donné 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.

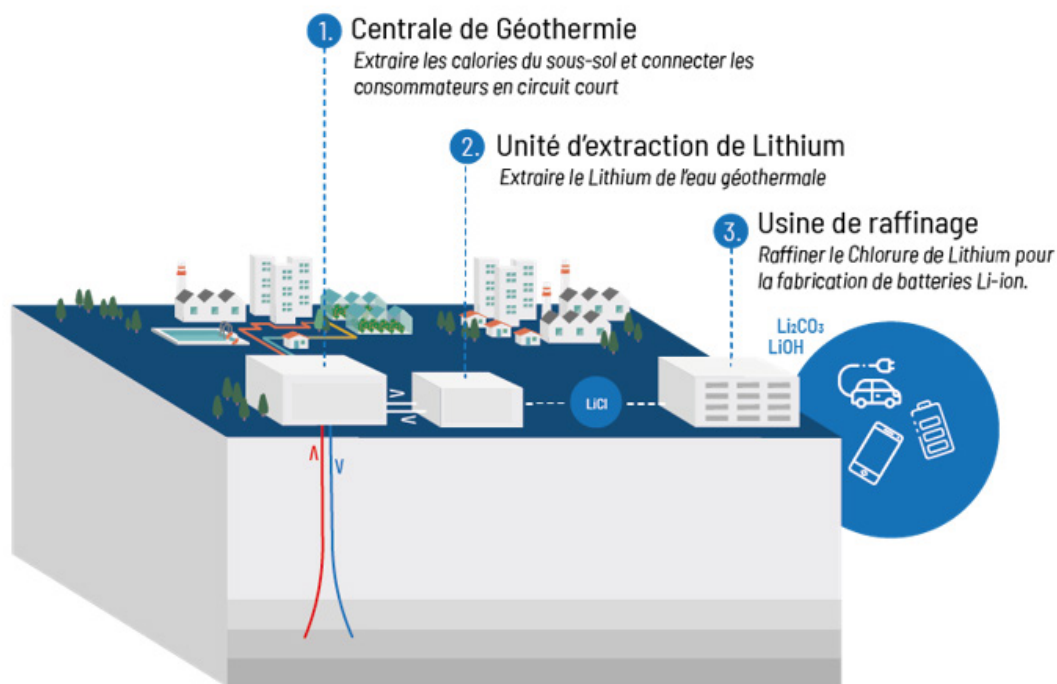


Figure 1.1 : Schéma de concept d'un projet de co-valorisation de la chaleur et du lithium géothermal

1.3 Un projet de territoire

Lithium de France est engagé sur le territoire du Nord Alsace à travers quatre *Permis Exclusifs de Recherches (PER)* (Figure 1.2), dont deux PER de gîtes géothermiques :

- « **Les Sources** », dont l'arrêté ministériel a été signé le 22 juin 2022 (JO n°0149, 29 juin 2022, texte n°48, p. 88 à 90) ;
- « **Les Poteries** », dont l'arrêté ministériel a été signé le 10 août 2023 (JO n°0195, 24 août 2023, texte n°42, p. 202 à 203).

Et de deux PER de mines de « lithium » et toutes autres substances connexes :

- « **Les sources alcalines** », a été signé le 24 juillet 2023 (JO n°0176, 1er août 2023, texte n°5, p. 12 à 13) déposé en mai 2021 et à ce jour (mars 2023), en cours d'instruction ;
- « **Les Poteries Minérales** », déposé en août 2022 et à ce jour (mars 2023), en cours d'instruction.

Ceux-ci représentent un total d'environ 329 km² et pourront accueillir plusieurs projets qui seront définis au fur et à mesure de l'identification des cibles grâce aux campagnes exploratoires sur le terrain. Le territoire concerné comprend 43 communes, 5 communautés de communes ainsi que la communauté d'agglomération d'Haguenau. In fine, 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 indirectes sur le territoire mais également à l'échelle nationale pour assurer la souveraineté de ce métal critique.

2. NOTE DE PRESENTATION NON TECHNIQUE

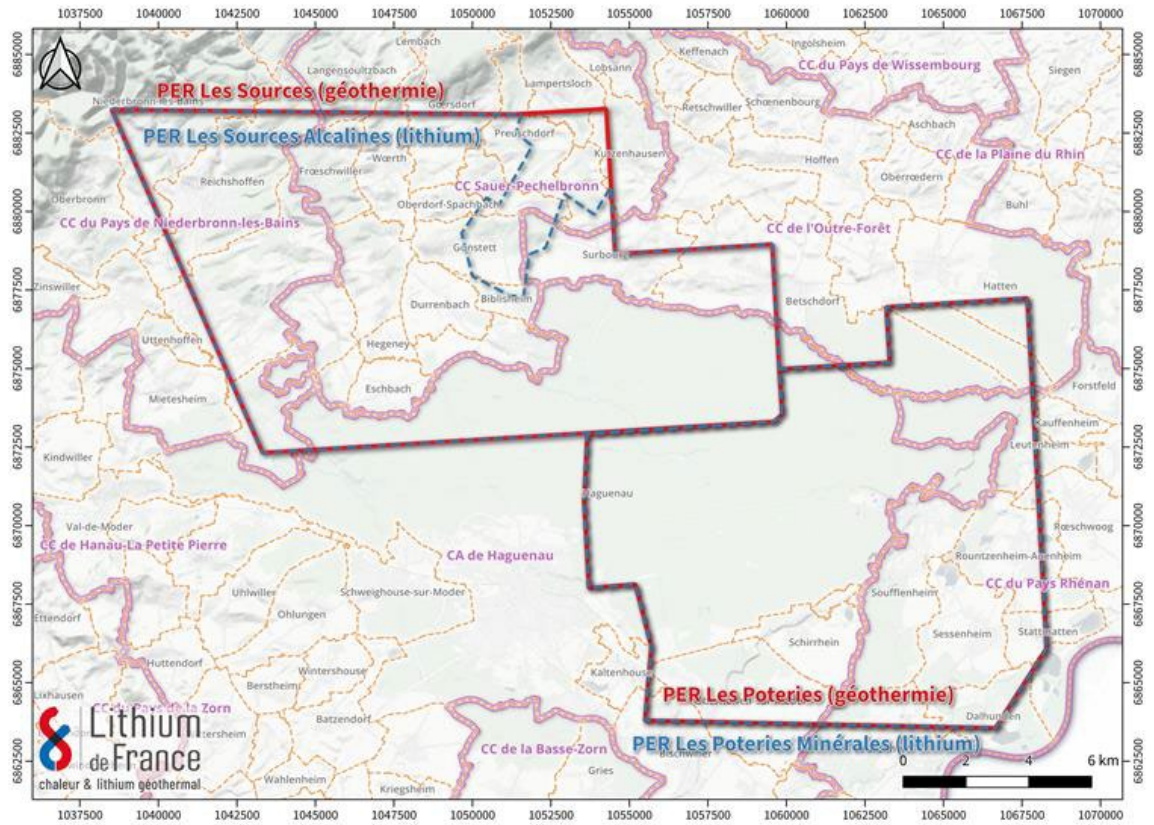


Figure 1.2 : localisation géographique des quatre PER de Lithium de France

2 CONTEXTE REGLEMENTAIRE

2.1 Contexte réglementaire général

La réalisation d'un co-projet de chaleur et de valorisation de lithium géothermal en France comporte plusieurs étapes, à la fois techniques et administratives, permettant d'aboutir à une exploitation opérationnelle (Figure 2.1).

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'exploitation conjointe du lithium et des calories véhiculées par les fluides géothermaux, deux permis distincts doivent être instruits par deux autorités différentes. La *DGEC (Direction générale du climat et de l'énergie)* est responsable des démarches pour les PER de gîtes géothermiques, alors que les PER de « mines » de lithium sont instruits par la *DGALN (Direction générale de l'aménagement, du logement et de la nature)*. 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 (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 faut réaliser une ou 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, afin de définir les cibles des forages.

Le développement d'une centrale d'extraction de lithium (*a minima* un doublet de puits) doit prendre en compte de nombreux paramètres, notamment environnementaux mais aussi sociétaux, économiques et structuraux. 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 forages 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 premiers 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 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, techniques et procédurières, 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.

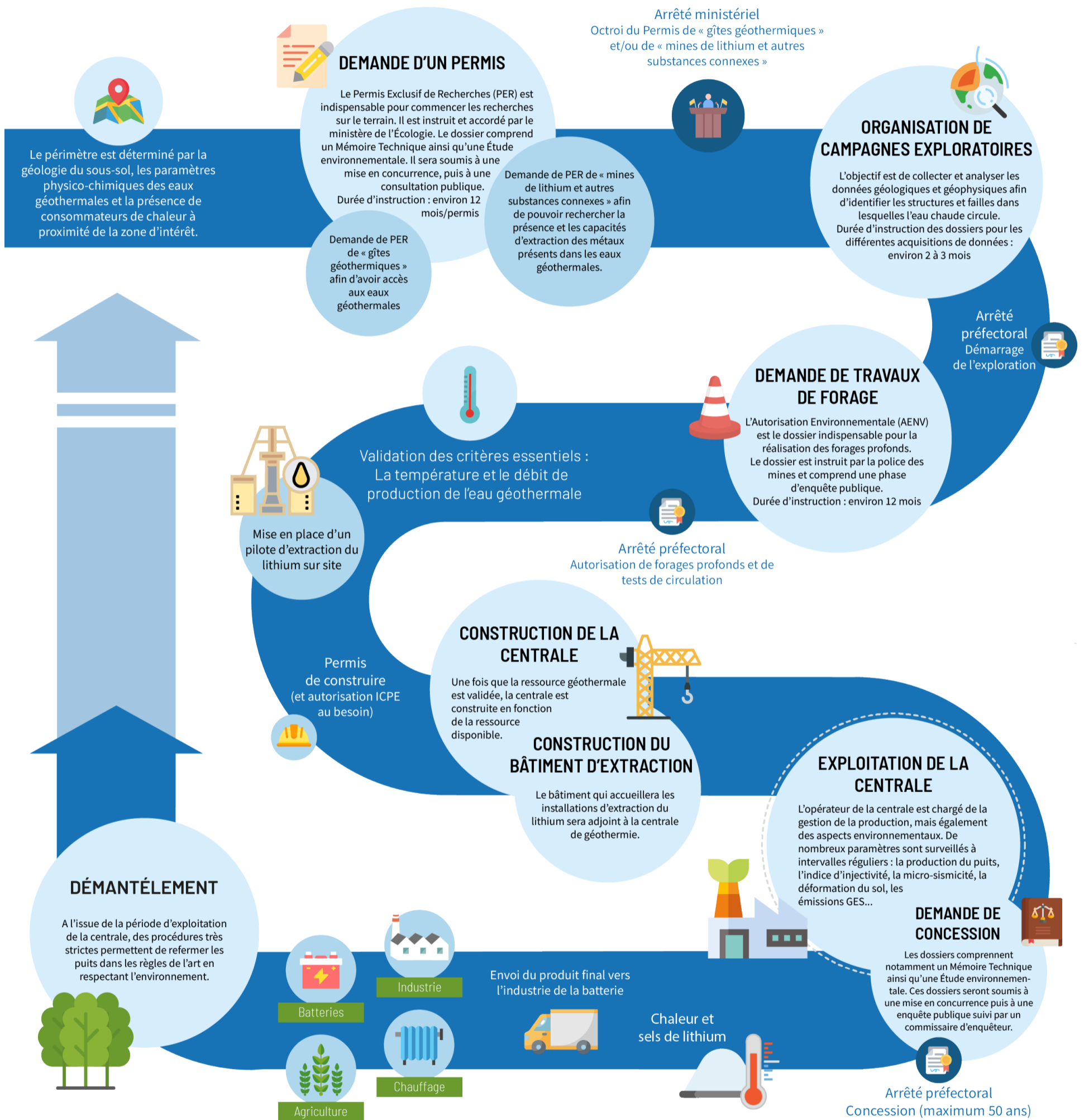


Figure 2.1 Les étapes clés d'un projet de lithium géothermal en France

2.2 L'Autorisation Environnementale

Une demande d'autorisation environnementale d'ouverture de travaux miniers est strictement cadrée par le code de l'environnement et comprend trois étapes d'instruction distinctes obligatoires qui sont : une phase d'examen, une phase d'enquête publique et une phase de décision. Le schéma en figure 202 ci-dessous détaille ces 3 étapes.

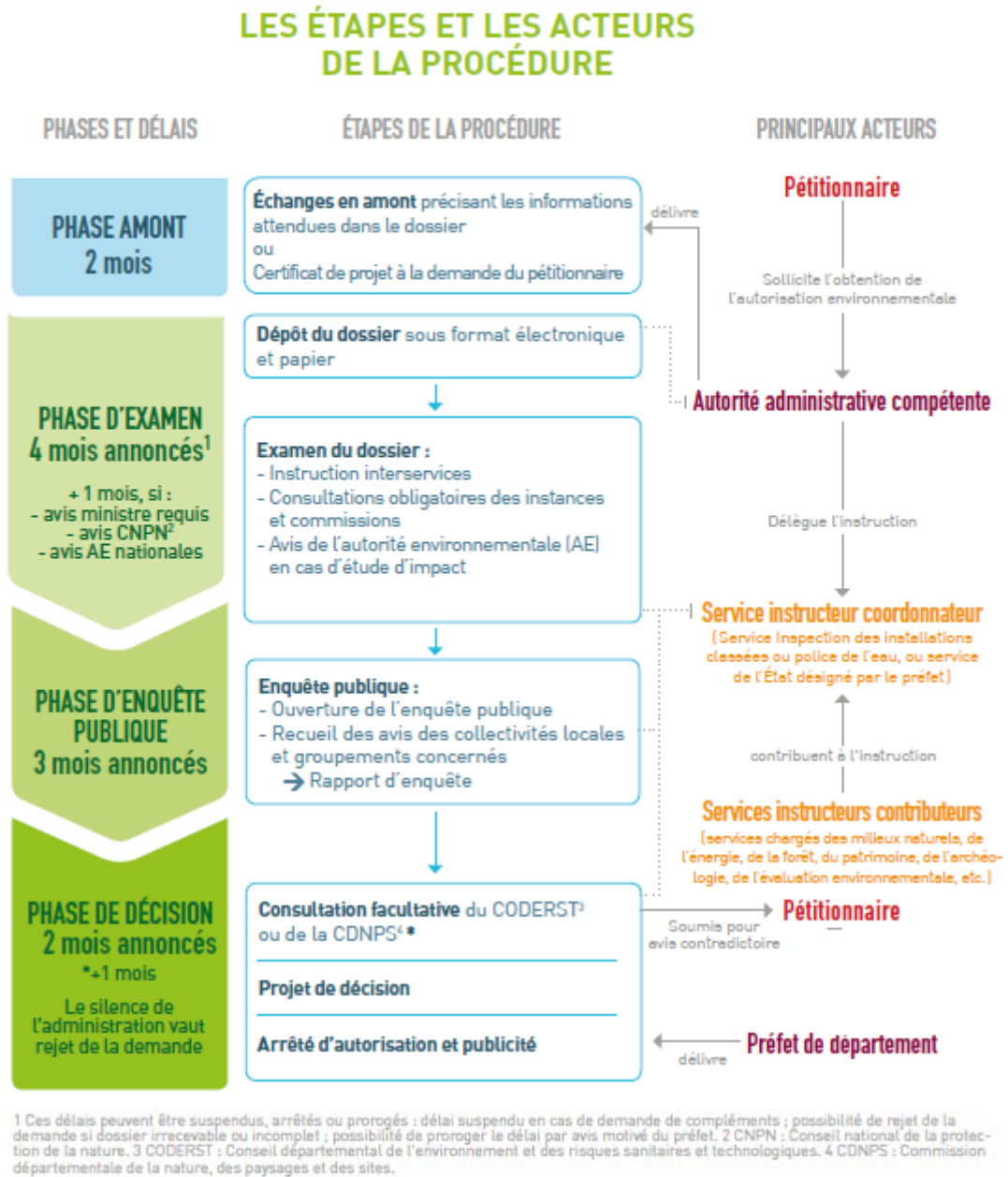


Figure 2.2: Etapes d'une procédure d'autorisation environnementale (source : Schéma simplifié du ministère de l'Environnement)

Zoom sur le déroulement de la phase d'enquête publique :

Pendant la durée de l'enquête publique, 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 internet indépendant. L'enquête publique vise à :

- Informer le public ;

2. NOTE DE PRESENTATION NON TECHNIQUE

- 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.

Après la clôture de l'enquête, au minimum 30 jours plus tard, le commissaire enquêteur convoque le pétitionnaire et lui communique sur place les observations écrites et orales, celles-ci étant consignées dans un procès-verbal, en l'invitant à produire, dans un délai imparti, un mémoire en réponse. Le résultat de l'enquête est publié sur le site de la préfecture.

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.

3 IDENTIFICATION DE LA RESSOURCE GEOTHERMALE

3.1 Suivi des recommandations

La campagne d'exploration pour le projet «Les Sources 1» 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., 2023¹). Publié en 2023, cet ouvrage a été scrupuleusement suivi dans l'élaboration et la réalisation de la campagne exploratoire, les études de caractérisation de réservoir et le choix des cibles du projet.

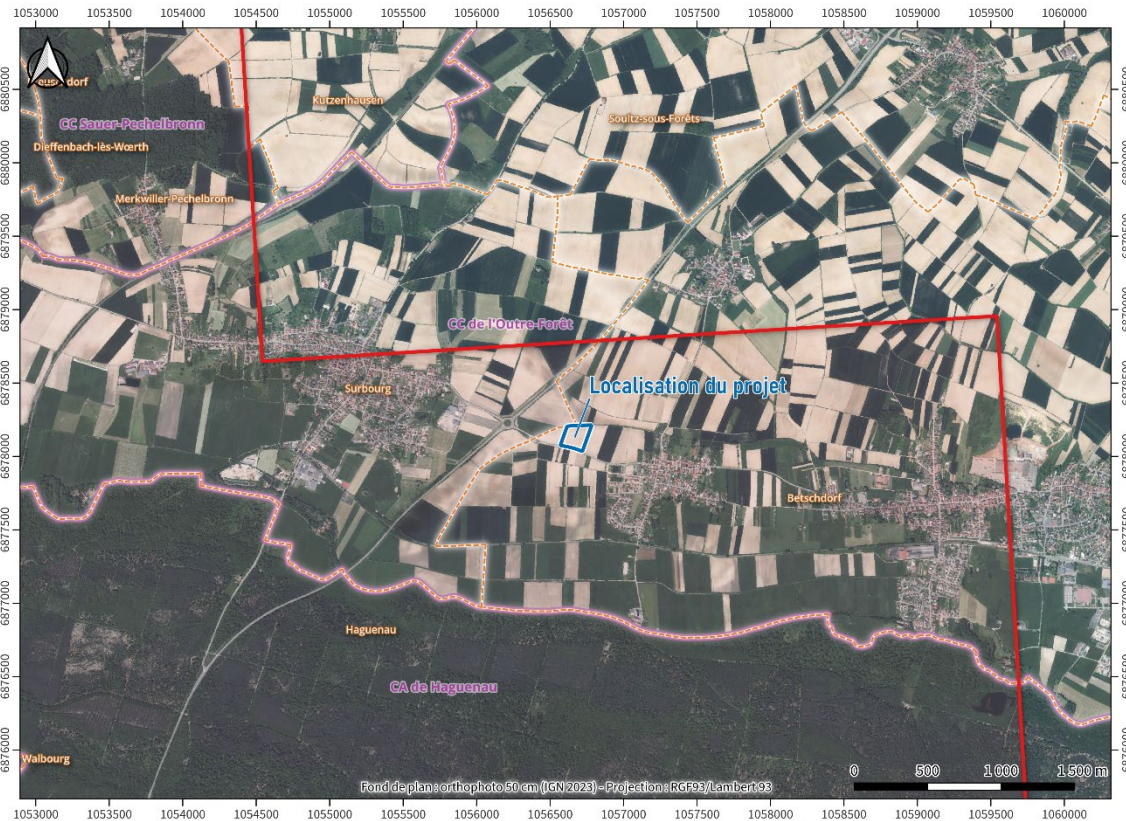
Le modèle préliminaire du réservoir ciblé s'appuie sur les données et expériences des ouvrages du Fossé rhénan ainsi que sur une campagne d'exploration menée en 2022 sur le PER dit « Les Sources » (Figure 3.1) Plusieurs études ont été réalisées sur ces données pendant de nombreux mois afin de confronter les modèles et définir la cible la plus adaptée au projet « Les Sources 1 ».

L'objectif de ces travaux est de :

- Caractériser les *zones de failles* (orientation, pendage, épaisseur, perméabilité naturelle...);
- Estimer le champ de contrainte et le *régime tectonique* du réservoir ciblé ;
- Anticiper le comportement Thermo-Hydro-Mécanique (THM) à partir des circulations dans le réservoir ;
- Identifier l'aléa sismique de la zone du futur projet.

Ces études sont présentées dans le mémoire relatif aux méthodes de recherches tel que prévu à l'article L. 164-1-2 du Code minier précisant notamment « 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 » (15° de l'article D. 181-15-3 du Code de l'environnement).

¹ 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.



Carte de localisation du projet au 1/25 000

Carte mise à jour le 08/08/2023

Légende :

- localisation du projet
- PER Les Sources
- communes
- communautés de communes

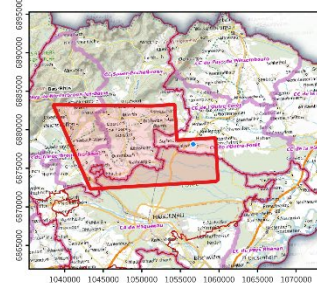


Figure 3.1 : Carte de localisation du projet « Les Sources 1 » déposé par Lithium de France dans le cadre de l’Autorisation environnementale d’ouverture de travaux miniers. Stratégie exploratoire du premier doublet

3.2 Stratégie exploratoire du premier doublet

Lithium de France, premier opérateur français indépendant de chaleur et de lithium géothermal, vise à développer son premier projet d’exploitation de fluide géothermal sur son PER « Les Sources » dans le nord de l’Alsace. Le présent document expose la réflexion menée par l’entreprise pour le projet « Les Sources 1 » dans le cadre de l’Autorisation environnementale d’ouverture de travaux miniers.

Dès l’octroi de son PER, Lithium de France a cherché à acquérir suffisamment de connaissances et de données décrivant au mieux le réservoir visé et validant ou invalidant les hypothèses de base (Figure 3.2). Une campagne d’exploration a été menée par Lithium de France afin d’acquérir des données et connaissances complémentaires à celles déjà existantes. En effet, le réservoir géothermique du Fossé rhénan, et plus particulièrement dans la région de l’Alsace du Nord, a été historiquement étudié depuis la fin des années 80 avec le projet pilote de Sultz-sous-Forêts mais également à travers des nombreux

projets industriels français et allemands développés à partir de 2005 (Frey et al., 2022²; Vidal and Genter, 2018³). Le projet de Soultz-sous-Forêts a fourni notamment une large base de données accessibles au BRGM et fait l'objet de nombreuses publications. Le projet industriel ECOGI à Rittershoffen présente également des études du réservoir publiées. Plus récemment, la société 2gré (ex-Géorhin) a intégré le groupe Arverne, et l'accès aux données de forage du projet GeoVen à Vendenheim a été mis à profit pour le développement du projet « Les Sources 1 ». Les connaissances géologiques, hydrogéologiques, *géomécaniques* et thermiques acquises ont été intégrées dans la création d'un modèle géologique 3D et d'un modèle conceptuel. Ceux-ci ont servi de base à la simulation numérique du réservoir permettant de prédire son comportement THM lors de sa future exploitation. Au cours des forages et de leur développement, de nouvelles données seront acquises et permettront de faire évoluer ce modèle, réduisant ainsi les incertitudes. Les modèles sont donc voués à évoluer au cours de la vie du projet et seront mis à jour au fur et à mesure par les équipes de Lithium de France afin de garder une cohérence avec la réalité.

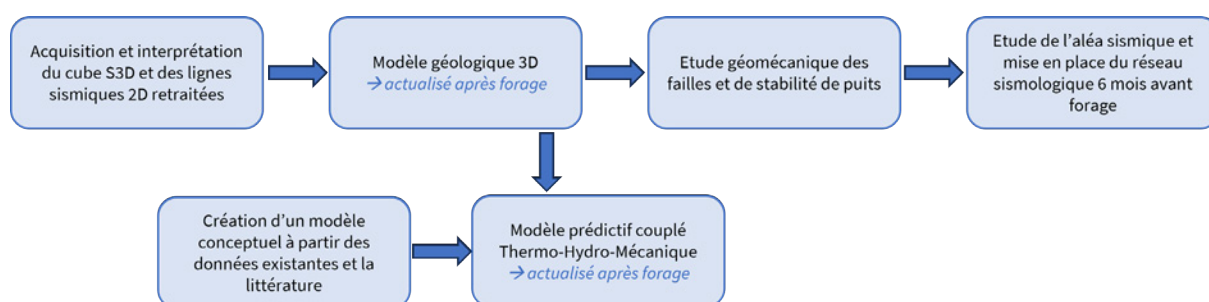


Figure 3.2 : Etudes et opérations menées par Lithium de France dans le cadre du projet « Les Sources 1 » selon les recommandations du Guide de bonnes pratiques pour la maîtrise de la sismicité induite par les opérations de géothermie profonde (Maury et al., 2023¹)

3.3 Présentation du champ géothermal du Fossé rhénan

A l'échelle régionale, on constate une série d'anomalies thermiques, comme dans les régions de Soultz-sous-Forêts et Rittershoffen en Alsace ou Landau et Insheim dans le Palatinat et Bruchsal dans le Baden-Württemberg, avec des températures supérieures à 150°C à 2000 m de profondeur (Baillieux et al., 2013⁴; Schellschmidt and Clauser, 1996⁵). 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., 2015⁶). Les remontées de fluides dans le réseau de fractures naturelles associées aux grandes failles locales sont principalement observées dans le premier kilomètre du socle granitique, dans les sédiments gréseux du Buntsandstein et dans les sédiments calcaires du Muschelkalk. La formation du

² 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>

³ 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>

⁴ 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>

⁵ 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.

⁶ 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.*

Keuper pourrait jouer un rôle de couverture isolant le *système convectif* profond (Vidal et al., 2015⁷). 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, 2010⁸; Sanjuan et al., 2016⁹; Stober and Bucher, 2015¹⁰).

Depuis les années 80, plusieurs projets pilotes mais également industriels en France, en Allemagne et en Suisse ont cherché à exploiter ces circulations hydrothermales. Le succès de ces projets basés sur le concept hydrothermal s'appuie sur le développement et l'exploitation du réservoir à l'interface sédiments-socle en optimisant leurs forages selon le réseau de fractures et failles naturellement perméables (Frey et al., 2022²; Vidal and Genter, 2018³).

Le projet « Les Sources 1 » de Lithium de France s'appuie sur les connaissances issues de ces expériences. Le doublet prévu dans le cadre du projet est composé d'un puits producteur et d'un puits injecteur qui recouperont le réservoir naturellement faillé et fracturé au toit du socle granitique. Composés d'une section en trou ouvert mixte grès-granite, les deux puits seront espacés d'environ 1 km à 2,5 km de profondeur (Figure 3.3).

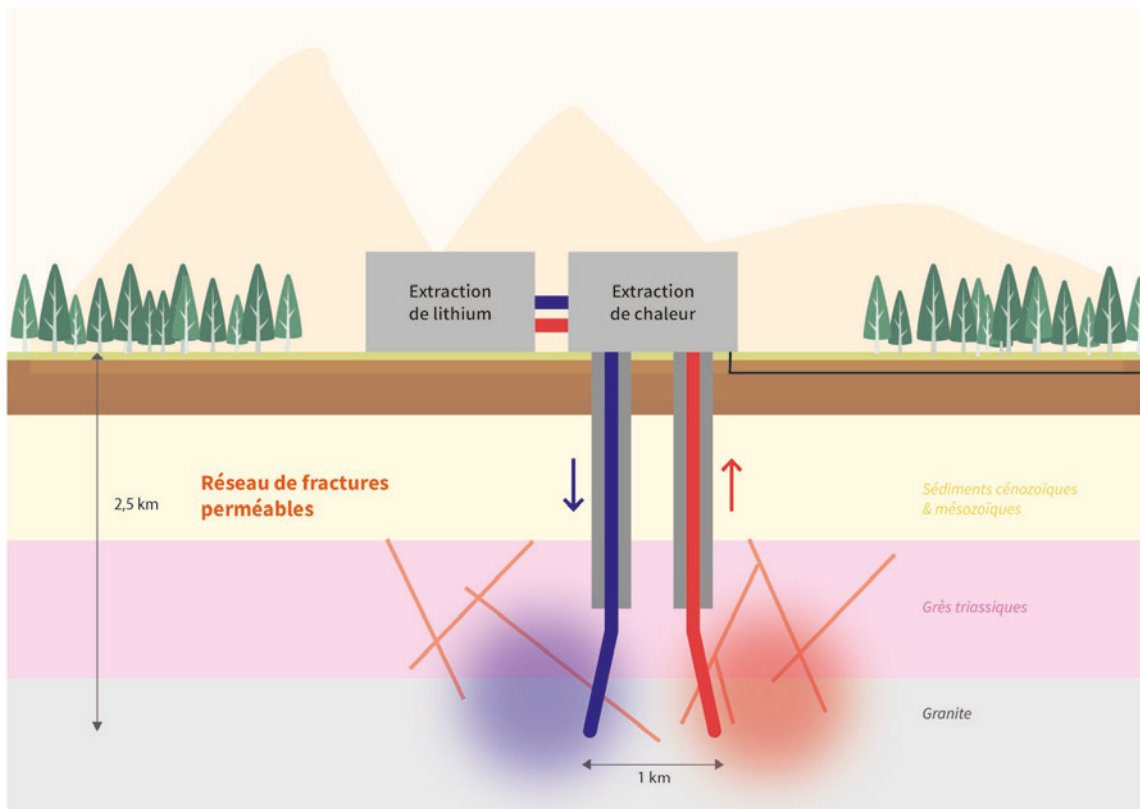


Figure 3.3 : Schéma conceptuel du doublet forés pour le projet « Les Sources 1 »

⁷ 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>

⁸ 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>

⁹ 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>

¹⁰ Stober, I., Bucher, K., 2015. Hydraulic and hydrochemical properties of deep sedimentary reservoirs of the Upper Rhine Graben, Europe. *Geofluids* 15, 464–482.

3.4 Etudes d'exploration réalisées depuis l'octroi du PER « Les Sources »

Depuis l'octroi de son PER « Les Sources » le 22 juin 2022, Lithium de France a mené une campagne d'exploration de plusieurs mois avec des *levés géophysiques* sur la zone Est du permis (Vidal et al., 2023¹¹) et l'achat de données de puits et de plusieurs lignes sismiques 2D historiques qui ont fait l'objet d'un nouveau traitement du signal en 2023 (Vidal et al., 2023¹¹). Cette campagne a permis de mettre en œuvre des études de caractérisation du réservoir et de minimisation du risque sismique. Ces dernières s'appuient sur :

- Une campagne d'imagerie par sismique 3D (S3D) ;
- L'acquisition et le retraitement des lignes sismiques 2D historiques ;
- L'acquisition de données de puits existants ;
- Une campagne électromagnétique à source contrôlée (CSEM) ;
- Une campagne de mesure du bruit ambiant, étape préliminaire à l'installation du réseau de suivi sismologique.

Sur une emprise de 60 km², la campagne S3D s'est déroulée à l'automne 2022 avec 8670 *géophones* environ et 8553 points vibrés selon la technologie SRS (Simultaneous Random Sweep). Lithium de France a également fait l'acquisition auprès du BRGM de 11 lignes sismiques 2D historiques ainsi que de données de 12 puits voisins dont 3 avec des données de vitesse. Ces lignes sismiques 2D ont permis d'une part de relier le *cube S3D* à des puits possédant des données de vitesse afin d'effectuer avec confiance un calage des *horizons sismiques* mais aussi d'effectuer la conversion temps-profondeur. Elles ont permis aussi de palier la dégradation des données à l'est du cube S3D nécessaire à la suite du refus de passage d'ECOGI sur la zone de montée en couverture se trouvant sur leur concession. Lithium de France regrette également que les données de vitesse du puits GRT-1 déclaré en janvier 2013 à la DREAL Grand Est n'aient pas été transmises à la base de données du BRGM regroupant les données minières de plus de 10 ans et accessibles au public selon l'article L413-1 du Code minier. Toutefois, ces données publiques manquantes ne seront pas préjudiciables au projet, ils auraient permis d'affiner certains paramètres avant de réaliser le premier forage.

Cette nouvelle acquisition S3D interprétée conjointement aux lignes retraitées a permis de considérablement améliorer la localisation et la géométrie des structures faillées connues dans le modèle GeORG. A partir de l'interprétation sismique, un modèle géologique 3D a été construit avec le logiciel Leapfrog (Seequent). Cette représentation 3D a servi de base pour l'étude de la tendance au glissement des failles avec le logiciel 3DStress (Southwest Research Institute) et la modélisation 2D couplé Thermo-Hydro-Mécanique réalisée avec le logiciel Disroc (Fracsima). Ces deux études et leur impact sur la prédiction de la sismicité induite sont décrits dans la section 6.3. Les résultats de la campagne CSEM montrent des anomalies conductives suggérant des circulations naturelles de fluide géothermal préférentiellement localisées dans les structures faillées associées à des anomalies de température (Darnet et al., 2023¹²).

Enfin, la conception du réseau sismologique est un point clé dans le développement du projet « Les Sources 1 ». Afin qu'il réponde au mieux aux exigences de surveillance *microsismique* évoquées dans le « Guide de Bonnes Pratiques 2023 » (Maury et al., 2023¹), 100 géophones de type WiNG ont été déployés à l'est du PER du 20 juin au 13 juillet 2023. Des cartes de bruit ont été générées à différentes fréquences et différentes périodes. Les résultats de cette étude sont des données indispensables afin

¹¹ 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.

¹² Darnet, M., Soubeyrand, D., Roche, P., Vidal, J., Bretaudeau, F., Beauois, F., François, B., 2023. Characterizing Geothermal and Lithium Resources in the Upper Rhine Graben (France) with Active Electromagnetic Methods. Presented at the The Fourth EAGE Global Energy Transition Conference and Exhibition, European Association of Geoscientists & Engineers, Issy-les-Moulineaux, France, pp. 1–4. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202321019>

de correctement appréhender la variabilité spatiale et temporelle du *bruit ambiant* sur la zone du projet « Les Sources 1 ». Cette étude sera un paramètre d'entrée pour concevoir le futur réseau sismologique et évaluer sa sensibilité pour la détection d'évènements microsismiques.

4 CONFIGURATION DES TRAVAUX MINIERS

4.1 Travaux préliminaires de préparation du site

La plateforme de chantier réceptionne l'ensemble du chantier, le forage dans un premier temps, puis exploitation du doublet dans un second temps.

Il s'agit d'une aire préparée par les moyens de génie civil comprenant décapage, nivelage, compactage, et couche de finition en revêtement "voirie lourde". Elle accueillera :

- La plateforme de forage intégrant la zone des têtes de puits au-dessus de laquelle seront installés l'appareil de forage et l'ensemble de ses organes et équipements ;
- Les zones de circulation ;
- Les aires de livraisons et de stockage des matériaux et équipements ;
- Les bassins de réserve d'eau pour une utilisation technique ou comme équipement de sécurité ;
- Les zones d'arrivées d'électricité et d'eau ;
- Les bureaux et base vie ;
- Les zones de stockage des eaux usées.

L'ensemble de la plateforme de chantier sera clôturé et sous surveillance permanente.

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.

La conception de la plateforme inclut les études réglementaires géotechniques, les dispositifs pour drainage et récupération des eaux pluviales et des eaux usées, les dispositifs réglementaires de traitements des eaux usées, les dispositifs de stockage, le traitement et les collectes des déchets de toutes natures, les moyens de sécurité pour la prévention et le traitement des nuisances, incidents, incendie, la protection de l'environnement et protection des personnels.

Le plan de masse en mode chantier forage est illustré par la Figure 4.1 ci-dessous et résumé ci-après.

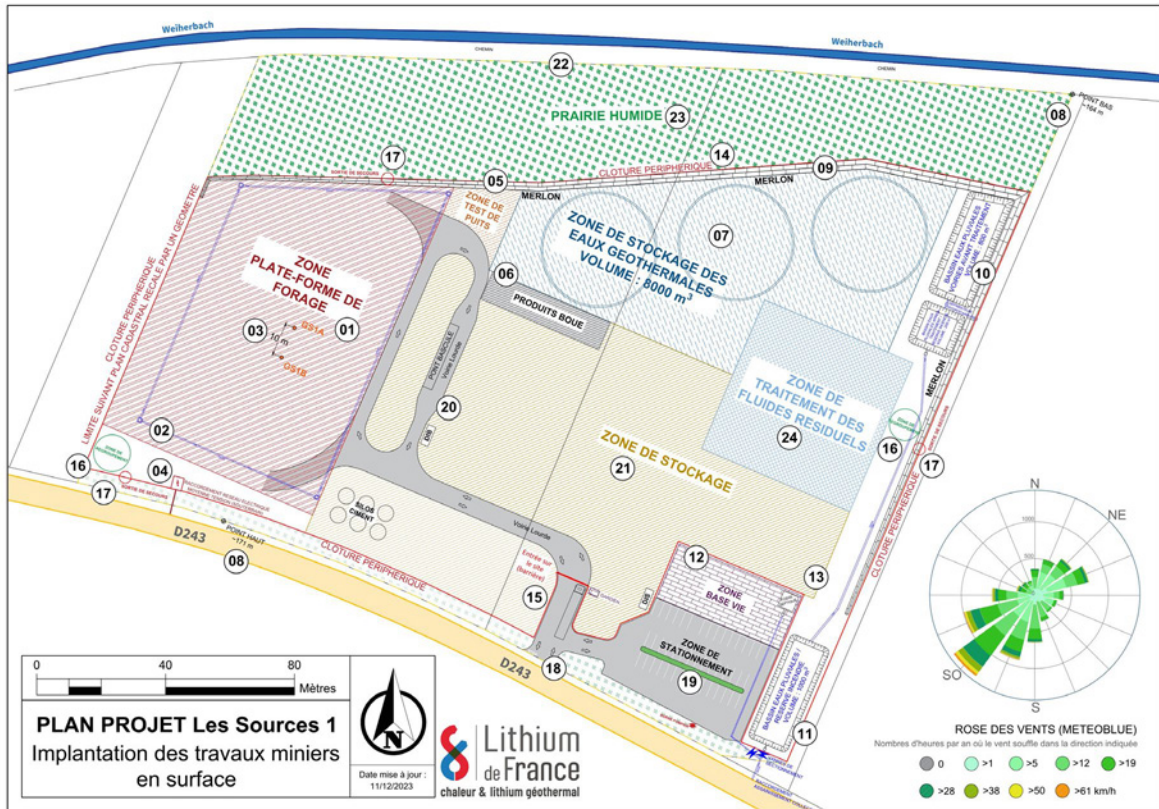


Figure 4.1: Implantation des travaux en surface

- 01 – 02 – 03 – 05 – 06** Plateforme de forage pour accueil de l'appareil de forage et des services d'assistance au forage, globalement centrée sur les emplacements des deux puits du doublet, zone d'équipements pour tests de puits, zone de stockage de produits
- 07** *Bassins géothermaux*, stockage d'eau pour les opérations de forage, capacité de stocker les fluides issus des tests de puits (*merlon* de rétention 09)
- 10 – 11** Bassins de recueillement des eaux pluviales et de ruissellement, déshuileur, bassins incendie
- 18 – 15** Zone d'accès au site
- 20 – 21** Aires de circulation, retournements, livraisons
- 19 – 12 – 13** Aire de stationnement, bureaux et base de vie avec fosse septique
- 08** Représente les points hauts et bas topographiquement
- 14 – 17 – 16** Clôture, sortie de secours, aire de rassemblement
- 04** Alimentation en tension, en eau
- 22 – 23** Bande de dégagement par rapport à la rivière, zone humide confirmée par une étude pédologique et flore réalisée en août et octobre 2023 par un bureau d'expert en environnement. La réalisation de *sondages pédologiques* a permis de la localiser de façon précise sur site et ainsi le plan de masse et les projets de réaménagement futurs.
- 24** Zone de traitement des fluides résiduels

4.2 Appareil de forage et boues de forage

Les deux photos ci-dessous montrent les différents équipements existant sur un chantier de forage.

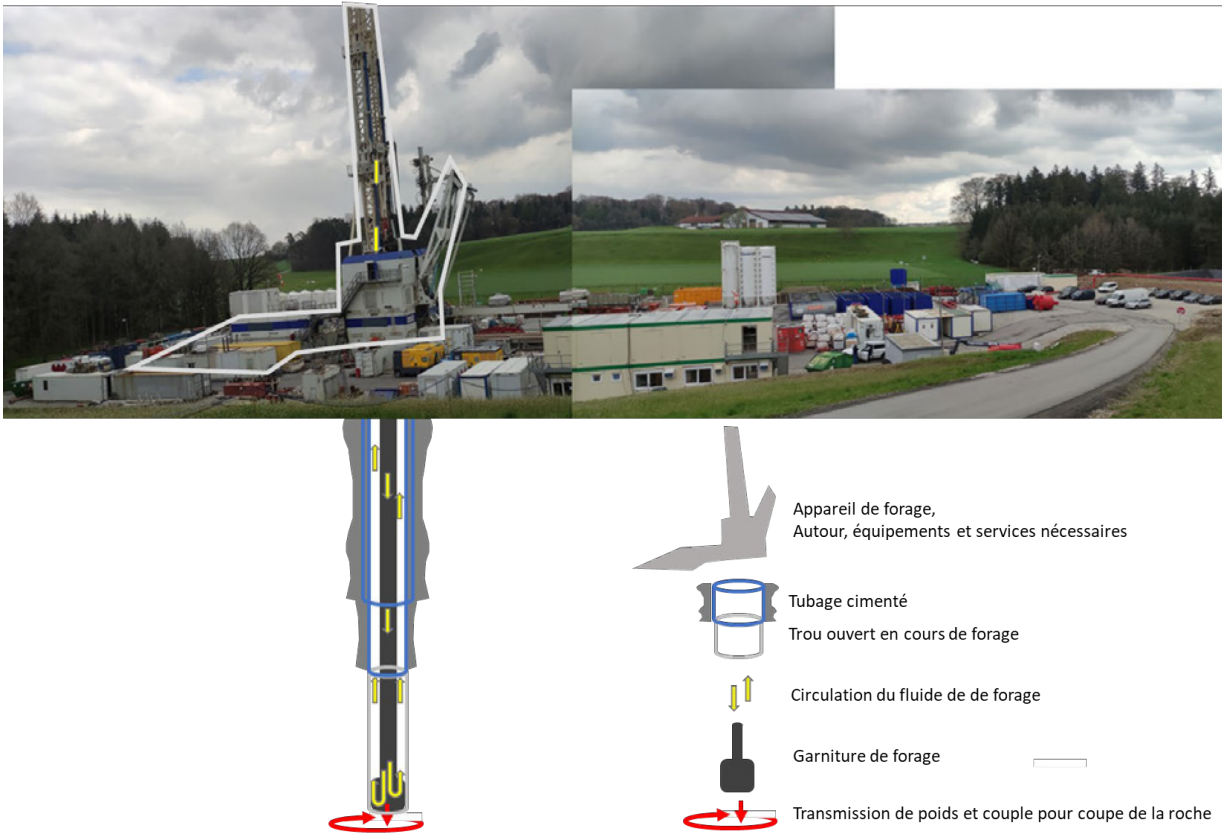


Figure 4.2: Appareil de forage de type géothermie sur chantier (Source : photo d'un chantier de DeutscheErdwärme prise par Lithium de France lors d'une visite de site en 2023)

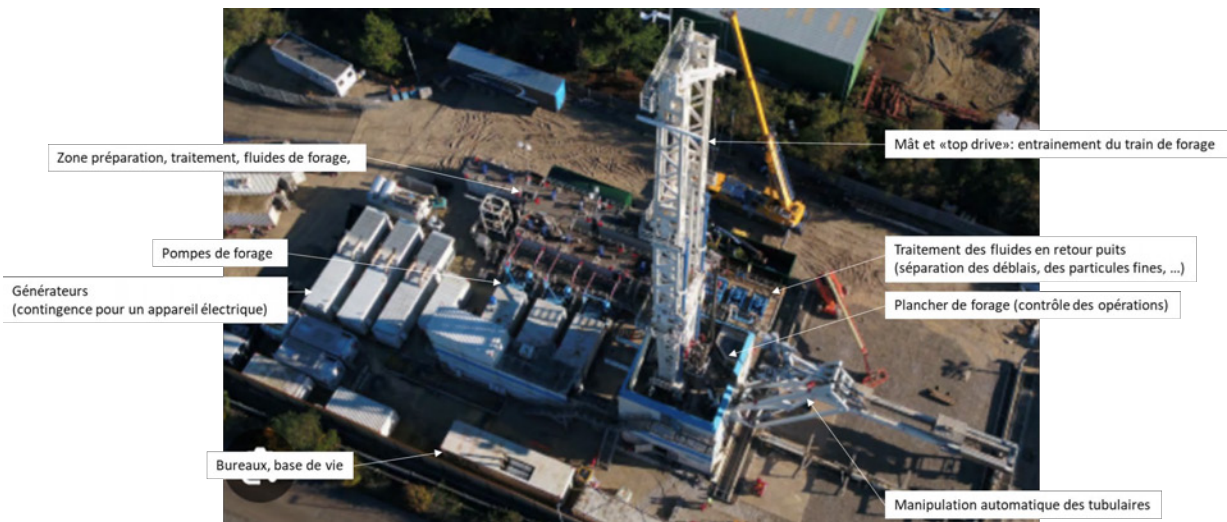


Figure 4.3: Image des éléments principaux d'un appareil de forage

Les éléments principaux d'un appareil de forage sont décrits ci-dessus :

- L'appareil est utilisé pour conduire en fond de trou des *garnitures tubulaires* constituées d'outil de forage, équipements divers de forage et tiges de forage pour transmettre couple et poids sur le *front de taille* et ainsi couper la roche ;
- Le fluide de forage (aux spécifications précises en fonction de la température, la nature des formations, la densité requise, les *propriétés rhéologiques* requises, ...) est injecté dans la garniture tubulaire depuis la surface (pompes de forage et *ligne de pompage*). Il refroidit le front de taille, lubrifie l'outil et maintient en place les formations géologiques. Il participe à l'évacuation vers la surface des déblais de forage pour nettoyage du puits. Il est le premier moyen de contrôle d'effluent sous pression (eau, gaz, huile) ;
- De retour en surface, le fluide est traité par des tamis vibrateurs, centrifuges, ... pour éliminer les particules solides puis traité pour maintenir des spécifications permettant d'être réutilisé lors des futurs cycles de circulation ;
- En tête de puits (non visible sur les figures 4.2 et 4.3, sous le plancher de forage), les puits sont connectés aux équipements de surface pour continuité mécanique et hydraulique. Des BOP (Bloc Obturateur des Puits) sont installés, permettant la fermeture systématique des puits en cas de venue d'effluent, de surpressions, ...

Les appareils spécialisés pour les utilisations en géothermie, tel l'appareil B04 de la Société Arverne Drilling Services, retenu par lithium de France pour ces opérations sont électriques et hydrauliques, donc silencieux et sans utilisation de moteurs atmosphériques pour la partie centrale des opérations.

Des boues de forage à base d'eau seront utilisées pour toutes la phase de forage afin de stabiliser les parois latérales du puits et de permettre une bonne évacuation des déblais en surface. Ces boues sont principalement composées d'eau et de bentonite (argile de type plastique et très molle).

Les phases proches de la surface seront forées avec des boues très chargées en bentonite, procurant typiquement un gel et une viscosité élevés pour une meilleure suspension des déblais et un meilleur nettoyage du puits.

Les phases plus profondes seront forées avec des boues à base d'eau et aux propriétés inhibantes par rapport à l'instabilité des couches argileuses traversées. Le volume total de boue nécessaire par puits est compris entre 4 500 et 5 000 m³ selon les pertes encourues dans les formations.

4.3 Gestion des déblais et des fluides

Dans le cadre des opérations de forage, des déblais solides et des déchets liquides seront produits.

Les déblais solides auront un volume total estimé à 460 m³, soit environ 1 130 tonnes dont la nature dépend de la profondeur, du diamètre et de la section de forage concernée.

Lors des opérations de forage, ces déblais seront évacués du puits par le fluide de forage sous la forme de particules en suspension. Le mélange composé du fluide de forage ainsi que de ces déblais est dénommé "retours de puits".

Le traitement de ces retours de puits est réalisé par l'appareil de forage au travers de l'enchaînement des phases suivantes :

- Filtration grossière par tamisage vibrant ;
- Dessablage ;
- Ségrégation des particules de la plus grossière à la plus fine par circulation au travers d'hydrocyclones.

Les résidus solides issus de ces opérations seront stockés en surface dans une zone dédiée. En fonction des analyses chimiques et minéralogiques, ces déchets seront par la suite qualifiés afin d'être collectés et traités dans les centres de traitements agréés, en filière adaptée à leur qualité minéralogique et physico-chimique.

Leur traitement sera réalisé en priorisant la revalorisation en matériaux de construction, sous réserve de conformité des analyses réglementaires aux critères d'acceptation. A défaut, ces résidus pourront être stabilisés par ajouts de cendres, de ciment, ou d'autres matériaux afin de faciliter leur manipulation et leur envoi en installation de stockage de déchets inertes (ISDI).

En ce qui concerne la partie liquide des fluides résiduels obtenue après élimination des phases solides telle que vu ci-dessus, elle sera recyclée et reconditionnée pour être réutilisée comme fluide de forage sur site.

Les fluides de forage résiduels, non directement recyclables, seront traités sur site par défloculation, ségrégation secondaire des fluides et solides résiduels, recyclages des fluides résiduels, séchage et enfin, mise à disposition des déblais pour même canal de traitement et valorisation que celui cité plus haut.

L'ensemble des installations de traitement des fluides de forage occuperont une surface au sol d'environ 2500 m².

4.4 Approvisionnement en eau et électricité

L'approvisionnement en eau pour les opérations forage sera assuré par le réseau communal, au travers d'une branche dédiée mise en place au droit du site, avec limiteur de débit à 25 m³/h.

Les bassins de stockage d'eau pour les opérations fournissent une capacité de stockage de 8 000 m³, de sorte que le remplissage des bassins préalables au démarrage des opérations de forage procure une capacité d'autonomie.

Le site sera raccordé au réseau électrique ESR 20 kV – 6.5 MW disponibles et passant en bordure de site le long de la D243. Un poste de raccordement HTA/BT sera posé à l'angle Sud-Ouest du site.

Les discussions ont été engagées en novembre 2023 avec les opérateurs afin d'obtenir ces ressources en temps voulu sur notre chantier.

5 CONFIGURATION A L'ISSUE DES TRAVAUX MINIERS

5.1 Exploitation de la boucle géothermale

La Figure 5.1 présente le schéma de principe de la boucle géothermale. Celle-ci se compose essentiellement des éléments suivants :

- Une pompe de production permettant d'augmenter la production de fluide géothermal du puits de production tout en maintenant une pression suffisante pour faciliter l'exploitation de la boucle géothermale ;
- Un ensemble d'échangeurs de chaleur permettant d'alimenter un réseau de chaleur industriel et rural ;
- Des pompes de réinjection pour renvoyer l'ensemble du fluide géothermal vers le réservoir d'où il a été prélevé ;
- Des unités de filtration ;
- Un séparateur utilisé lors des phases transitoires de démarrage et d'arrêt de la boucle géothermale et lors de certains arrêts intempestifs, avec son bassin de stockage associé.

Une unité d'extraction de lithium, décrite plus précisément au paragraphe 5.3 sera quant à elle insérée dans la boucle géothermale en aval des échangeurs de chaleur avant la réinjection du fluide géothermal. La boucle géothermale sera supervisée en permanence au travers d'une astreinte automatisée informatique, doublée d'une astreinte téléphonique, afin de garantir la mise en sécurité rapide des installations en cas de nécessité.

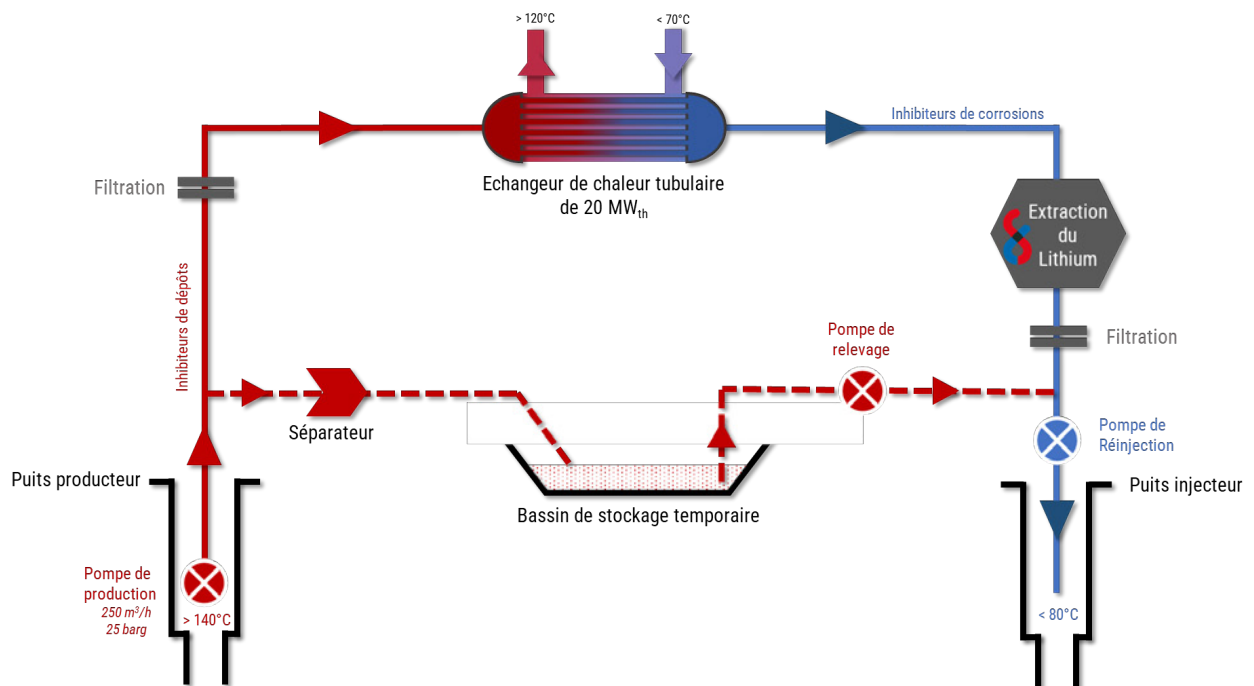


Figure 5.1 : Schéma de principe de la boucle géothermale

5.2 Le réseau de chaleur

Le réseau de chaleur sera réalisé de sorte à pouvoir transporter la chaleur depuis la zone de production d'énergie jusqu'à divers consommateurs de chaleur répartis dans le territoire. Ce réseau sera

destiné à un usage multi-consommateurs et sera enterré le long d'un tracé adapté aux conditions de surface afin de réduire au maximum les nuisances possibles pour les populations locales. Il sera formé d'une boucle composée de deux canalisations distinctes (Figure 5.2) :

- Une canalisation « aller », ou branche haute température, conçue pour permettre le transport de fluide sous pression dont la température nominale de service se situe entre 130°C et 150 °C voire au-delà en fonction de la température de production du fluide géothermal, ayant pour vocation de porter les calories aux consommateurs industriels de chaleur avec le moins de pertes de température possible ;
- Une canalisation « retour », ou branche basse température, permettant le retour du fluide caloporteur refroidi par les consommateurs primaires vers les échangeurs de chaleur. Cette conduite ne véhiculera qu'un fluide dont la température de service se situera entre 90°C et 50°C dépendant de la consommation réelle de chaleur. Des consommateurs de chaleur pourront être raccordés sur cette conduite selon les niveaux de température dont ils auraient besoin.

Le fluide caloporteur utilisé sera de l'eau déminéralisée traitée contre la corrosion, circulant dans ce circuit fermé, ayant pour avantage de ne présenter aucune propriété dangereuse pour l'environnement.

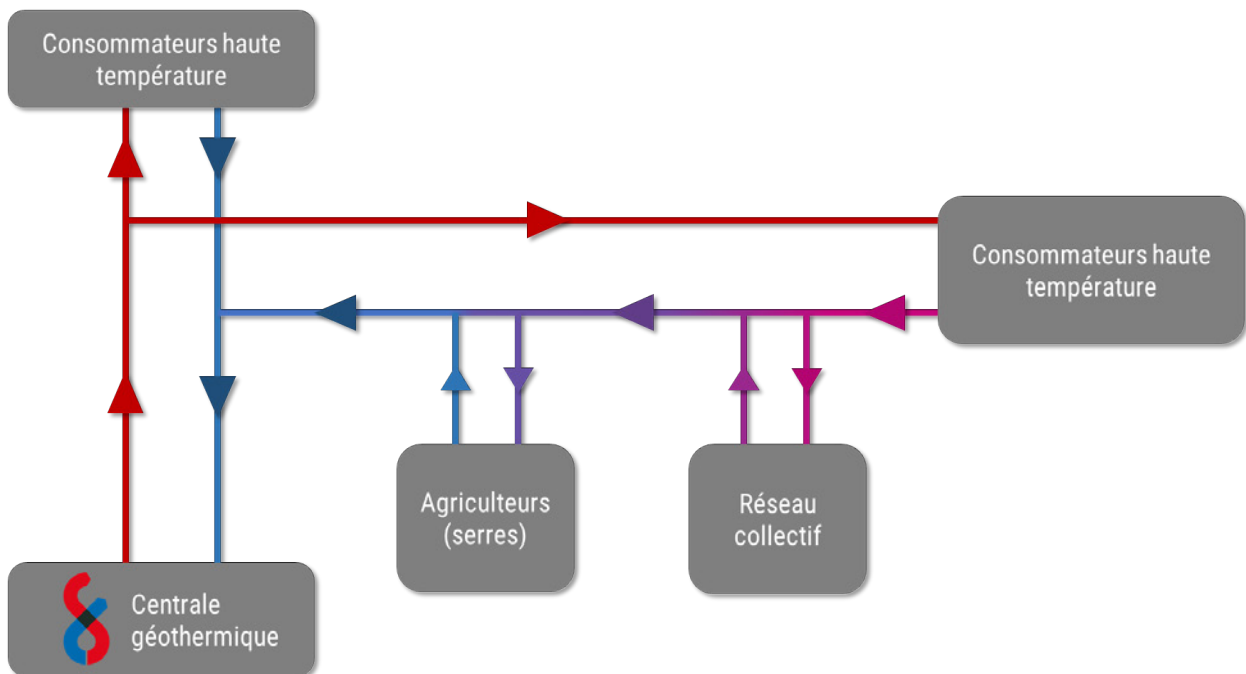


Figure 5.2 : Schéma de principe des boucles du réseau de chaleur

Plusieurs typologies de clients sont envisagées pour le raccordement au réseau de chaleur alimenté par Lithium de France. Les clients de type industriel consommant de grandes quantités de chaleur à une température élevée tout au long de l'année de façon constante et non saisonnière ainsi que les sites opérationnels de Lithium de France, dont les procédés mettent en œuvre des étapes d'évaporation, seront raccordés sur la branche haute température du réseau de chaleur. Les consommateurs nécessitant une température plus faible tels que les collectivités assurant le chauffage de bâtiments publics et collectifs, les réseaux de chauffage urbain, le chauffage de serres ou les clients industriels chauffant des espaces de stockage seront quant à eux raccordés sur la branche basse température de ce même réseau.

Pour une production géothermale de 250 m³/h avec des températures de production de 150°C et une température moyenne de réinjection d'environ 70°C, la puissance thermique disponible sur la boucle géothermale est d'environ 21 MW. La température d'injection sera limitée à 50°C. Hors périodes de maintenance, le réseau de chaleur et la boucle géothermale pourront être en exploitation tout à long de

l'année, ce qui correspond à environ 8 000 heures de fonctionnement par an. La quantité d'énergie disponible serait donc de l'ordre de 170 GWh par an.

5.3 L'unité d'extraction du Lithium

Depuis plusieurs années, Lithium de France travaille à l'identification et au développement de la solution technologique la plus intéressante pour la valorisation du lithium géothermal, et à son intégration dans l'ensemble du projet. Ces technologies sont communément dénommées *DLE*, pour *Direct Lithium Extraction*. A ce stade, le procédé d'extraction de lithium envisagé est basé sur l'*adsorption* sur un support solide, une technique adaptée aux contraintes opératoires de la centrale de géothermie.

Lithium de France projette dans un premier temps d'installer au moins une unité de démonstration DLE sur le site des « Sources 1 », afin de valider le choix de la technologie DLE à déployer dans la future unité de production de lithium, de tester et d'améliorer le procédé de mise en œuvre d'extraction de lithium en continu, d'évaluer le comportement de cette technologie en conditions réelles (saumure réelle, température, pression, etc.), et de fixer les paramètres de dimensionnement de la future unité de production de lithium. Le détail de chaque unité de démonstration envisagé ainsi que la nature des tests programmés seront soumis aux autorités compétentes au fur et à mesure de leur conception et avant toute mise en œuvre sur le terrain.

Dans un second temps et après avoir validé les critères précédents, une unité industrielle d'extraction du lithium à partir de la saumure sera implantée en aval des échangeurs de chaleur de la boucle géothermale (Figure 5.1). Cette unité sera composée de plusieurs colonnes remplies de matériau adsorbant pour permettre un fonctionnement en continu de l'extraction du lithium contenu dans le fluide géothermal, avant de réinjecter celui-ci dans le réservoir d'où il aura été prélevé.

Une fois saturé en lithium, le matériau adsorbant contenu dans les colonnes sera rincé avec une solution aqueuse pour en extraire le lithium : cette étape de relargage du lithium s'appelle la phase d'éluat, et permettra de produire une solution concentrée en chlorure de lithium et débarrassée de l'essentiel des impuretés contenues dans l'eau géothermale appelée « éluat ». Cet éluat sera ensuite concentré sur site avant d'être acheminé vers un site centralisé de traitement du lithium en vue de produire des sels de lithium de qualité batterie, sous forme de carbonate de lithium ou d'hydroxyde de lithium de haute pureté.

Différentes étapes de traitement de l'éluat et des éventuels flux de rinçage intervenant dans les étapes du procédé d'extraction de lithium seront mises en œuvre afin de maximiser le recyclage et limiter les consommations d'eau de l'ensemble du procédé. Les eaux résiduelles seront réinjectées dans le puits d'injection et elles n'excéderont pas 1,5% du volume d'eau géothermale circulant dans la boucle géothermale, soit environ 32 000 m³ d'eau par an pour le projet Les Sources 1.

A titre informatif, le projet « Les Sources 1 » vise à produire de l'ordre de 1 500 tonnes LCE (carbonate de lithium équivalent) par an.

5.4 Plan d'implantation et intégration paysagère

La Figure 5.3 présente le plan d'implantation prévisionnel de la future centrale géothermique et d'extraction de lithium tel qu'imaginé dans l'état actuel du développement du projet « Les Sources 1 », à partir du plan de masse projeté pour la phase de forage. Ce plan d'implantation présente les éléments principaux suivants :

- Les puits de géothermie GS1A et GS1B issus de la phase de forage du projet « Les Sources 1 ». Ces puits sont centrés sur une zone libre d'installations pérennes afin de pouvoir envisager de remobiliser un rig de forage lors d'une phase ultérieure d'intervention sur les puits, sans nécessiter de modifications majeures du site opérationnel comprenant la boucle géothermale et l'unité DLE,
- La boucle géothermale située au plus proche des puits de géothermie, avec des aérothermes à l'arrière du bâtiment pour évacuer occasionnellement la chaleur géothermale,

- L'usine DLE d'extraction de lithium et ses auxiliaires de fonctionnement,
- Un bâtiment tertiaire abritant à la fois les salles de contrôle des installations et les locaux techniques support aux activités du site (vestiaires, sanitaires, atelier, etc.) et des locaux d'accueil du public afin de pouvoir présenter les activités de Lithium de France tout en garantissant la sécurité des personnes présentes sur site,
- Des bassins de stockage d'eau géothermale et de préparation de saumure de tuage des puits en cas d'intervention sur les puits,
- Des bassins de collecte et de traitement d'eau pluviale,
- Des places de stationnement proche de l'entrée du site et une voie de circulation périphérique permettant aux divers véhicules nécessaires aux opérations de maintenances courantes et occasionnelles d'accéder aux différentes parties du site.

L'accès au site se fera par la route départementale D243 au sud du terrain, par une voie d'accès avec un « Stop » permettant aux véhicules de limiter l'impact sur le trafic routier aux abords du site et jugé plus sécuritaire par la DDT que des voies d'insertion.

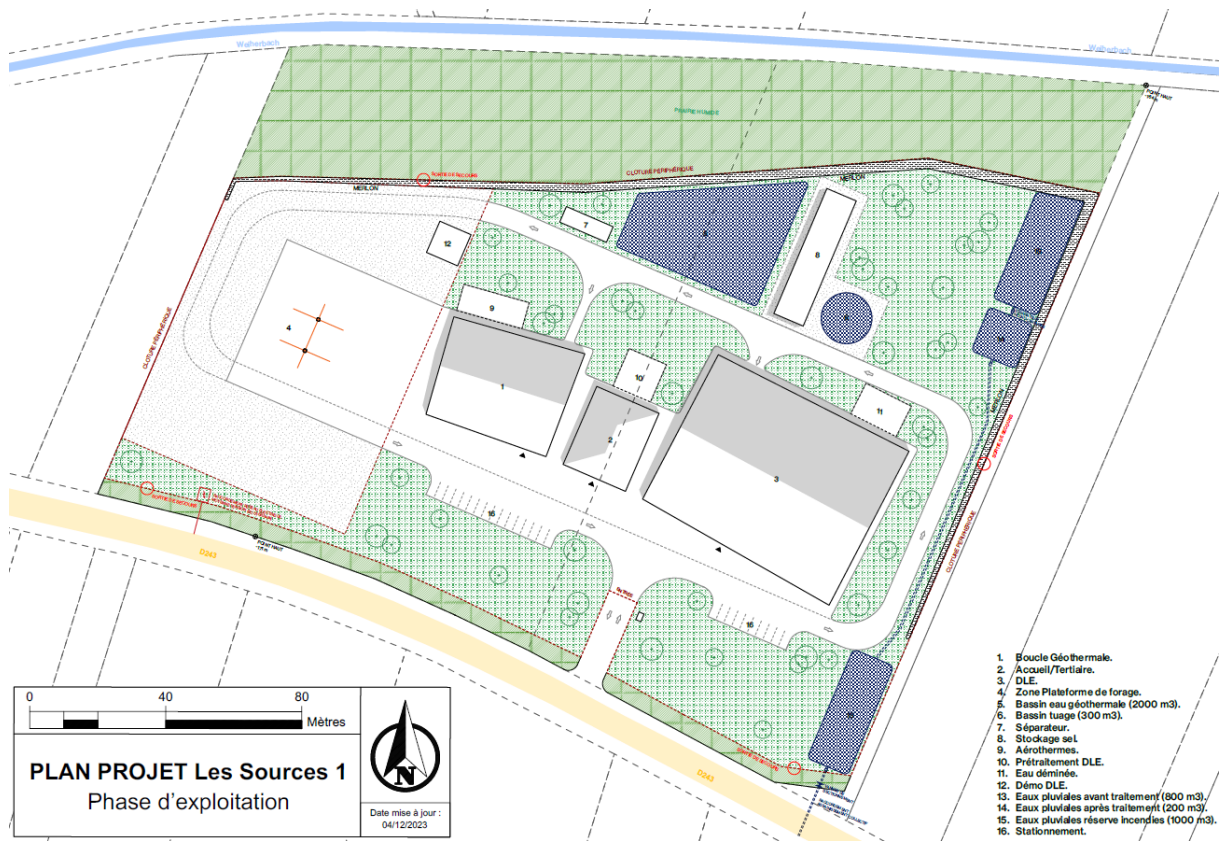


Figure 5.3: Implantation prévisionnelle de la future centrale géothermique et d'extraction de lithium du projet « Les Sources 1 »

Lithium de France vise à concevoir un projet industriel qui établit un lien harmonieux avec son environnement, par la réflexion des architectures et l'aménagement paysager, en intégrant les spécificités de la typologie traditionnelle des maisons alsaciennes. Pendant presque un an, un collaborateur de Lithium de France diplômé de l'école d'architecture de Strasbourg a travaillé sur l'intégration du futur site de production de chaleur et de lithium géothermal dans le paysage Nord-Alsace et notamment au droit des terrains identifiés.

Pour la centrale géothermique, les codes de construction alsacien seront retenus, à savoir, des façades en terre et en pierre, une structure en bois, une toiture en terre cuite comme le montre la Figure 5.4. Les matériaux de construction seront locaux afin d'éviter l'importation de matériaux lointains et de préserver l'identité culturelle de l'Outre-Forêt.

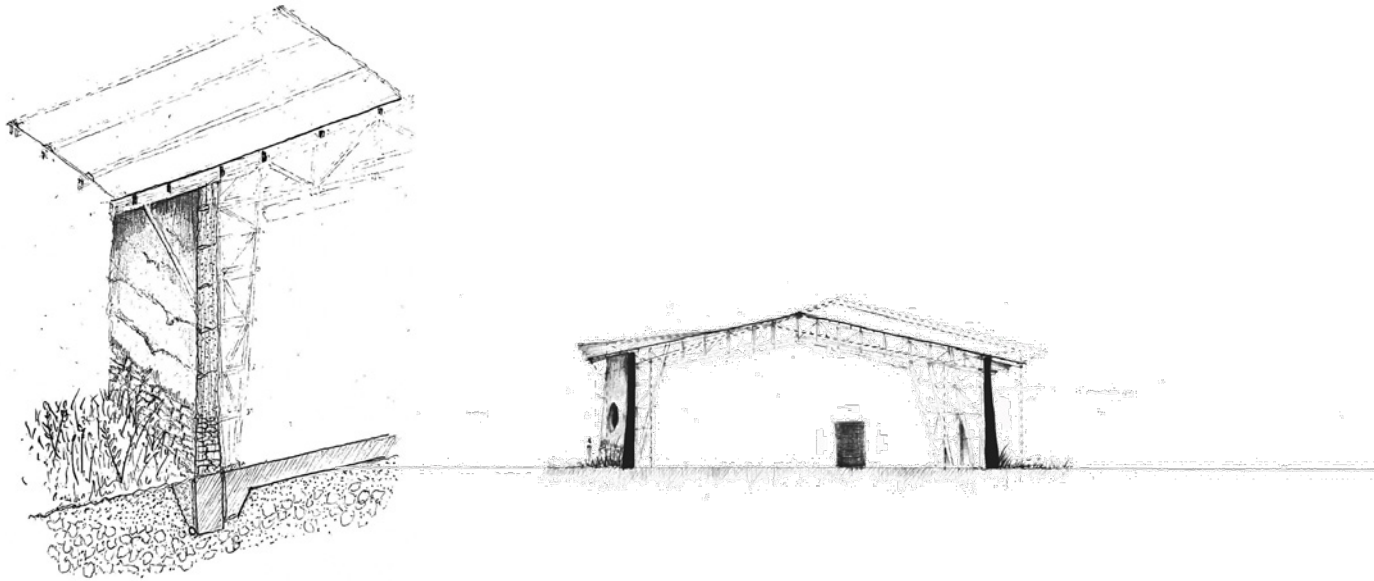


Figure 5.4 : Croquis de structure architecturale de la centrale géothermique

L'aménagement paysager s'inspire quant à lui de la distribution et la répartition des espaces ruraux en Alsace. On parle ici des atouts paysagers, dont les ripisylves, les prairies et les lisières, pour embellir le paysage et fertiliser les sols. Ainsi, le dessin d'un jardin sylvestre est proposé pour abriter les architectures imaginées. L'idée n'est pas d'artificialiser toute la parcelle, mais de faire un jeu mélodique entre le milieu industriel et le milieu naturel, comme le montre la Figure 5.6.



Figure 5.5 : Principe architectural envisagé d'Ouest en Est des bâtiments de boucle géothermale, d'accueil et du bâtiment d'extraction du lithium

Le principe architectural envisagé pour le projet a ensuite été étendu à l'échelle du site en prenant en compte les contraintes du Plan Local d'Urbanisme (PLU) et en souhaitant valoriser et restaurer une zone humide identifiée sur les parcelles. Environ 1 hectare de terres agricoles sera ainsi transformé en prairie riche en flore spécifique des zones humides mais également afin d'attirer des espèces de faune endémique tel que des papillons, comme l'azuré de la sanguisorbe ou le cuivré des marais. L'objectif est de créer un biotope et une biocénose favorables à un écosystème type de zone humide. Moins de 50% de la surface du site sera ainsi artificialisée.

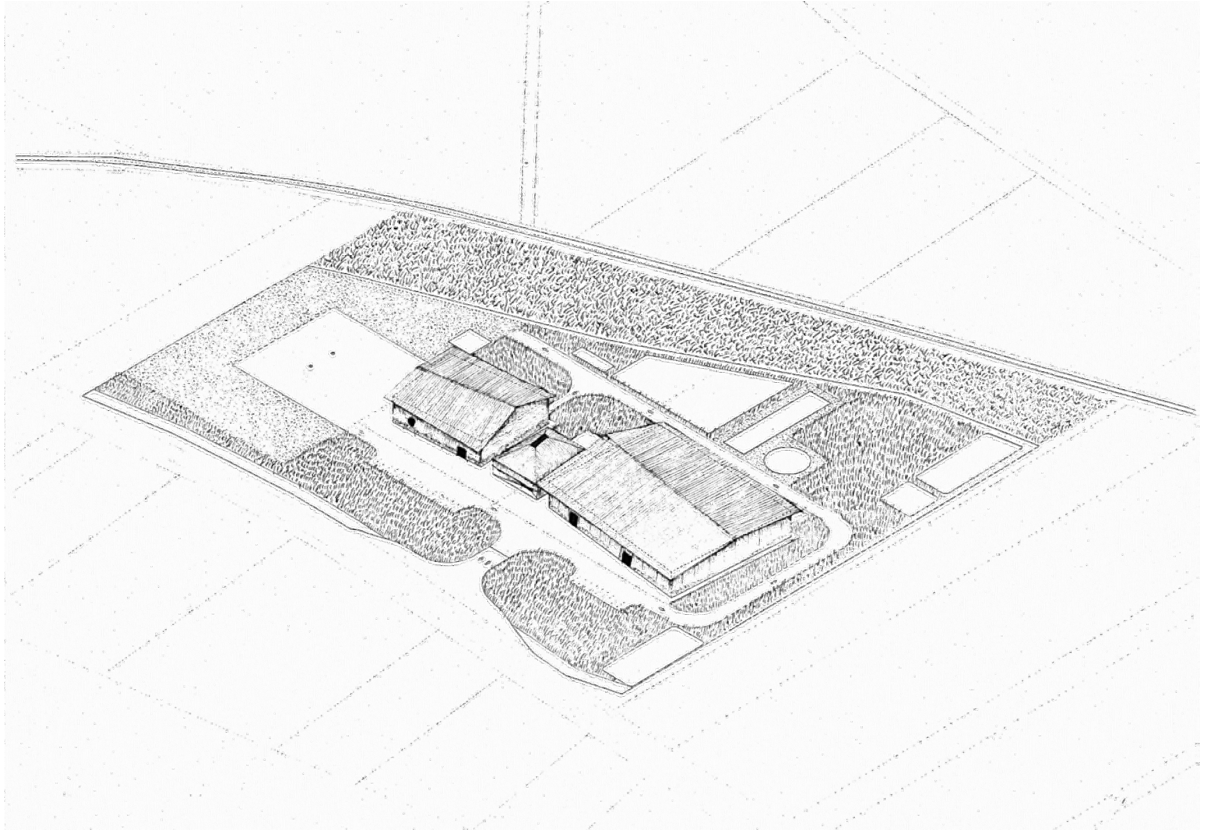


Figure 5.6 : Principe architectural du futur site du projet « Les Sources 1 »

6 PREVENTION DE LA SISMICITE INDUITE

6.1 Sismicité naturelle

L'activité sismique historique du Fossé rhénan est modérée et régulière avec au total, entre 782 et 1964, ~170 séismes ressentis d'intensité $I_0 \geq V$ et 17 séismes destructeurs avec une intensité $I_0 \geq VII$ d'après le catalogue SisFrance¹³. Le plus important correspond au séisme de Bâle du 18 octobre 1356 qui causa plusieurs centaines de morts. L'intensité épacentrale du séisme a été estimée à IX par la base SisFrance, correspondant à une *magnitude de moment* M_w comprise entre 6,2 (Lambert et al., 2005¹⁴) et 6,5 (d'après le catalogue 2023 de GINGER CEBTP, basé sur le recalcul de la magnitude des événements historiques par Traversa et al. (2018)¹⁵).

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 ($M_w \sim 5,3$), d'Ebingen en Allemagne du 16 novembre 1911 ($M_w \sim 5,7$), 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, 10 séismes ont été enregistrés avec une magnitude de moment $M_w > 4,0$. Le plus important est le séisme du 03/09/1978 ($M_w=5,0$), 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 26/02/1969 ($M_w=4,7$), le séisme de Tübingen en Allemagne daté du 22/01/1970 ($M_w=4,8$) et celui de Rambervilliers du 22/02/2003 ($M_w=4,9$).

Lorsqu'on se restreint à la période récente entre 1980 et 2023, 43 événements sismiques de magnitude 2,5 ou supérieure ont été localisés dans le Bas-Rhin (Figure 6.1), d'après les catalogues sismiques présents sur les sites du RENASS¹⁶ et du BGR¹⁷. Sept d'entre eux ont leur *épicentre* situé à moins de 10 kilomètres du projet GS1A ; les magnitudes de ces séismes sont toutes inférieures à 3.

Les séismes historiquement ressentis à Haguenau sont recensés dans le Tableau 6.1.

¹³ <http://www.sisfrance.net>

¹⁴ Lambert, J., Winter, T., Dewez, T., Sabourault, P., 2005. New hypotheses on the maximum damage area of the 1356 Basel earthquake (Switzerland). *Quat. Sci. Rev.* 24, 381–399. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2004.02.019>

¹⁵ Traversa, P., Baumont, D., Manchuel, K., Nayman, E., Durouchoux, C., 2018. Exploration tree approach to estimate historical earthquakes M_w and depth, test cases from the French past seismicity. *Bull. Earthq. Eng.* 16, 2169–2193. <https://doi.org/10.1007/s10518-017-0178-7>

¹⁶ <https://renass.unistra.fr/fr/zones/>

¹⁷ <https://geoportal.bgr.de/mapapps/resources/apps/geoportal/>

2. NOTE DE PRESENTATION NON TECHNIQUE

Tableau 6.1 : Séismes historiquement ressentis d'après la base SisFrance. L'intensité macroscopique a été recalculée avec la loi d'atténuation lorsque celle-ci n'était pas disponible dans SisFrance

Date (d'après SisFrance)	Localisation épiscopentrale (d'après SisFrance)	Intensité épiscopentrale (d'après SisFrance)	Intensité macroscopique ponctuelle rapporté à la ville de Haguenau (d'après SisFrance)	Intensité macroscopique ponctuelle rapportée à la ville de Haguenau (d'après la loi d'atténuation de Bakun and Scotti (2006) pour la région du Rhin)
18/02/849	(Remiremont ?)	VIII	-	IV
18/09/1239	Alsace (Ribeauvillé ?)	VII	-	IV
18/10/1356	Suisse (Bale)	IX	-	V
09/05/1357	Hardt (Landau ?)	VII	-	V-VI
12/05/1682	Remiremont	VIII	-	V
03/08/1728	Allemagne (Lahr)	VII	-	I
18/05/1733	Allemagne (Mayence)	VII	-	V-VI
18/05/1737	Allemagne (Karlsruhe- Rastatt)	VII	-	V-VI
28/12/1776	Allemagne (Mannheim)	VII	-	-
16/11/1911	Allemagne (Ebingen)	VII-VIII	VI	-
08/02/1933	Allemagne (Rastatt)	VII	V-VI	-
27/06/1935	Allemagne (Kappel)	VII-VIII	V-VI	-
30/12/1935	Allemagne (Offenburg)	VII	V-VI	-
02/05/1943	Allemagne (Ebingen)	VII	IV-V	-
28/05/1943	Allemagne (Balingen)	VII	IV	-
07/06/1948	Allemagne (Karlsruhe)	VII	IV-V	-
08/10/1952	Wissembourg (France)	VI-VII	V-VI	-
22/01/1970	Allemagne (Onsmettingen)	VII	IV	-
03/09/1978	Allemagne (Onsmettingen)	VIII-VI	III	-

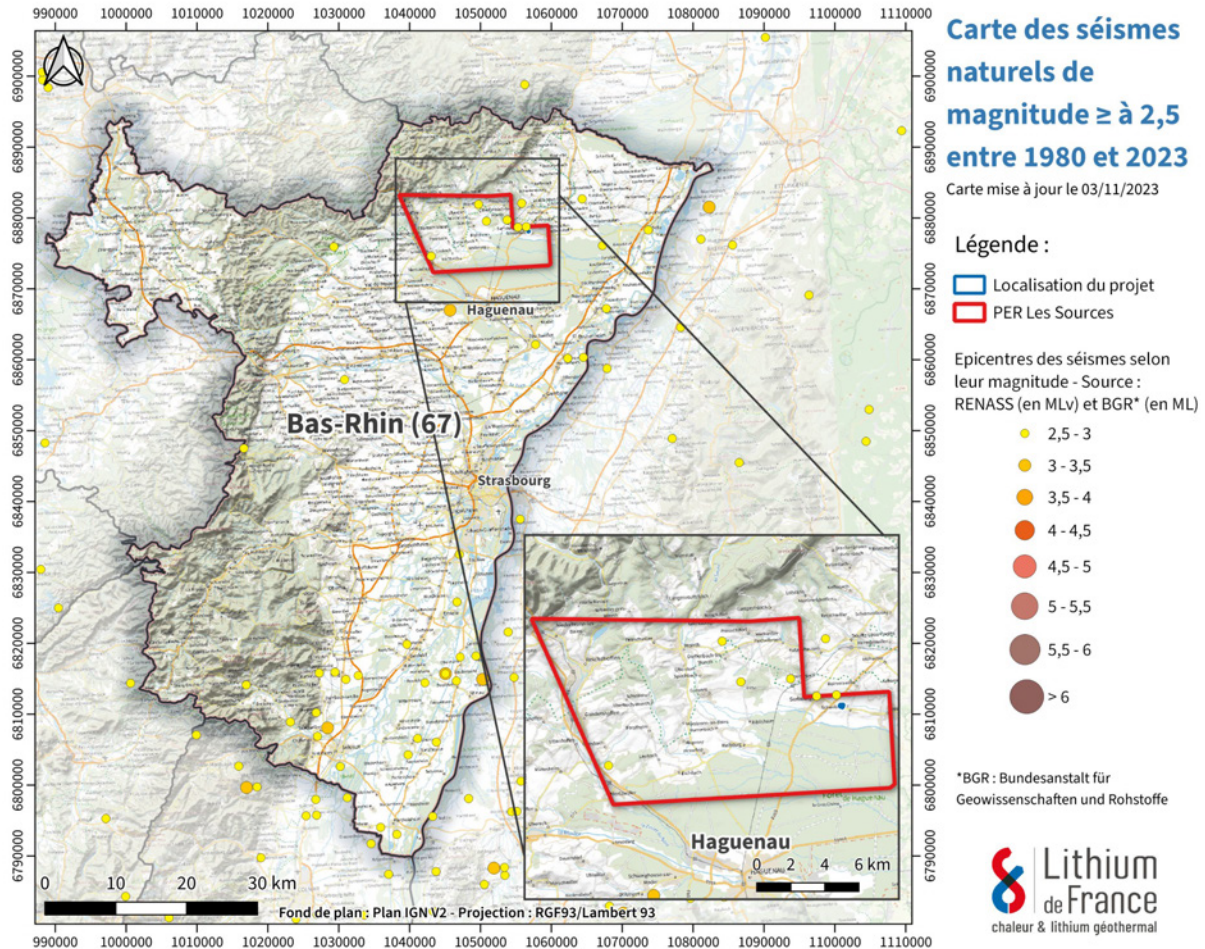


Figure 6.1 : Localisation des événements sismiques naturels de magnitude supérieure ou égale à 2.5 entre 1980 et 2023 dans le Bas-Rhin et ses environs.

6.2 Sismicité induite

Le bilan de *sismicité induite* effectué sur le site du projet « Les Sources 1 » 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 2023, correspondant majoritairement à des événements déclenchés par l'activité géothermale des projets de Soultz-sous-Forêts, de Rittershoffen et de Vendenheim.

Le Tableau 6.2 compile les résultats de cette analyse pour le site du projet «Les Sources 1» pour les quatre séismes présentant le PGV le plus élevé. Les trois premiers événements ont été induits par l'exploitation de Vendenheim et le quatrième par l'exploitation de Rittershoffen (Schmittbuhl et al., 2021¹⁸).

¹⁸ Schmittbuhl, J., Lambotte, S., Lengliné, O., Grunberg, M., Jund, H., Vergne, J., Cornet, F., Doubre, C., Masson, F., 2021. Induced and triggered seismicity below the city of strasbourg, france from november 2019 to january 2021. *Comptes Rendus Géoscience* 353, 1–24

Tableau 6.2 : Caractéristiques des séismes ayant les plus fortes vitesses au niveau du site.

Date	Magnitude (M _w)	Distance hypocentrale (km)	PGA moyen (mm/s ²)	Fourchette PGA (mm/s ²)	PGV moyen (mm/s)	Fourchette PGV (mm/s)
26/06/2021	3.6	29	14.0	7.3 – 24.7	0.37	0.25 – 0.56
04/12/2020	3.4	27	11.1	5.9 – 19.6	0.26	0.18 – 0.40
22/01/2021	3.3	29	8.6	4.7 – 15.2	0.20	0.15 – 0.29
20/11/2022	1.8	4	16.4	2.6 – 43.4	0.08	0.04 – 0.15

Les accélérations les plus significatives pour la sismicité induite sont supérieures à 10 mm/s² et correspondent à des vitesses supérieures à 0,20 mm/s pour des séismes de magnitude M_w > 3. L'évènement enregistré le 20/11/2022 à proximité de Rittershoffen et donc du site du projet « Les Sources 1 » a généré une accélération relativement forte (PGA = 16,4 mm/s²) malgré sa faible magnitude (M_w=1,8).

L'impact en termes de PGV de ces séismes induits sur le site « Les Sources 1 » est visible sur la Figure 6.2. Les valeurs des PGV 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 0,2 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 M_w comprise entre 3 et 4) sont localisés juste au nord de Strasbourg, suffisamment éloignés pour ne pas causer de mouvement fort sur le site « Les Sources 1 ».

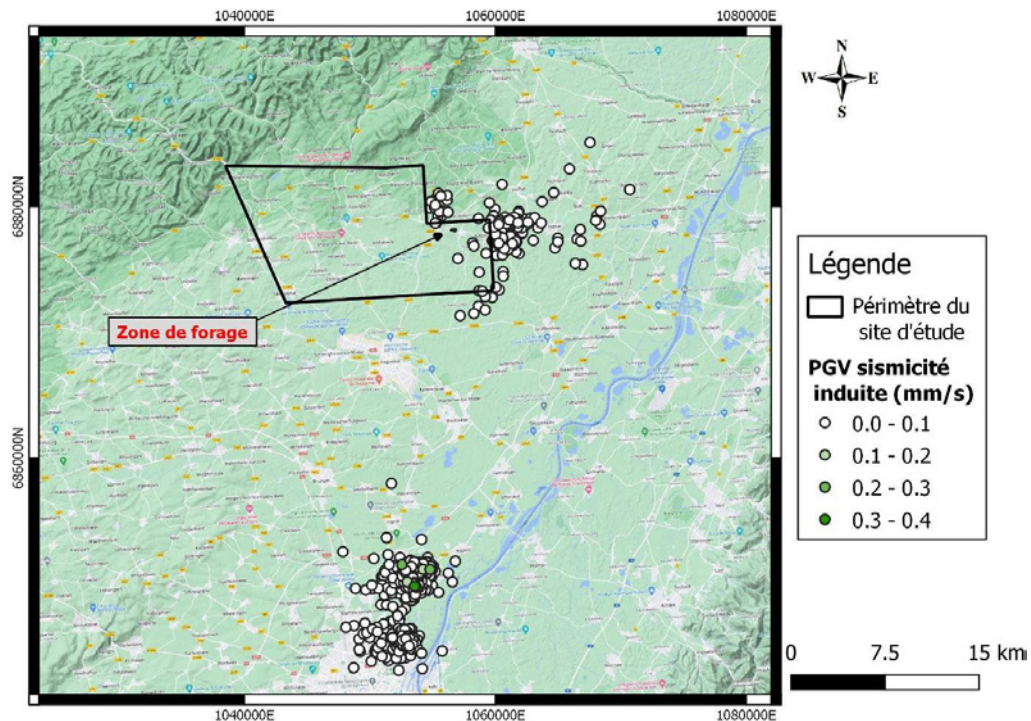


Figure 6.2 : Séismes induits extraits des catalogues Réness-LDG depuis 2012 jusqu'en 2023 autour du site et leur impact potentiel sur le site d'étude en termes de PGV. Les magnitudes de moment sont comprises entre 0.9 et 3.6.

6.3 Prédiction de la sismicité induite à travers des simulations numériques géomécaniques

Dans un projet de géothermie profonde, la compréhension préalable de la potentielle sismicité induite est essentielle pour le bon fonctionnement du projet. Les événements sismiques se déclenchant majoritairement sur des failles préexistantes ou des fractures présentes dans les *zones de faille*, il est d'abord important d'étudier la susceptibilité des failles à glisser naturellement, sismiquement ou non, à proximité du doublet de puits. Cette étude a été réalisée avec le logiciel 3DStress (Southwest Research Institute). Elle confirme la forte susceptibilité au glissement, et donc la forte propension à la sismicité, des failles situées à proximité des trous ouverts des puits, en accord avec la sismicité naturelle observée autour du projet « Les Sources 1 ». Il est tout de même à signaler que le glissement des failles n'est pas nécessairement sismique et dépend des propriétés mécaniques des failles. Par la suite, des modèles prédictifs thermo-hydro-mécaniques ont été construits avec le logiciel de *simulation dynamique* 2D Disroc (FracSima), afin d'estimer les risques *géomécaniques* de l'exploitation sur le réservoir géothermique. Diverses hypothèses et incertitudes sur les paramètres adoptés dans les modèles sont discutées. Ces simulations s'appuient principalement sur le modèle statique construit préalablement, mais aussi sur les données issues de la littérature sur le Fossé rhénan. Diverses hypothèses et incertitudes sur les propriétés *pétrophysiques* adoptées dans les modèles sont discutées. Les différentes simulations réalisées informent sur la probabilité de microsismicité induite au cours de 20 ans d'exploitation géothermique. Elles montrent qu'aucun événement microsismique n'aura lieu avant 12 ans de circulation de fluide dans le cas géomécanique de base. Nous n'avons malheureusement pas pu nous appuyer sur les données sismiques 2D et les données de puits de plus de 10 ans (de fait dans le domaine public, cf. article L413-1 du Code minier) acquises par les autres opérateurs géothermiques. Si elles avaient été publiées, nous aurions grandement pu améliorer la compréhension et la prédiction du risque sismique lié au projet en levant certaines incertitudes. De plus, les données d'interférences acquises avec des fonds publics auraient également pu permettre des études plus poussées sur la mitigation du risque sismique. En cas d'évolution de la situation, Lithium de France est prêt à mettre à jour l'ensemble des modèles dès la réception de données complémentaires.

6.4 Bruit ambiant

La conception du réseau sismologique est un point clé dans le développement du projet « Les Sources 1 ». Afin qu'il réponde au mieux aux exigences de surveillance microsismique évoquées dans le Guide de Bonnes Pratiques 2023 (Maury et al., 2023¹), 100 géophones de type WiNG ont été déployés par la société S3 à l'est du PER du 20 juin au 13 juillet 2023 (Figure 6.3). Si la majorité des capteurs a été implantée au sein du PER, certains capteurs ont dû être disposés au sein des concessions voisines du GEIE et d'ECOGI. Cela, dans le but de garantir une couverture homogène de données autour du projet. Le traitement a consisté en deux tâches principales :

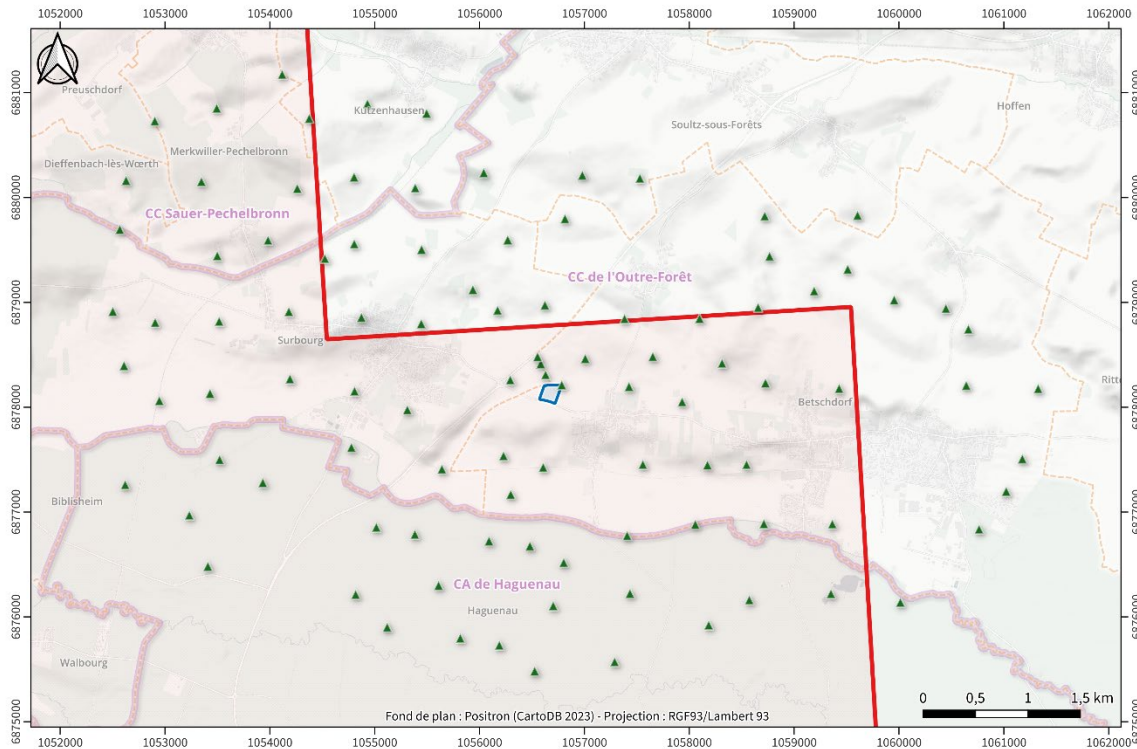
- D'une part, le calcul des *valeurs efficaces* du signal (ou RMS) de chaque station toutes les deux minutes pour 6 bandes de fréquences ;
- D'autre part, le calcul des *densités spectrales de puissance* (ou DSP) pour chaque station pour chaque heure d'acquisition.

Sur ces cartes, les sources de bruit sont clairement identifiées comme la ville de Betschdorf (4200 résidents), Surbourg (1700 résidents), et d'autres plus petites comme Schwabwiller (500 résidents) et Reimerswiller (200 résidents). Le croisement des routes D263 et D243 ainsi que de la route D264 quittant Surbourg vers le nord sont également des zones de bruit élevé. Le bruit est également plus élevé à proximité des voies ferrées ainsi qu'à proximité de la briqueterie Wienerberger au nord de Betschdorf. Au sud, la forêt est de manière générale calme bien que le bruit présente des variations latérales évidentes (Figure 6.4).

Cette étude confirme que le bruit atteint des seuils acceptables pour accueillir des stations de surveillance permanente dès lors que l'on s'éloigne des villages, des axes routiers et ferroviaires et des zones industrielles. Les emplacements proposés seront discutés dans le paragraphe suivant sur la base

de ces résultats. Pour les emplacements proposés au Sud, où les WiNGs n'ont pas été déployés, la proximité de sources évidentes de bruit anthropique a été prise en compte.

Les résultats de cette étude sont des données indispensables afin de correctement appréhender la variabilité spatiale et temporelle du *bruit ambiant* sur la zone du projet « Les Sources 1 », par exemple nuit vs jour ou jour de semaine vs jour de week-end. Cette étude est un paramètre d'entrée pour la conception du futur réseau sismologique et l'évaluation de sa sensibilité pour la détection d'évènements microsismiques.



Carte de la position des WiNGs pour la campagne de mesure de bruit ambiant

Carte mise à jour le 08/08/2023

Légende :

- ▲ position des WiNGs
- localisation du projet
- ▭ PER Les Sources

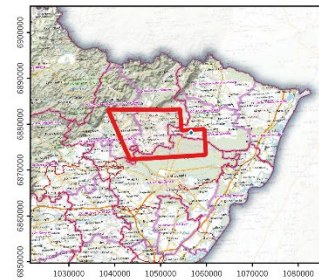


Figure 6.3 : Position des WiNGs dans le cadre de la campagne de mesure de bruit sismique réalisée en juin-juillet 2023 sur le PER Les Sources.

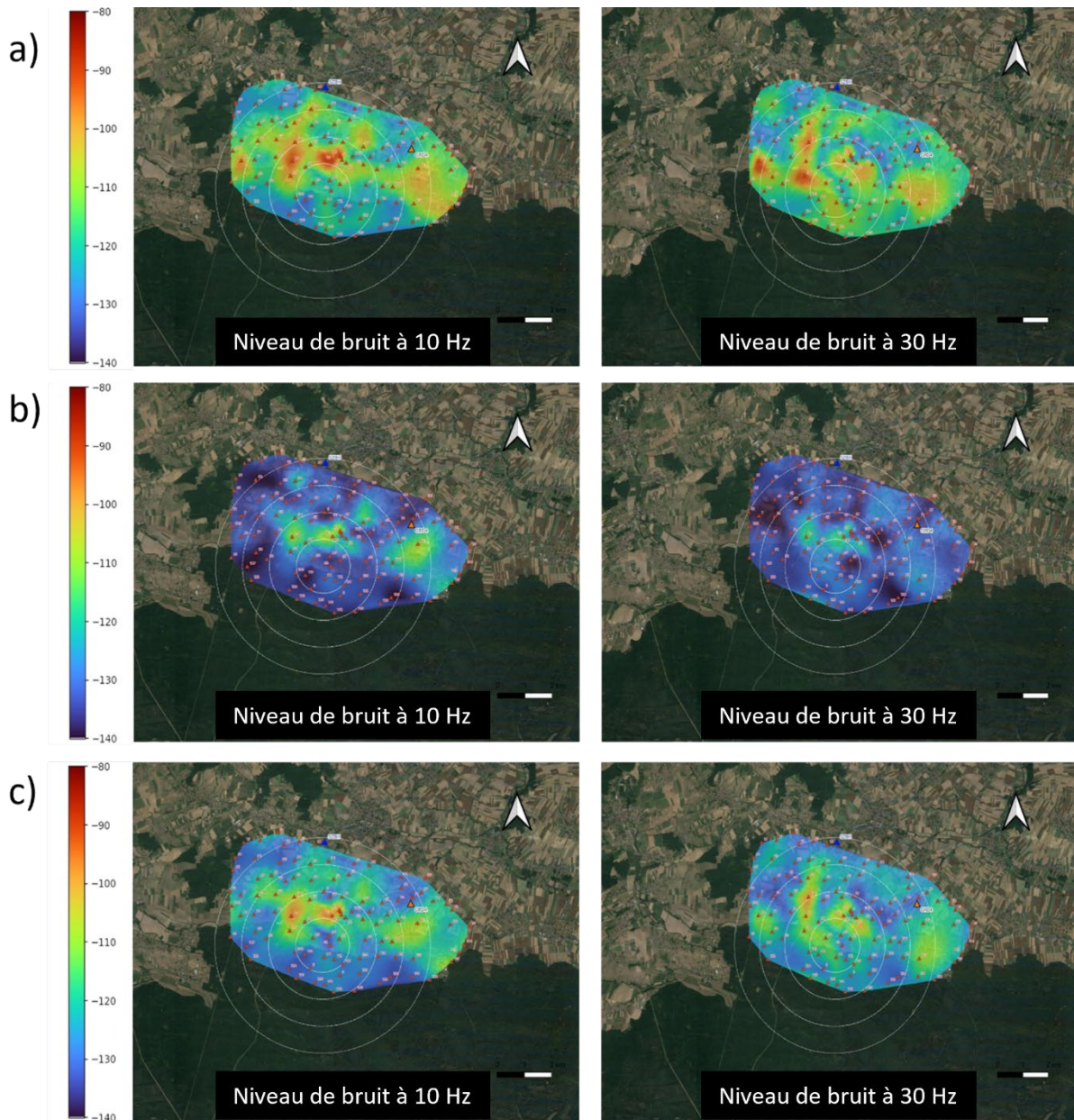


Figure 6.4 : Cartes du bruit à 10 Hz et 30 Hz pendant a) la période bruitée (en bleu sur les profils PSD), b) la période silencieuse (en rouge sur les profils PSD), c) la période intermédiaire (en vert sur les profils PSD). Les cercles sont centrés sur la coordonnée du fond du puits GS1B et sont espacés de 1.5 km.

6.5 Configuration du réseau sismique en fonction du forage, développement et exploitation

À la lumière de l'étude de bruit ambiant de 2023, 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 et de satisfaire aux préconisations du 'Guide de bonnes pratiques pour la maîtrise de la sismicité induite par les opérations de géothermie profonde' (Maury et al., 2023).

Le réseau proposé comprend 7 stations sismologiques permanentes, équipées de vélocimètres triaxiaux permettant une meilleure caractérisation des paramètres de source sismiques que des capteurs uniaxiaux. Un accéléromètre sera également colocalisé avec un des vélocimètres afin de permettre l'enregistrement d'éventuels événements forts ($M > 3$) qui pourraient saturer les vélocimètres.

Les positions des 7 stations envisagées à la suite de l'étude d'ISAMGEO sont présentées dans la Figure 1. L'accéléromètre sera préférentiellement déployé à la station n°1 ou station n°2, proches du site de surface du projet.

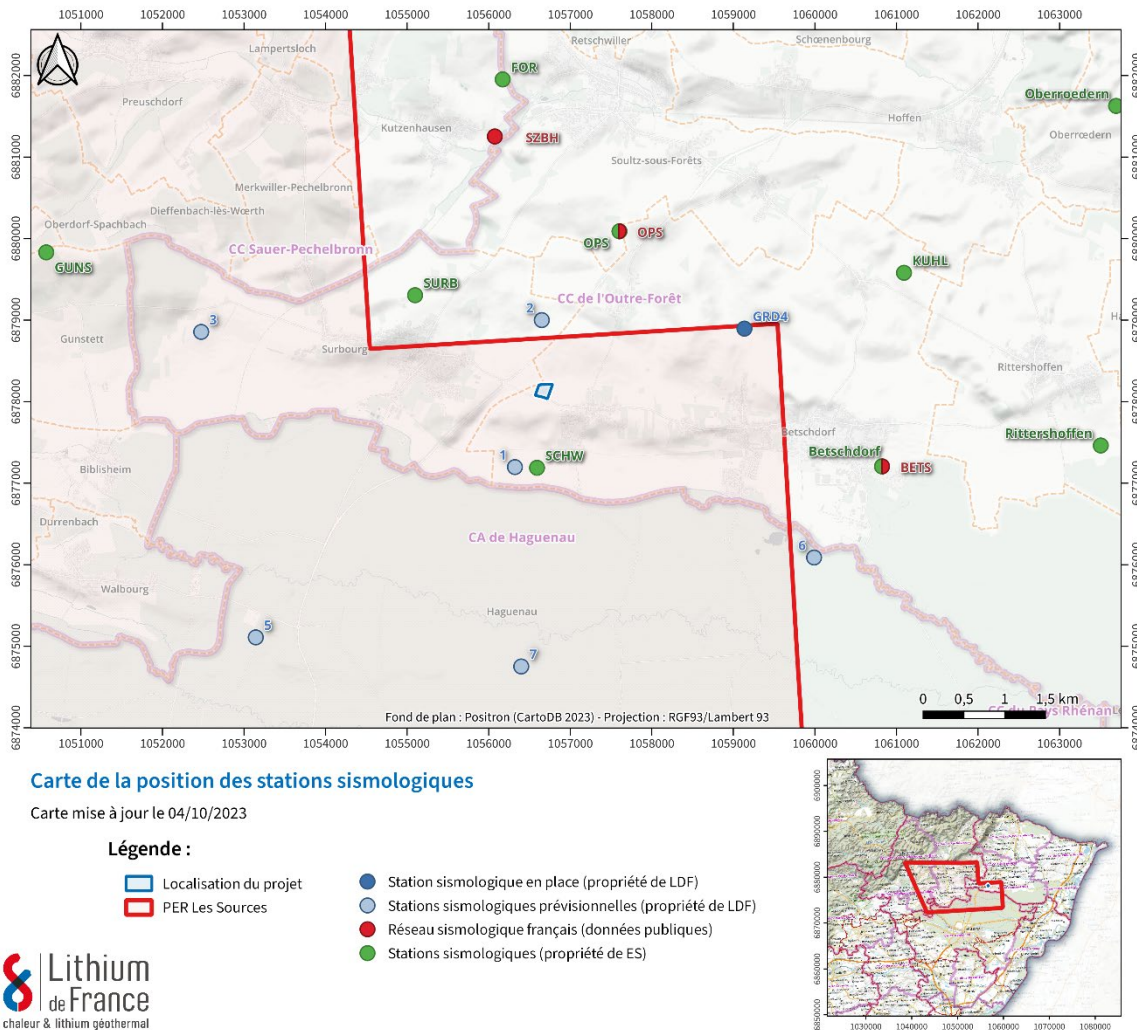


Figure 6.5 : Distribution des stations sismologiques en place et envisagées en 2023, à proximité de la localisation de surface du projet d'exploitation géothermique. Les stations installées appartiennent à des réseaux français public (Résef-Epos) et privé (ES : Electricité de Strasbourg). Sept stations ont initialement été proposées pour le projet Les Sources 1 de Lithium de France, en sachant que la station dénommée GRD4 a été installée en mai 2023.

En accord avec les recommandations du 'Guide de bonnes pratiques pour la maîtrise de la sismicité induite par les opérations de géothermie profonde' (Maury et al., 2023) :

- Ce réseau de base est composé de 7 stations sismologiques propres à Lithium de France ;
- La **magnitude de complétude** estimée par ISAMGEO pour ce réseau est égale à -0,9 jusqu'à 4 km de profondeur, sur un rayon de 5 km autour de la position de surface des puits (Figure 2). En considérant un bruit ambiant de 10 dB supérieur à celui enregistré au cours de l'étude de bruit ambiant, la magnitude de complétude augmente jusqu'à -0,3 sur cette même zone. En cas de problèmes d'acquisition simultanés de 2 stations (ici, les stations 6 et 7), la magnitude de complétude dans la zone considérée atteint -0,2. Ces valeurs restent inférieures à la magnitude de complétude maximale conseillée, fixée à 0,5 ;
- Les incertitudes de localisation des événements sismiques estimées par ISAMGEO sont inférieures à 100 mètres verticalement et à 400 mètres horizontalement dans un rayon de 3 km autour des puits, et jusqu'à 4 km de profondeur ;
- La zone présentant un écart azimutal inférieur à 120° couvre un rayon de 1 km autour des puits (a). Cette couverture est étirée dans la direction Est-Ouest mais restreinte dans la direction

Nord-Sud. En étudiant la possibilité d'inclure la station FR.SZBH du réseau public Résif-Epos au sein du réseau de surveillance microsismique de ce projet, la zone couverte atteindrait les 2 km de rayon au nord et serait beaucoup plus équilibrée (b).

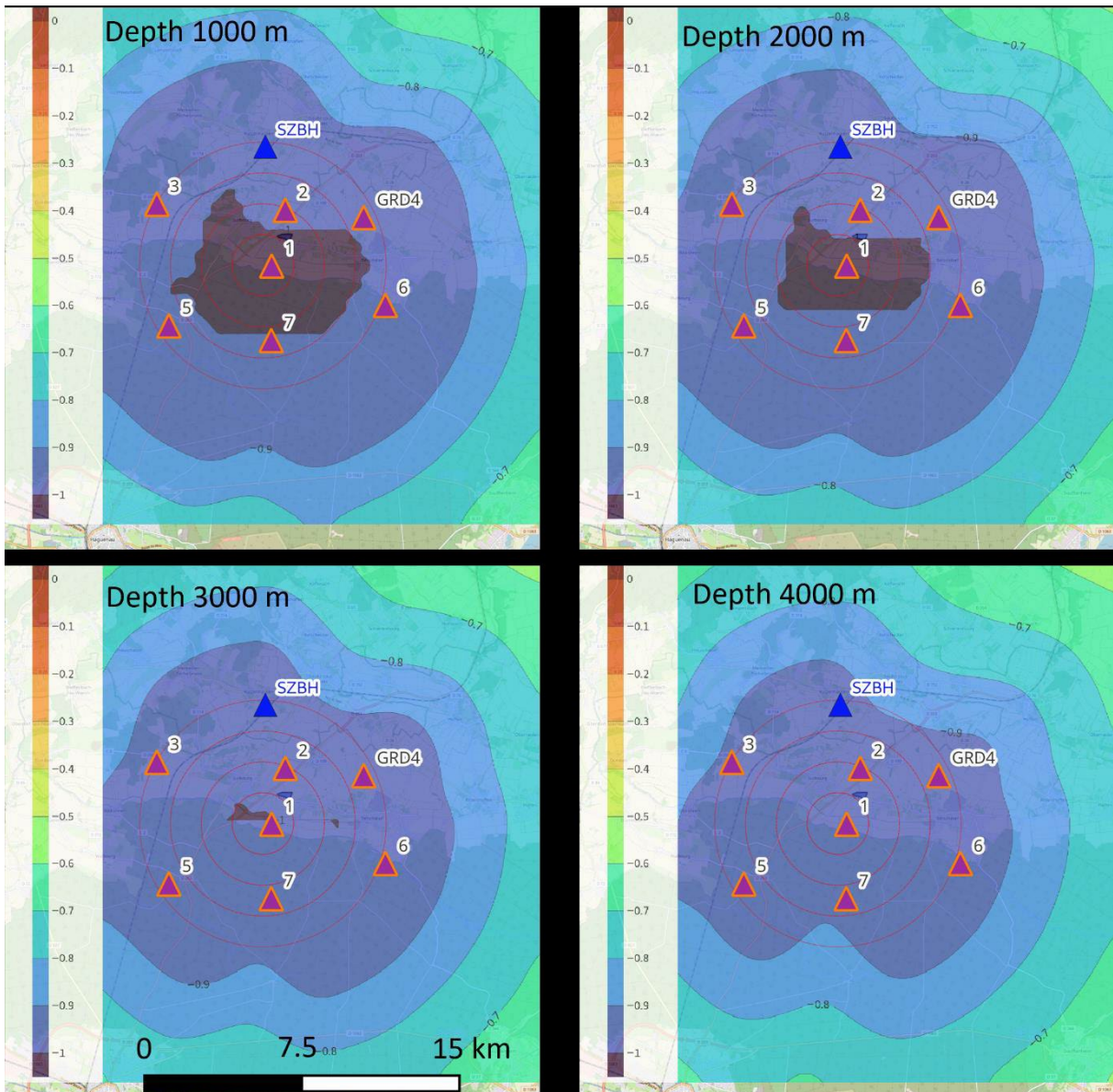


Figure 6.6 : Cartes de magnitude de complétude à différentes profondeurs (1 km, 2 km, 3 km et 4 km), réalisées d'après les DSPs (densités spectrales de puissance) fournies par S³.

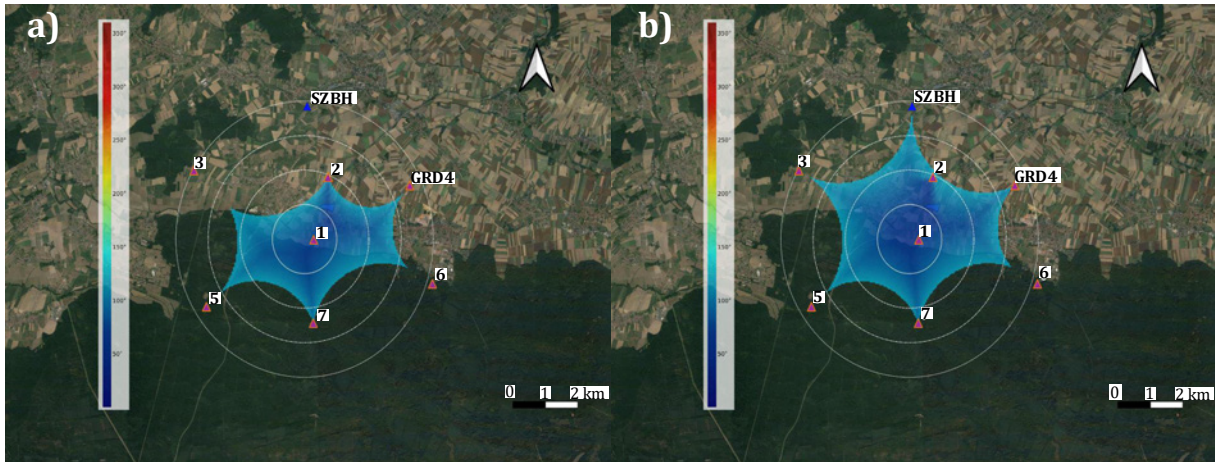


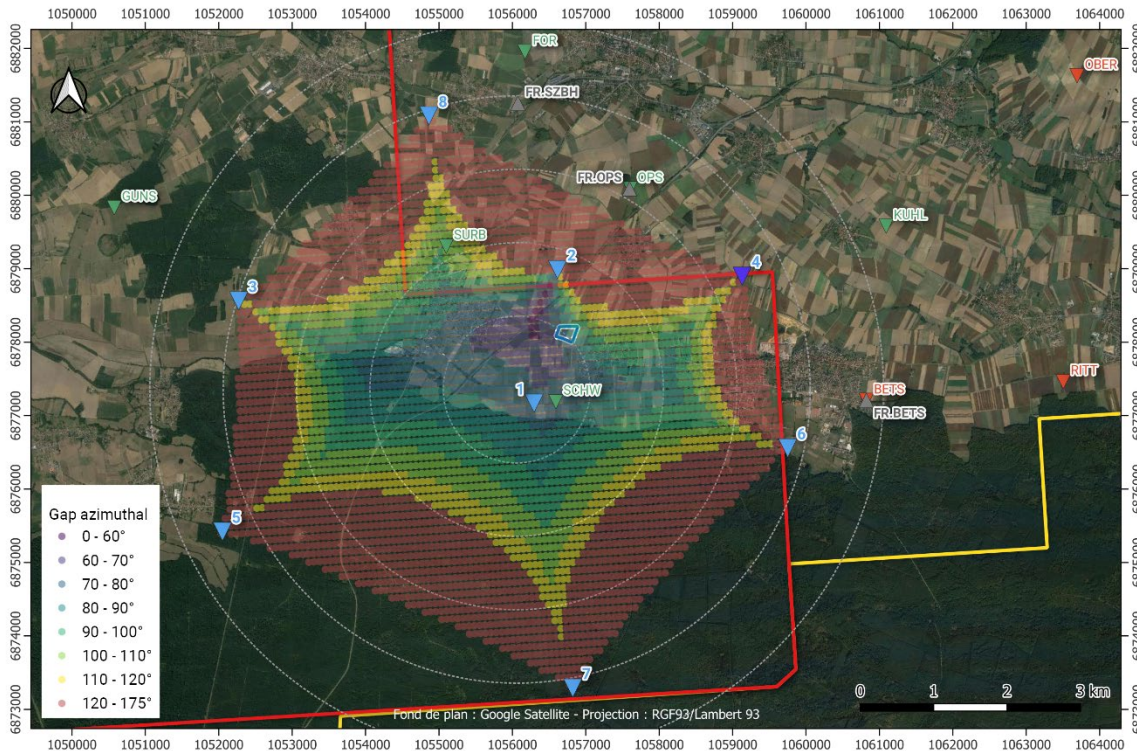
Figure 6.7 : Calcul de l'écart azimutal a) en considérant les 7 stations du réseau envisagée, et b) en prenant en compte la station SZBH du réseau public Résif-Epos. Seule la zone avec un écart azimutal inférieur à 120° est représentée. Les cercles concentriques autour de la cible sont affichés tous les kilomètres.

En mai 2023, Lithium de France installé une première station permanente de surface, nommée GRD4 (Figure 7.6).



Figure 6.8 : Site de la station sismologique de surface GRD4 sur la commune de Betschdorf.

Suite d'une question posée par les services instructeurs sur la couverture azimutale du réseau associée à la prise en compte ou non des données de stations publiques existantes (dont la station FR.SZBH de Résif-Epos), la mise en place d'une huitième station sismologique propre à Lithium de France (LdF) dans la partie nord du réseau (Figure 5) est finalement proposée. Cette station supplémentaire (n°8) permet d'assurer un gap azimutal inférieur à 120° étendue jusque 2-3 km de la cible du projet dans le quart Nord-Ouest du réseau.



Carte des futures stations du réseau de surveillance microsismique

Carte mise à jour le 24/05/2024



Légende

- | | |
|---|--|
| <p>Stations LdF</p> <ul style="list-style-type: none"> ▼ prévisionnelles ▼ fonctionnelles <p>Stations externes</p> <ul style="list-style-type: none"> ▲ Stations RESIF ▼ Stations ES Soultz | <ul style="list-style-type: none"> ▼ Stations ES Rittershoffen <p>Administratif</p> <ul style="list-style-type: none"> ▭ PER Les Sources ▭ PER Les Poteries ▭ Site LS1 |
|---|--|

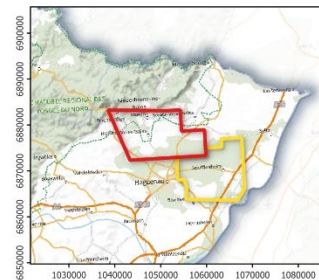


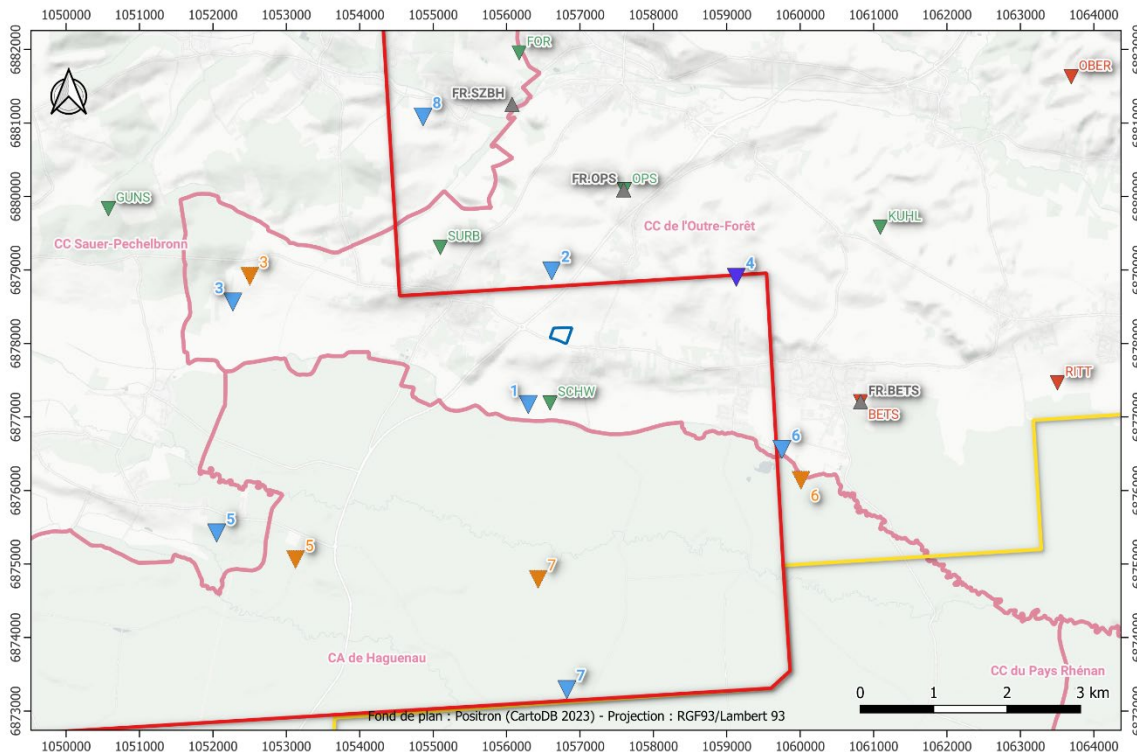
Figure 6.9 : Carte de la couverture azimutale associée aux huit stations sismologiques du réseau de surveillance microsismique de Lithium de France.

A la suite des visites de sites effectuées le 21 mars 2024 et du permittage réalisé courant mars-avril 2024 pour sécuriser les emplacements des futures stations sismologiques, les positions des stations prévues en zone agricole (stations n°1, 2, 3) n'ont presque pas évoluées. La station n°3 est décalée de 400 m au sud-ouest, en bordure de champ. Cependant, nous avons prévu de déplacer légèrement les trois stations initialement localisées en forêt (stations n°5, 6, 7) du fait de contraintes terrains et matériel. Effectivement, le choix des localisations en forêt indivise de Haguenau dépend de nombreux facteurs :

- Disponibilité des terrains ou contraintes environnementales, dont la présence de réserves biologiques, etc.
- Accessibilité au site (chemin praticable, restriction de circulation, emplacement en bordure de parcelle pour ne pas gêner les activités de l'Organisation Nationale des Forêts, etc.) ;
- Luminosité suffisante (pour assurer une bonne alimentation énergétique de la station par panneaux photovoltaïques et batteries), qui dépend également de la croissance et de l'essence des arbres alentours, des reboisements planifiés par l'ONF, etc. ;
- Disponibilité du réseau mobile (pour assurer la transmission des données en temps réel) ;

- Niveau de bruit sismique ambiant et sources de pollution (proximité de routes, de voies ferrées, ou d'autres activités anthropiques), qui peuvent influencer sur la qualité des données sismiques enregistrées et la sensibilité du réseau.

Les positions des stations révisées en incluant une huitième station sont présentées dans la Figure 6. La station n°5 est déplacée d'environ 1 km vers l'ouest, la station n°6 est déplacée de 500 m vers le nord-ouest et sort de la forêt, la station n°7 est déplacée d'environ 1,5 km vers le sud/sud-est. La nouvelle station n°8 est localisée à environ 1 km à l'ouest de la station SZBH de Résif-Epos.



Carte des futures stations du réseau de surveillance microsismique

Carte mise à jour le 24/05/2024



Légende

- | | |
|--|---|
| <p>Stations LdF</p> <ul style="list-style-type: none"> ▼ prévisionnelles ▼ fonctionnelles ▼ positions initiales <p>Stations externes</p> <ul style="list-style-type: none"> ▲ Stations RESIF ▼ Stations ES Soultz | <ul style="list-style-type: none"> ▼ Stations ES Rittershoffen <p>Administratif</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ PER Les Sources ■ PER Les Poteries ■ Site LS1 ■ Communautés de communes |
|--|---|

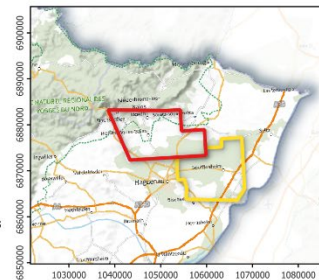


Figure 6.10 : Mise à jour des positions des stations sismologiques du réseau de surveillance microsismique de Lithium de France (LdF).

Il est prévu d'installer une à deux de ces 8 stations sismologiques en fond de puits, placée jusqu'à 100 mètres de profondeur. En effet, au vu de la localisation des stations par rapport à l'exploitation de surface, des cibles en profondeur du doublet, des contraintes environnementales, et des études de bruit ambiant réalisées (campagne de mesures de 2023 et tests en forêt réalisés courant mars 2024), la station n°1, centrale au réseau, et la station n°5, relativement proche d'une voie ferrée, paraissent être les meilleures candidates pour être installées en profondeur et gagner en performance (sensibilité) du réseau. Ces stations seront des SBA (*Shallow Buried Array*), chacune composée de deux géophones triaxiaux espacés de 30 m en profondeur et permettant d'assurer une redondance de l'information en cas d'avarie d'un des deux capteurs enfouis.

Les caractéristiques et capacités théoriques du réseau de surveillance microsismique en considérant les ajustements de positions, l'intégration de une à deux stations en fond de puits, et l'ajout de la station

n°8 sont en accord avec les recommandations du 'Guide de bonnes pratiques pour la maîtrise de la sismicité induite par les opérations de géothermie profonde' (Maury et al., 2023).

La mise en place du réseau de stations est prévue de manière progressive à partir du mois de juin 2024 et devrait se finaliser durant l'été 2024. **Une mise à jour des performances du réseau pourra être réalisée à partir des mesures réelles des capteurs une fois installés et des données complémentaires de terrain acquises lors des opérations.**

6.6 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 évènement 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 Sources 1 » est implanté dans une zone rurale faiblement urbanisée et 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) décrit au § 6.9 ci-après.

Pour le projet « Les Sources 1 », 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., 2023¹). L'arbre des décisions pour définir le niveau de l'aléa sismique d'un projet de géothermie profonde est décrit dans la Figure 6.9 ci-après. Comme décrit au § 6.2 de ce document, 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 acquisitions de CSEM menées par Lithium de France et les indices de perméabilités mis en évidence par les forages voisins indiquant la présence de ces circulations dans le réservoir ciblé par le projet « Les Sources 1 », le critère E2 est donc également positif. Enfin, les connexions entre les failles imagées par la campagne de sismique 3D et l'état de contrainte suggéré par la littérature concluant à un système où les failles sont critiqueusement chargées, le critère E4 est également validé positivement. Le niveau d'aléa 2 (modéré) est retenu pour le projet « Les Sources 1 » selon la méthodologie avancée par le « Guide des bonnes pratiques ». La mise en place de mesures de surveillance, le programme prévisionnel de données à acquérir et le système de feu de signalisation (TLS) pour le projet « Les Sources 1 » ont donc pris en compte les recommandations du « Guide des bonnes pratiques » pour un aléa de niveau 2.

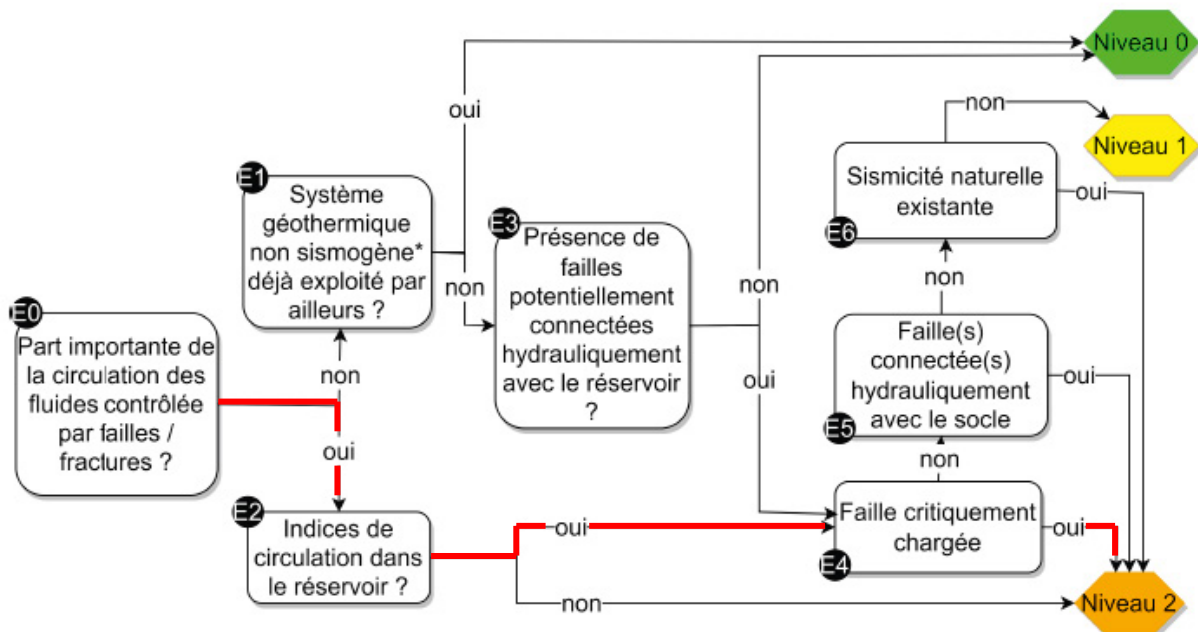


Figure 6.11 : Arbre de décision pour l'évaluation du niveau d'aléa d'un projet avant tout forage profond d'après Maury et al. (2023)¹.

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

- 1) Lors des phases de forage et de développement de l'ouvrage :
 - Après chaque forage et tests hydrauliques permettant de caractériser le comportement hydromécanique du réservoir ;
 - Avant toute opération visant à améliorer l'injectivité et/ou la productivité du puits ;
 - Après la réalisation d'un protocole visant à améliorer l'injectivité et/ou la productivité du puits ;
 - Après la réalisation de tests du doublet prouvant la connectivité en pression entre les forages injecteur et producteur et avant une mise en circulation de longue durée.
- 2) Lors de la phase d'exploitation de l'ouvrage, et si aucune dérive par rapport à la situation attendue n'a été observée :
 - annuellement pendant 5 ans (au minimum),
 - tous les 5 ans après 5 ans d'exploitation (au minimum),
 - en amont de la réalisation de travaux importants ou de redémarrage après un arrêt inopiné, ou/et un arrêt sur une longue période pouvant être à l'origine de surpressions importantes dans les puits (notamment lors de nouvelles stimulations ou lors de nouvelles réinjections).
- 3) Lors de l'arrêt définitif de l'ouvrage : avant la réalisation des opérations visant à stopper l'exploitation d'un ou plusieurs puits.

Chaque réévaluation de l'aléa sera soumise à la DREAL et la préfecture.

6.7 Evaluation de l'aléa sismique post-forage

Le projet « Les Sources 1 » étant de niveau 2, l'aléa sismique avant forage sera réévalué après le forage selon le « Guide des bonnes pratiques » (Maury et al., 2023)¹ (Figure 6.10). Cette évaluation 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. Elle s'appuie 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 les 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)¹, 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 (section 6.4) 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 (IP₀ dans la section 4.4). 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/productivité. Une réponse positive à ce critère classera le projet

« Les Sources 1 » 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	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 6.12 Arbre de décision prévisionnel pour l'évaluation post-forage du niveau d'aléa du projet « Les Sources 1 ». 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.

6.8 Dispositifs de caractérisation du réservoir

En plus du suivi microsismique, Lithium de France prévoit de réaliser des acquisitions de données de *diagraphies* en cours de forage afin de confirmer la présence d'un réseau de fractures naturelles et d'indices de perméabilité qui permettront notamment de mettre à jour les modèles géologiques et géomécaniques avant forage. A l'issue du forage, si les conditions géologiques sont réunies, des premiers *tests hydrauliques* seront réalisés afin d'évaluer les propriétés hydrauliques initiales du puits. Ces tests se feront par une augmentation lente et prudente du débit par paliers en suivant les recommandations décrits sur le « Guide de bonnes pratiques » des forages géothermiques profonds (Hamm et al., 2021¹⁹).

Une attention particulière sera apportée à :

- L'absence de paliers à forts débits de manière isolée,
- La réalisation de paliers d'une durée suffisante pour que la pression soit stabilisée ou décroisse,
- La réalisation de paliers à débits décroissants après les paliers croissants.

Un enregistrement de pression en continue sera effectué en fond de puits (ou au niveau du sabot) avec par exemple une sonde immergée, et en surface, comme recommandé dans Maury et al (2023)¹. La suppression du réservoir pour ce test ne devra pas dépasser le seuil de réactivation en cisaillement des failles. Si les propriétés hydrauliques initiales du puits ne sont pas considérées comme suffisantes, plusieurs types de développement sont envisagés parmi les *stimulations* chimiques, hydrauliques et thermiques. La construction de ce programme de stimulations dépendra des analyses géomécaniques et géologiques à partir des données acquises pendant le forage et des premiers tests hydrauliques. L'évaluation de :

- La pressurisation du réservoir,
- L'état de contrainte à l'échelle du puits,
- La confirmation du réseau naturelle de fractures recoupé,

permettra de valider le programme soumis. Lithium de France devra fournir cette évaluation *a minima* 1 semaine avant la réalisation des tests pour validation auprès des autorités compétentes.

¹⁹ Hamm, V., Bugarel, F., Giuglaris, E., Goyénèche, O., Gutierrez, A., 2021. Retours d'expérience sur les forages géothermiques profonds. (Rapport final No. BRGM/RP-65443-FR). BRGM.

Toutes les précautions environnementales et techniques adéquates seront déployées si ces stimulations venaient à être exécutées dans les puits et le protocole sera soumis en conséquence à la DREAL et à la préfecture une semaine avant les opérations. Il est à noter que les expériences du Fossé rhéna ont montré que la microsismicité déclenchée lors des stimulations hydrauliques peut être maîtrisée malgré un dépassement apparent du *seuil d'instabilité géomécanique*. En effet, plus de 1300 événements microsismiques ont été déclenchés lors des tests et stimulations de puits de l'exploitation de Rittershoffen, sans détection d'incident sismique ou de sismicité ressentie (Maurer et al., 2020²⁰). La stimulation thermique quant à elle a engendré de la microsismicité dans les projets du Fossé rhéna dans lesquels elle a été appliquée (Maurer et al.,), de bien moindre ampleur que lors des stimulations hydrauliques.

²⁰ 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.

6.9 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. 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 INERIS/BRGM. Ce type de système a été introduit par Bommer et al. (2006)²¹ 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 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 suivi sismologique en place.

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, 2006²²). 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)²³ 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 6.3 : Seuils du TLS proposés pour le projet « Les Sources 1 » 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 ≤ ML < 1.7 0.5 mm/s ≤ PGV < 1 mm/s	Ressenti de la population. 1.7 ≤ ML < 2.5 1 mm/s ≤ PGV < 5 mm/s	Premiers dommages superficiels. ML ≥ 2.5 PGV ≥ 5 mm/s
Protocoles	Système nominal. Pas de modifications 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

²¹ Bommer, J.J., Oates, S., Cepeda, J.M., Lindholm, C., Bird, J., Torres, R., Marroquín, G., Rivas, J., 2006. Control of hazard due to seismicity induced by a hot fractured rock geothermal project. Eng. Geol. 83, 287–306. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.11.002>

²² Bommer, J.J., Alarcon, J.E., 2006. The Prediction and Use of Peak Ground Velocity. J. Earthq. Eng. 10, 1–31. <https://doi.org/10.1142/S1363246906002463>

²³ Bommer, J.J., 2017. Predicting and monitoring ground motions induced by hydraulic fracturing (Report Commissioned by the Oil and Gas Authority.).

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.
- **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. 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 et l’arrêt progressifs 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 inconnus au stade avant forage 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 au cours du projet « Les Sources 1 » avec les données acquises et spécifiques au projet.

6.10 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 Rebecca Bolton de la compagnie CGG. 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)¹ et stipule en conclusions :

« Il est important de rappeler qu’une opération telle que proposée par le projet « Les Sources 1 » 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.

*En conclusion, et d’après les éléments qui nous ont été fournis (dans le mémoire technique et lors des réunions techniques du 26 octobre et 27 novembre 2023), **il apparaît que les travaux d’exploration et la description des opérations de monitoring et sur puits sont en général conformes aux attendus et bonnes pratiques.** Le projet présente un **aléa moyen (niveau 2)** d’incident sismique induit, et de nombreux évènements microsismiques sont attendus du fait de la nature du réservoir. Globalement, **les mesures que Lithium de France prévoit de mettre en œuvre afin de contrôler cette sismicité et de la garder en dessous d’un seuil acceptable suivent les bonnes pratiques et recommandations principales définies par Maury et al. (2023)**¹.*

Des recommandations additionnelles ont été formulées tout au long de ce rapport.

D’un point de vue général, le projet « Les Sources 1 » présente un aléa incident sismique induit moyen qui a été correctement identifié par Lithium de France. Lithium de France a prévu de mettre en place un protocole d’opérations qui, s’il est suivi, apparaît être en bonne cohérence avec une prévention et une mitigation efficace de cet aléa.

En complément de ces études et opérations prévues, Lithium de France a planifié la réalisation d’une branche exploratoire : ce projet mérite d’être salué. L’apport de connaissances nécessaire à une

2. NOTE DE PRESENTATION NON TECHNIQUE

compréhension holistique du système, notamment en termes de structure des zones de failles et perméabilité dans les formations sédimentaires, sera un plus évident non seulement pour ce projet, mais bien au-delà pour les projets dans des contextes analogues. »

L'ensemble des recommandations ont été prises en compte dans la version finale de l'étude et du projet « Les Sources 1 » 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 met un point d'honneur à acquérir dans le cadre du forage de ce premier doublet.

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, ...)

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 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 seront mis à jour continuellement durant la vie du projet à partir des nouvelles données acquises sur le projet « Les Sources 1 ». 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 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. Suite aux discussions engagées avec les autres opérateurs, les données permettant de caractériser l'état géomécanique de ce réservoir type XLOT (eXtended Leak Off Test, e.g. Zoback et al., 2003²⁴) 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 amélioration de la 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.

²⁴ 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>

8 PREVENTION DES RISQUES GENERAUX

Notre politique Santé Sécurité Environnement, effective pour le projet « Les Sources 1 », 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. 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 « LS1_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 « LS1_AE_006_Doc6_DUERP_V1 »

Lithium de France

16 rue des Couturières

67240 Bischwiller

contact@lithiumdefrance.com

