

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

4b.

Prévention de
la sismicité
induite

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

4b. Prévention de la sismicité induite

Référence interne	Rédacteur	Vérificateur	Approbateur
LS1_AE_004_Doc4b_V1	Ricardo Perez Jeanne Vidal Nicolas Wynants	Jérôme Jacquemont David Soubeyrand	Guillaume Borrel
LS1_AE_004_Doc4b_V2	Mise à jour du réseau de suivi microsismique		
LS1_AE_004_Doc4b_V3	Mise à jour Chapitre 1.5 sur la mise en place des stations de suivi microsismique à l'été 2024.		

Date	Destinataire	Organisme
12/08/2024	Mme la Préfète	Préfecture du Bas-Rhin
12/08/2024	Mme Jacquot	DREAL – Grand Est



TABLE DES MATIERES

1	Prévention de la sismicité induite.....	1
1.1	Sismicité naturelle	1
1.2	Sismicité induite	3
1.3	Prédiction de la sismicité induite à travers des simulations numériques géomécaniques.....	5
1.4	Bruit ambiant	5
1.5	Configuration du réseau sismique en fonction du forage, développement et exploitation.....	7
1.6	Evaluation de l'aléa sismique avant forage	13
1.7	Evaluation de l'aléa sismique post-forage	14
1.8	Dispositifs de caractérisation du réservoir	15
1.9	Protocoles opérationnels et systèmes de feux de signalisation (TLS).....	17
1.10	Conclusions du rapport d'expertise	18

TABLE DES FIGURES

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.....	3
Figure 6.2 : Séismes induits extraits des catalogues Rénass-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.....	4
Figure 6.3 : Position des WiNGs dans le ca Figure 1 : 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.dre de la campagne de mesure de bruit sismique réalisée en juin- juillet 2023 sur le PER Les Sources.....	6
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... 7	7
Figure 6.5 : Site de la station sismologique de surface GRD4 sur la commune de Betschdorf.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 6.6 : Distribution des stations sismologiques actuelles à proximité de la localisation envisagée pour l'exploitation géothermique, au sein de réseaux public et privés ainsi que des 6 stations prévisionnelles pour le projet Les Sources1.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 6.7 : Calcul de l'écart azimutal a) sans prendre en compte et b) en prenant en compte la station SZBH du réseau sismologique public RENASS. Seule la zone avec un écart azimutal inférieur à 120° est représentée.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 6.8 : Cartes de magnitude de complétude à différentes profondeurs, réalisées d'après les DSPs fournies par S ³	Erreur ! Signet non défini.
Figure 6.9 : Arbre de décision pour l'évaluation du niveau d'aléa d'un projet avant tout forage profond d'après Maury et al. (2023) ¹	13
Figure 6.10 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.....	15

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.....	2
Tableau 6.2 : Caractéristiques des séismes ayant les plus fortes vitesses au niveau du site.	4
Tableau 6.3 : Seuils du TLS proposés pour le projet « Les Sources 1 » avec les PGVs et les magnitudes estimés	17

1 PREVENTION DE LA SISMICITE INDUITE

1.1 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 SisFrance¹. Le plus important correspond au séisme de Bâle du 18 octobre 1356 qui causa plusieurs centaines de morts. L'intensité épiscopale 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., 2005²) 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)³).

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 RENASS⁴ et du BGR⁵. 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.

¹ <http://www.sisfrance.net>

² 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>

³ 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>

⁴ <https://renass.unistra.fr/fr/zones/>

⁵ <https://geoportal.bgr.de/mapapps/resources/apps/geoportal/>

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	-

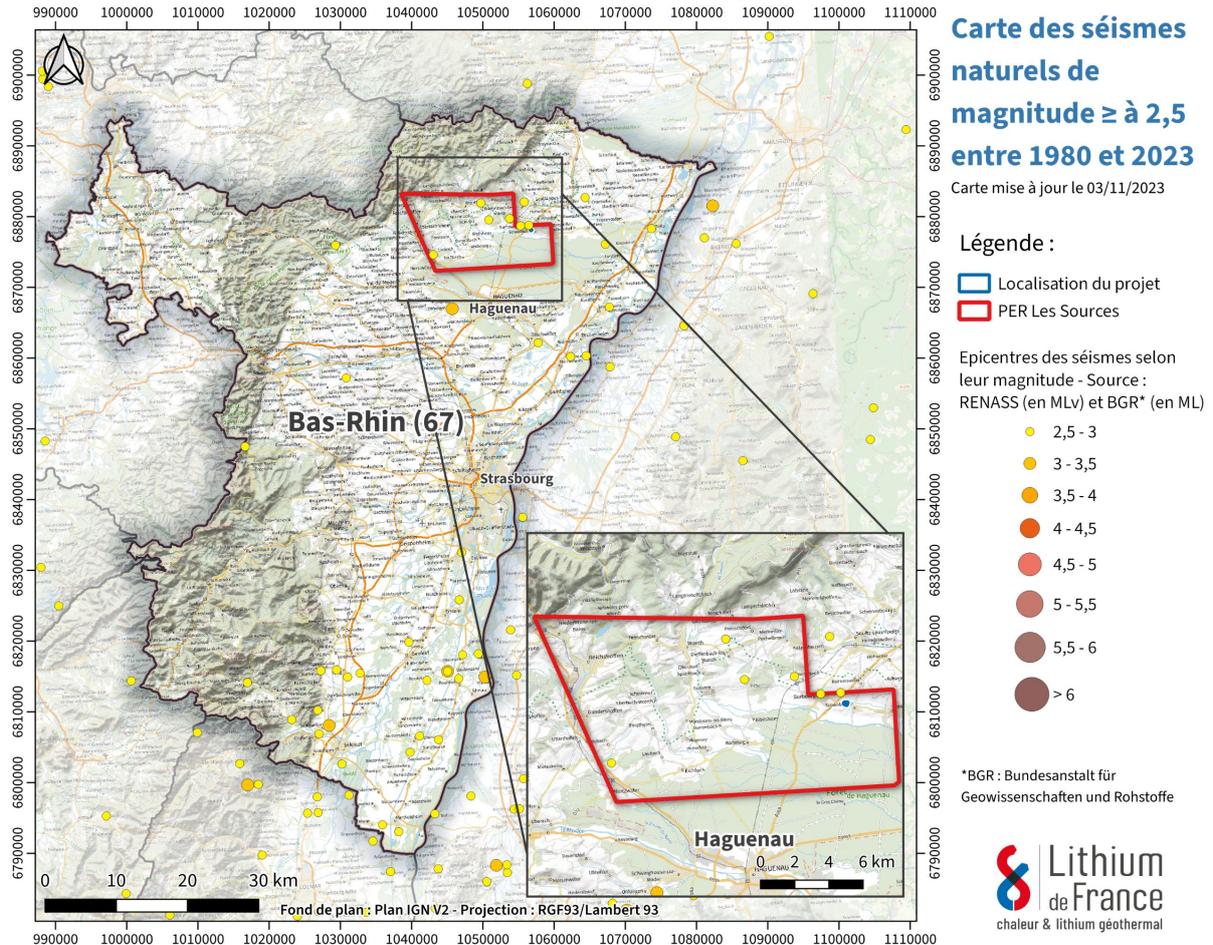


Figure 1.1 : Localisation des événements sismiques naturels de magnitude supérieure ou égale à 2.5 entre 1980 et 2023 dans le Bas-Rhin et ses environs.

1.2 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., 2021⁶).

⁶ 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 ».

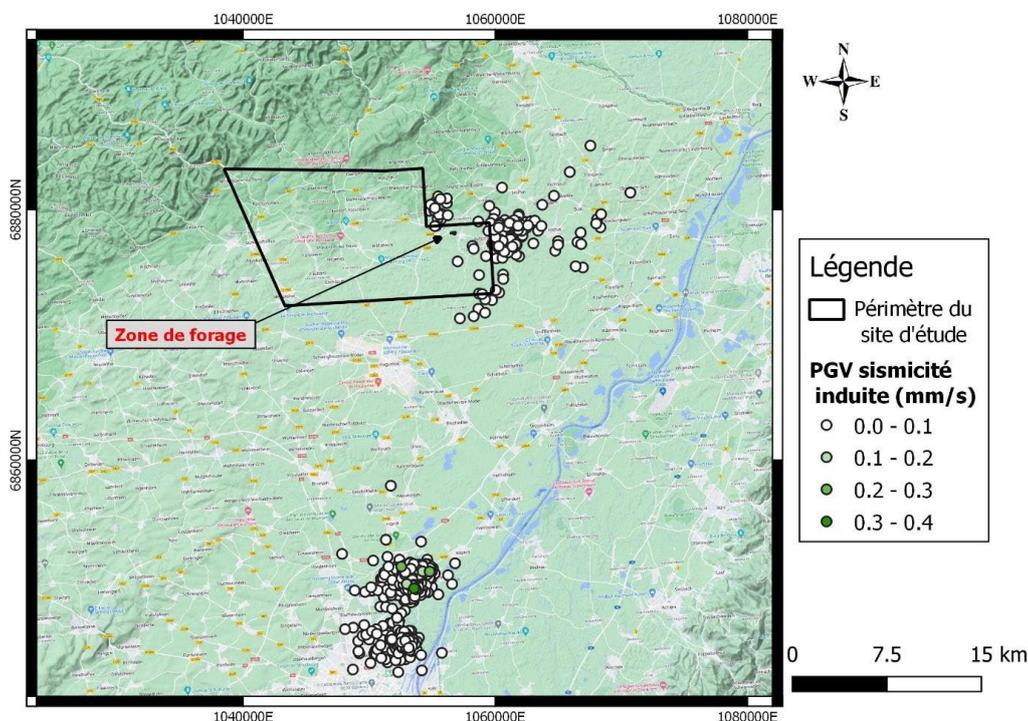


Figure 1.2 : Séismes induits extraits des catalogues Réness-LDG depuis 2012 jusqu'en 2023 autour du site et leur impact potentiel sur le site d'étude en termes de PGV. Les magnitudes de moment sont comprises entre 0.9 et 3.6.

1.3 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.

1.4 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 :

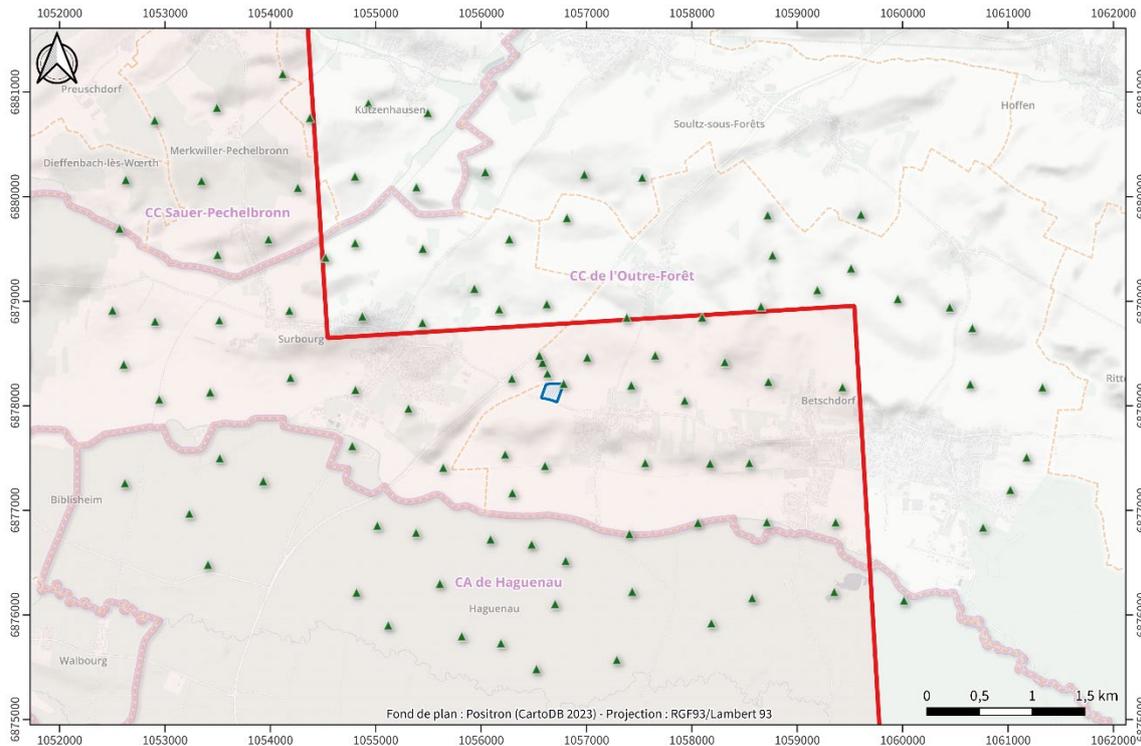
- D'une part, le calcul des *valeurs efficaces* du signal (ou RMS) de chaque station toutes les deux minutes pour 6 bandes de fréquences ;
- D'autre part, le calcul des *densités spectrales de puissance* (ou DSP) pour chaque station pour chaque heure d'acquisition.

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 6.3).

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

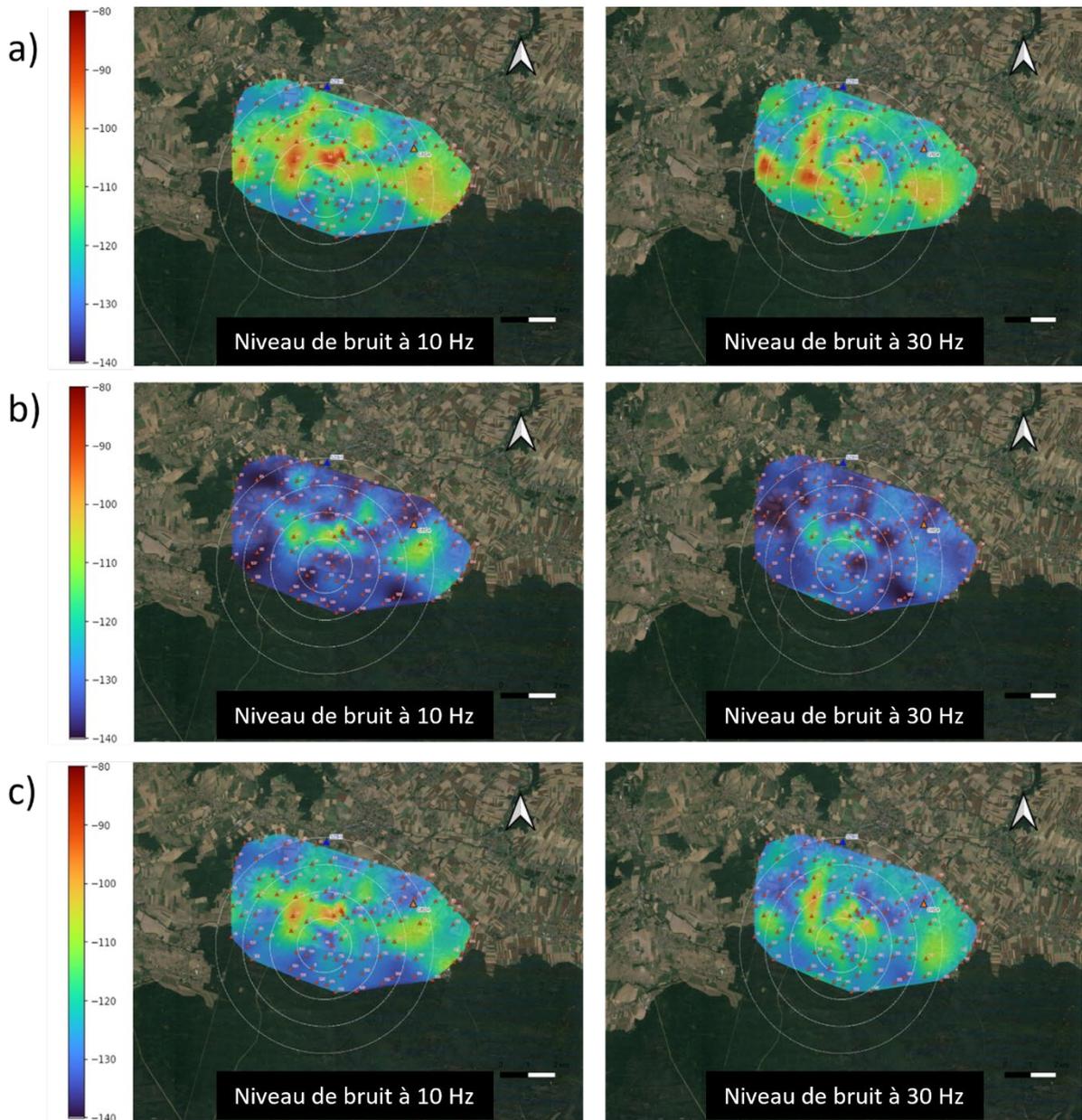


Figure 1.4 : Cartes du bruit à 10 Hz et 30 Hz pendant a) la période bruitée (en bleu sur les profils PSD), b) la période silencieuse (en rouge sur les profils PSD), c) la période intermédiaire (en vert sur les profils PSD). Les cercles sont centrés sur la coordonnée du fond du puits GS1B et sont espacés de 1.5 km.

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

Cette partie a été mise à jour en mai 2024.

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 évènements 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.

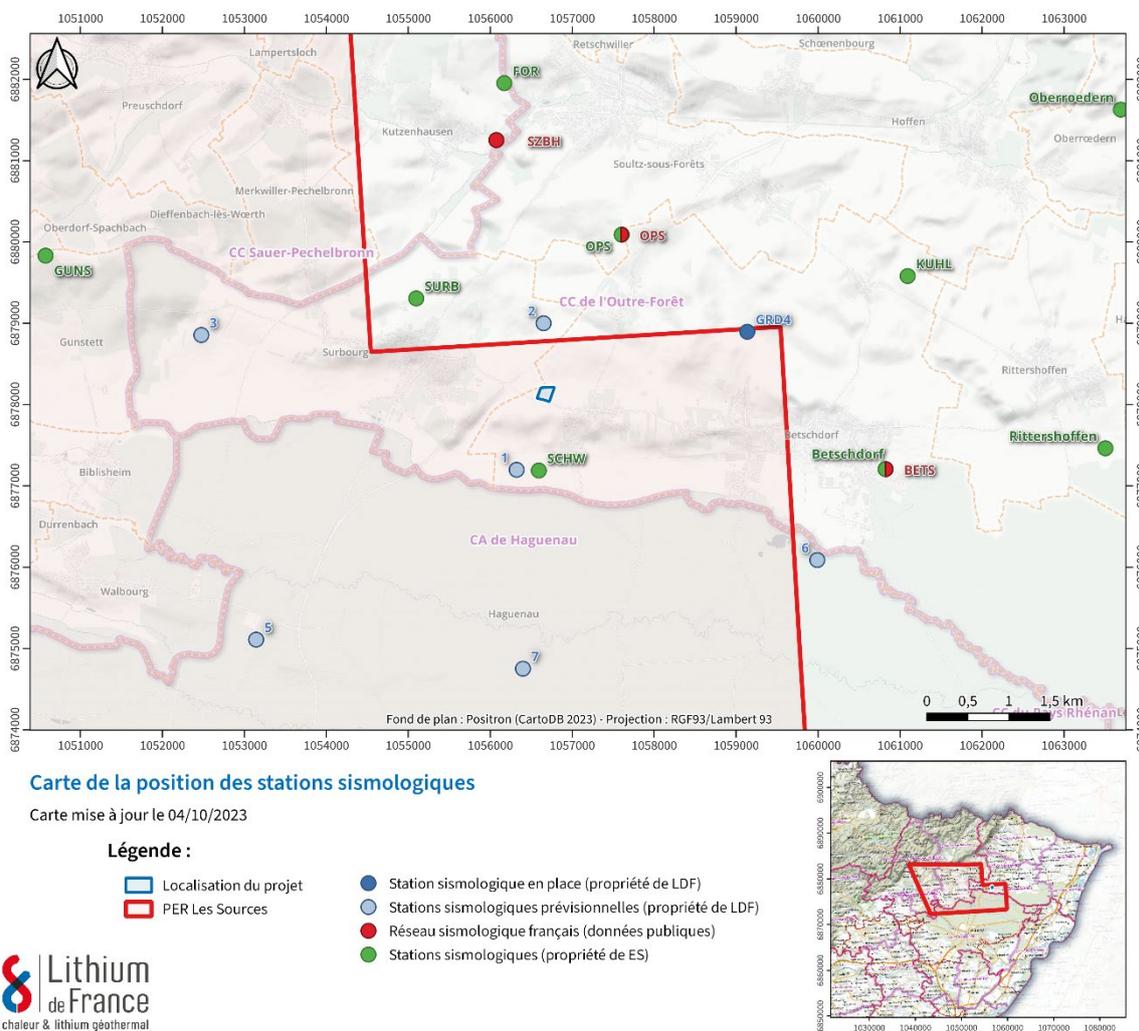


Figure 1.5 : Distribution des stations sismologiques en place et envisagées en 2023, à proximité de la localisation de surface du projet d'exploitation géothermique. Les stations installées appartiennent à des réseaux français public (Résif-Epos) et privé (ES : Electricité de Strasbourg). Sept stations 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.

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 évènements 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.

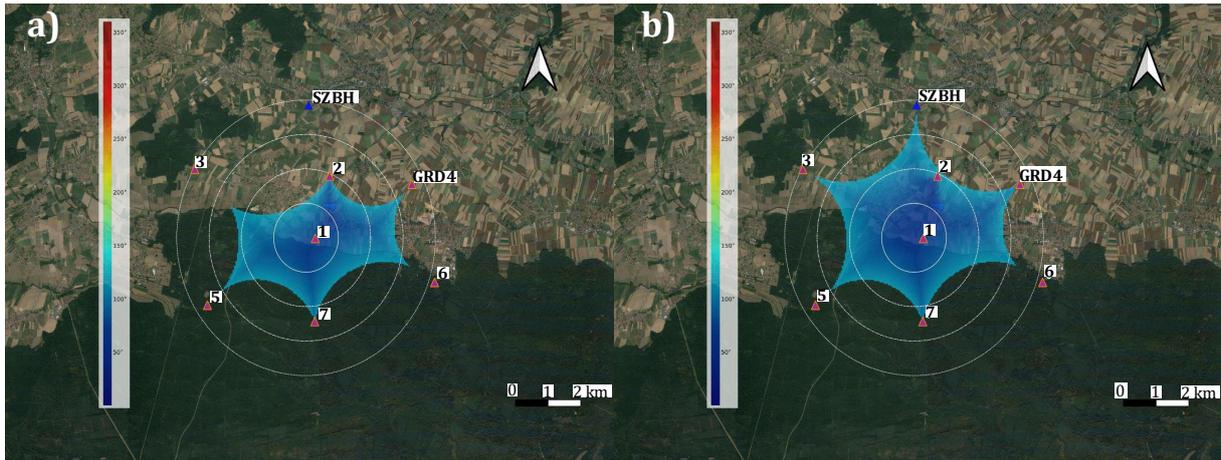


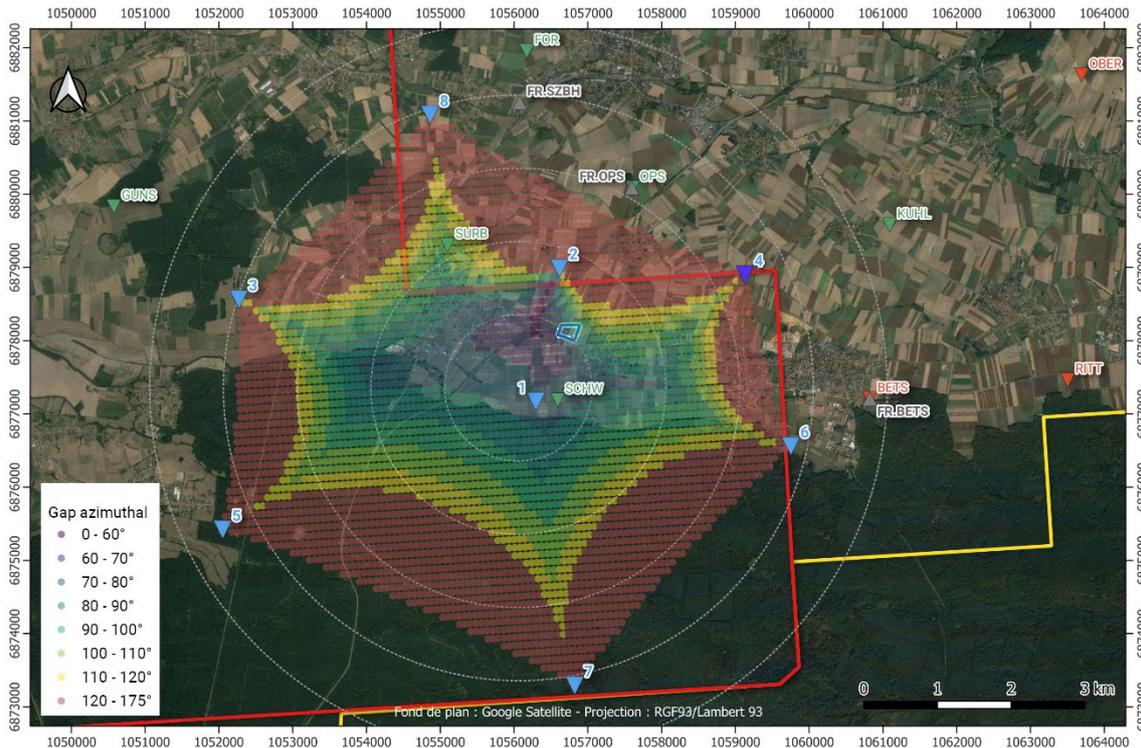
Figure 1.7 : Calcul de l'écart azimutal a) en considérant les 7 stations du réseau envisagée, et b) en prenant en compte la station SZBH du réseau public Résif-Epos. Seule la zone avec un écart azimutal inférieur à 120° est représentée. Les cercles concentriques autour de la cible sont affichés tous les kilomètres.

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



Figure 1.8 : Site de la station sismologique de surface GRD4 sur la commune de Betschdorf.

À la suite d'une question posée de la part de la préfecture 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 |
|---|---|

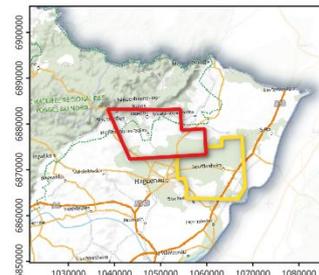
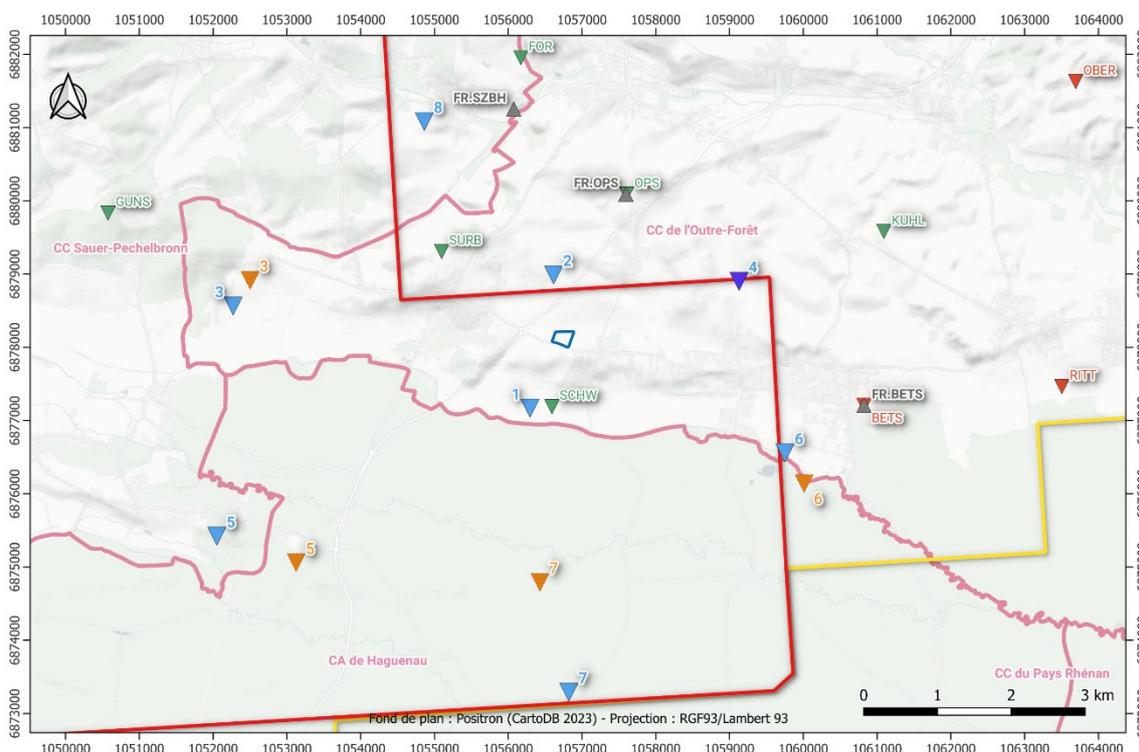


Figure 1.9 : Carte de la couverture azimutale associée aux huit stations sismologiques du réseau de surveillance microsismique de Lithium de France.

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

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

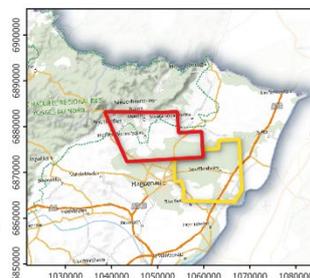


Figure 1.10 : Mise à jour des positions des stations sismologiques du réseau de surveillance microsismique de Lithium de France (LdF).

A l'été 2024, deux de ces 8 stations sismologiques en fond de puits, ont été placées jusqu'à 100 mètres de profondeur (stations n°1 et stations n°5). 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. Deux géophones ont été placés par ouvrage à environ 65 et 98 mètres de profondeurs et sont fonctionnels.

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 fin d'été 2024. Au 12 août 2024, seul la station n°7 n'a pas été installée. Les autres stations sont fonctionnelles à l'image de GRAD4. **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.**

1.6 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 dans 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 critiquelement 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.

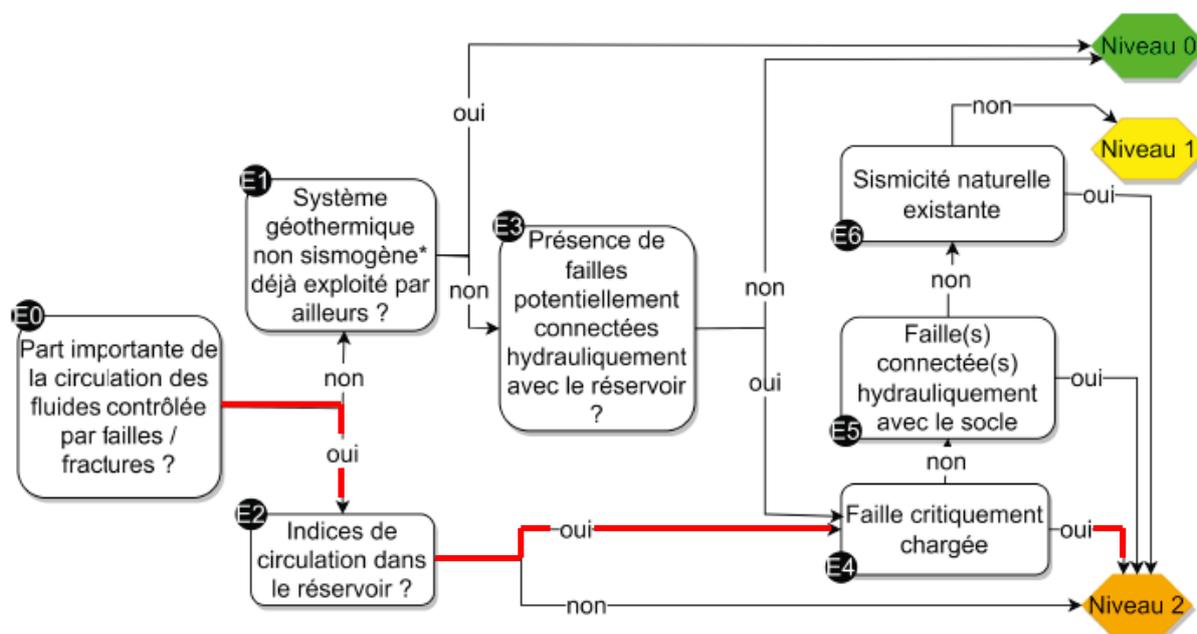


Figure 1.11 : Arbre de décision pour l'évaluation du niveau d'aléa d'un projet avant tout forage profond d'après Maury et al. (2023)¹.

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.

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

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

Figure 1.12 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.

1.8 Dispositifs de caractérisation du réservoir

En plus du suivi microsismique, Lithium de France prévoit de réaliser des acquisitions de données de *diagaphies* 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'issu 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., 2021⁷).

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.

⁷ Hamm, V., Bugarel, F., Giuglaris, E., Goyèneche, 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., 2020⁸). 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.

⁸ 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.

1.9 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)⁹ 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, 2006¹⁰). 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)¹¹ 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

⁹ 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>

¹⁰ 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>

¹¹ 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.

1.10 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

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.

Lithium de France

16 rue des Couturières

67240 Bischwiller

contact@lithiumdefrance.com

