

4



VULCAN ENERGY
ZERO CARBON LITHIUM™



VULCAN ENERGIE
ZERO CARBON LITHIUM™

*Demande d'octroi d'un Permis Exclusif de Recherches
de gîtes Géothermiques et toutes substances connexes
dit « Kachelhoffa »*

4.

Programme des études et travaux et engagement financier

Rédaction du document

Document	Date	Rédacteur	Vérificateur	Approbateur
4_VEF_PERG_KACHELHOFFA_PROGRAMME	27/02/2023	Alexandre RICHARD	Vincent LEDOUX PEDAILLES	Vincent LEDOUX PEDAILLES

Diffusion du document

Date	Destinataire	Organisme	Version numérique	Version papier
27/02/2023	Fabrice CANDIA Armelle BALIAN	Direction Générale de l'Énergie et du Climat	1	1
27/02/2023	Contact générique	Préfecture du Bas-Rhin	1	1
27/02/2023	Marc LITZENBURGER Émilie JACQUOT	Direction régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement	1	1

Vulcan Énergie France S.A.S.

84 route de Strasbourg

67500 Haguenau

info@v-er.eu

Table des matières

1	Description et pertinence des méthodes d'exploration	13
1.1	Les méthodes potentielles	13
1.1.1	Description des méthodes	13
1.1.2	Résultats obtenus	15
1.2	Les méthodes sismiques	19
1.2.1	Description de la méthode	19
1.2.2	Résultats obtenus	21
1.3	Les forages	25
1.3.1	Description de la méthode	25
1.3.2	Résultats obtenus	27
1.4	Les méthodes géologiques, minéralogiques et chimiques	30
1.4.1	Description de la méthode	30
1.4.2	Résultats obtenus	31
2	Stratégie d'exploration du périmètre sollicité	33
3	Mise en œuvre des méthodes potentielles	37
3.1	Description technique	37
3.2	Planning	40
3.3	Coût	41
4	Mise en œuvre du retraitement de la sismique 2D	43
4.1	Description technique	43
4.2	Planning	43
4.3	Coût	44
5	Mise en œuvre d'une sismique réflexion 3D	45
5.1	Description technique	45
5.2	Planning	61
5.3	Coût	63
6	Mise en œuvre d'un réseau de surveillance sismologique	65
6.1	Description technique	65
6.2	Planning	71
6.3	Coût	71
7	Mise en œuvre de forages de gradient	73
7.1	Description technique	73
7.2	Planning	76
7.3	Coût	78
8	Mise en œuvre d'un forage exploratoire profond	79

8.1	Description technique	79
8.2	Planning	79
8.3	Coût.....	80
9	Mise en œuvre des méthodes géologiques, minéralogiques, géochimiques	83
9.1	Description technique	83
9.2	Planning.....	85
9.3	Coût.....	86
10	Synthèse de la chronologie d'acquisition de données	87
11	Synthèse du coût de l'exploration	91
12	Engagement de Vulcan Énergie France	93
13	Bibliographie	95
14	Annexe 1 : lettre de confort	101

Table des illustrations

Figure 1 : Exemple d'un gravimètre	13
Figure 2 : Exemple d'équipements pour une campagne CSEM, à gauche une stations MT et à droite une station CSEM. (Source : (Darnet et al. 2021))	14
Figure 3 : Pseudotomographie filtrée pour des longueurs d'ondes supérieur à 60km. A droite, sont rajoutés les polygones de failles au toit du socle. En cyan, l'emprise sollicitée dans le cadre du PER Lithium dit les Cigognes. (Source : (Abdelfettah et al. 2020))	15
Figure 4 : Carte interprétative de l'anomalie de Bouguer au droit du périmètre sollicité. (Source : Lutz, 1999).....	15
Figure 5 : Résultat de l'inversion des données gravimétriques pour le réseau gravimétrique de Soultz-sous-Forêts (à gauche) avant la production et (à droite) après le début de la production. (Source : (Portier et al. 2018))	16
Figure 6 : Carte des anomalies du champ magnétique total au sol. La faible densité des stations (points) ne permet pas une interprétation aussi détaillée que pour la carte gravimétrique. (Source : Spreux (1971) et Edel (2002))	16
Figure 7 : (En haut) Localisation des stations MT et des points de mesures gravimétriques, (en bas) pseudo-section de la résistivité apparente. (Source : (Abdelfettah et al. 2019))	17
Figure 8 : Carte de localisation des campagnes successives de MT en 2019 et de CSEM/MT en 2020. (Source : (Neeb et al. 2020))	18
Figure 9 : Résultats des inversions pour la résistivité électrique à la suite de la campagne d'acquisition de 2019. (Source : (Neeb et al. 2020))	18
Figure 10 : Schéma simplifié du mécanisme de corrélation du bruit sismique. (Source : Modifié d'après (Snieder & Wapenaar 2010))	19
Figure 11 : (à gauche) Source sismique de type camion vibreur Mertz-26 d'une puissance de 276 kN (Source : (Richard et al. 2019)), (à droite) exemples de capteurs sismiques. (Source : Sercel)	19
Figure 12 : Tracé de rais sismiques dans le cadre d'une acquisition sismique 3D. (Source : (Rawlinson et al. 2010)).....	20
Figure 13 : Exemple d'une station sismologique de surveillance déployée dans le cadre du monitoring microsismique du projet de Rittershoffen. (Source : (Ravier et al. 2016))	20
Figure 14 : Carte de la variation spatiale de la vitesse des ondes S à une profondeur de 2.4km et section selon l'axe NO-SSE reliant les projets de Soultz-sous-Forêts et de Rittershoffen. (Source : (Lehuteur et al. 2018)).....	21
Figure 15 : Comparaison entre a) une coupe sismique issue des données sismiques vintage de 1984 et b) même section obtenue après une acquisition sismique 3D en 2018 et ayant suivi les traitements numériques avancés (PSDM). (Source : (Richard et al. 2020))	22
Figure 16 : Comparaison entre les failles au toit du socle identifiées par de la sismique vintage 2D (polygone noir) et celles identifiées sur un bloc 3D (en rouge). (Source : GeORG, (Salaun et al. 2020))	22
Figure 17 : (à gauche) Projection en surface de la localisation des évènements microsismiques induits durant les phases de développement des puits de Rittershoffen ainsi que quelques mécanismes au foyer associés, (à droite) coupe au droit des puits de Rittershoffen et représentation des microséismes détectés et localisés. (Source : (Maurer et al. 2020)).....	23
Figure 18 : Localisation des stations sismologiques du RéNaSS en Alsace du Sud. (Source : RéNaSS)	24
Figure 19 : Histogramme de la répartition des magnitudes des 164 séismes détectés au sein du périmètre sollicité. (Source : RéNaSS)	24
Figure 20 : Principe pour un forage géothermique de faible profondeur (<200m). (Source : Atlas-Fondations).....	25

Figure 21 : Identification spatiale des anomalies de température par le biais de forages de gradient dans l'Ouest de l'Islande. (Source : (Saemundsson 2008))	26
Figure 22 : Complétion des puits géothermiques du projet ECOGI à Rittershoffen. (Source : (Baujard et al. 2017)).....	26
Figure 23 : Dessin illustratif d'une plateforme de forage, du RIG et des équipements déployés. (Source : Électricité de Strasbourg)	27
Figure 24 : Localisation des 7 forages de gradient réalisés par Électricité de Strasbourg en Alsace du Nord. (Source : (Maurer et al. 2018))	27
Figure 25 : Profils de températures de 7 forages de gradient sur les 200 premiers mètres et leurs extrapolations jusqu'à la cible géothermale. (Source : (Maurer et al. 2018)).....	28
Figure 26 : Vue aérienne du site de forage du projet dit ECOGI (Rittershoffen) d'Électricité de Strasbourg.	29
Figure 27 : (à gauche) Schéma des différents types de réservoirs mis en production, (à droite) les différentes trajectoires de puits ayant permis d'atteindre les cibles géothermales. (Source : (Vidal 2017))	29
Figure 28 : Exemple d'affleurement sur carrière permettant des analyses structurales, géologiques et minéralogiques. (Source : (Aichholzer 2019)).....	30
Figure 29 : (à gauche) Exemple de lithostratigraphie sur les bords du fossé et le lieu des affleurements. (Source : (Düringer et al. 2016)). (à droite) Comparaison des études minéralogiques faites sur des carottages et des cuttings respectivement sur les projets de Soultz-sous-Forêts et Rittershoffen. (Source : (Glaas et al. 2019))	31
Figure 30 : Corrélation entre la coupe lithostratigraphique du forage Bellemagny et des données de sismique 2D vintage. (Source : Le Carlier de Veslud et al., 2005).....	32
Figure 31 : Composition des saumures géothermales des projets de Soultz-sous-Forêts et de Rittershoffen et évolution sur 2 années. (Source : (Mouchot et al. 2019))	32
Figure 32 : Carte des classes de températures au a) toit de la Grande Oolithe, b) du Muschelkalk, c) du Buntsandstein et d) du toit du socle. (Source : GeORG)	33
Figure 33 : En haut, localisation des forages présentant des données de température. En bas, répartition des gradients géothermiques observés au regard d'une régression linéaire à 5 °C/100 m.	34
Figure 34 : Zonage des sites à potentiel géothermique pour la déclinaison d'une campagne exploratoire.	35
Figure 35 : Pseudo-section de la résistivité apparente selon une ligne MT reliant Soultz-sous-Forêts à Rittershoffen. (Source : (Abdelfettah et al. 2019))	37
Figure 36 : Effet de la perméabilité et de la largeur de faille sur la taille des boucles de convection. (Source : Guillou-Frottier et al., 2020).....	38
Figure 37 : Design préliminaire pour l'acquisition de lignes CSEM.....	38
Figure 38 : Équipements d'acquisition des données électriques et magnétiques, respectivement une base dite ADU (à gauche) et une base RAU (à droite). (Source : (Darnet et al. 2021)).....	39
Figure 39 : Données météorologiques du Bas-Rhin concaténées de 1991 à 2021. (Source : climat-data.org)	40
Figure 40 : Planning de l'exploration par méthode potentielle CSEM et gravimétrie.....	40
Figure 41 : Sélection de lignes sismiques 2D vintage à retraiter afin de valider le positionnement des structures géologiques sur le périmètre du PER sollicité.	43
Figure 42 : Planning prévisionnel pour le retraitement de sismique 2D vintage.	44
Figure 43 : Schéma de la couverture azimutale dans le cadre d'une acquisition sismique marine. Le diagramme de rose permet d'identifier les angles couverts par les différents trajets des ondes dans le sous-sol (Source : (Amundsen & Landrø 2008))	45
Figure 44 : (à gauche) Dispositif d'écoute actif (point bleu) pour chaque salvo de tirs (en rouge). (à droite) Diagramme de Rose de la couverture azimutale en fonction de l'offset et du design	

d'acquisition, dit respectivement « narrow azimuth » (en haut) et « full azimuth » (en bas). (Source : (Xiao et al. 2014))	46
Figure 45 : Section sismique inline/crossline et attribut sismique "Cohérence" issuent d'un blo sismique 3D. (Source : (Xiao et al. 2014)).....	46
Figure 46 : Section sismique inline et attribut cohérence d'un cube de sismique 3D selon deux azimuts permettant de mettre en exergue l'importance de l'imagerie WAZ pour l'identification des failles. (Source :(Zhu et al. 2019)).....	47
Figure 47 : Définition de l'offset, distance séparant un point de tir d'un récepteur. (Source : SEG Wiki)	47
Figure 48 : Schéma des différentes marges nécessaire à l'obtention de qualité maximale d'imagerie pour une zone donnée. (Source : (Cameselle 2010)).....	48
Figure 49 : Carte de l'emprise d'acquisition (en bleu transparent) nécessaire pour l'imagerie maximale du centre du dispositif (en bleu foncé). Une zone tampon de 2 km, comprenant la montée en couverture et les marges de migrations, a été considérée.	48
Figure 50 : Emprise du périmètre d'exploration par sismique réflexion 3D au sein du PER sollicité.	49
Figure 51 : Usage des surfaces dans le périmètre de l'exploration sismique du PER sollicité. (Source : OSM)	49
Figure 52 : Exemple de dispositifs d'enregistrement des données sismiques. (Source : Sercel)	50
Figure 53 : Géométrie de déploiement des capteurs sismiques dans le cadre de l'exploration par sismique 3D.....	50
Figure 54 : a) Coupe en temps de l'acquisition sismique 3D en Alsace du Nord présentant le bruit issu d'un point de vibration et b) la modélisation permettant la soustraction dans les données. (Source : (Salaun et al. 2020))	51
Figure 55 : Géométrie d'acquisition orthogonal proposée dans le cadre de la sismique 3D mise en œuvre sur le périmètre de l'exploration.	51
Figure 56 : Schéma explicatif de la notion de bin en sismique réflexion. Il est défini par la demi longueur de l'inter-trace et de l'inter-PV soit dans le cas proposé 10mx10m. (Source : (Cameselle 2010))	52
Figure 57 : Positions théoriques des points vibrés au sein du périmètre exploré.	52
Figure 58 : Exemple de déport de PV de la position théorique vers une route.	53
Figure 59 : Carte des points de tirs (18 000) déportés sur les routes et chemins du périmètre d'acquisition.	53
Figure 60 : Carte des points de tirs (24 000) échantillonnés sur les routes et chemins du périmètre d'acquisition.	54
Figure 61 : Ensemble des sismiques 3D prévues sur l'emprise sollicitée.	55
Figure 62 : Description du workflow de traitement de la sismique 3D de 2018 en Alsace du Nord.(Source : (Richard et al. 2020))	56
Figure 63 : Imagerie comparative entre une section ne considérant que la contribution verticale du signal sismique (en haut) et une section considérant la composante transverse (en bas). (Source : (Thomas L. Davis, 2019)).....	57
Figure 64 : (à gauche) Schéma explicatif de l'orientation des 3 composantes d'un signal sismique (Source : British Geological Survey). (à droite) Exemple d'un capteur analogique 3 composantes (Source : Constructeur Pasi).....	57
Figure 65 : (A, B) Schéma simplifié de la technique Hoover consistant à utiliser 4 camions vibrateurs en déphasage afin de générer une onde transverse. (C) Mise en œuvre opérationnelle de cette technique lors d'une campagne d'exploration pour la géothermie en Autriche. (Source : (Schreilechner et al., 2017)).....	58
Figure 66 : Camion vibrateur de type MiniVib III équipé de la plaque mobile dédiée à l'émission d'ondes S. (Source : (Di Giulio et al., 2019)).....	59

Figure 67 : Mise en œuvre au Canada et en Hollande, ces sources sismiques enterrées ont permis le suivi de réservoir pétrolier en 4D et se trouve être des sources d'ondes S. (Source : (Cotton, 2019))	59
Figure 68 : Mise en œuvre d'une acquisition sismique 3D-3C au droit de la ville de Munich en Allemagne pour la sécurisation du développement de projets de géothermie profonde. (Source : (Wawerzinek et al., 2021))	60
Figure 69 : Traitement des données 3C de la campagne d'exploration de Munich avec la cartographie des variations du rapport de vitesses entre les ondes P et les ondes S. (Source : (Wawerzinek et al., 2021))	60
Figure 70 : Schéma simplifié des étapes pour lesquels une présence sur le terrain sera nécessaire. 1) Permettre afin d'obtenir les autorisations de passages. 2 et 3) Marquage des positions des récepteurs et déploiements des capteurs. 4) Arrivée des camions vibrateurs et début de l'acquisition des données. 5) Récupération des capteurs. (Source : Vulcan Énergie France)	62
Figure 71 : Planning prévisionnel pour la mise en œuvre de la sismique 3D de la zone 1.	63
Figure 72 : Capteur sismologique de type Raspberry Shake 3C pour un déploiement en intérieur et à but éducatif. (Source : raspberryshake.org)	65
Figure 73 : Capteur sismologique de type Raspberry Shake pour un déploiement en extérieur. (Source : raspberryshake.org)	66
Figure 74 : Exemple de travaux pédagogique autour du monitoring sismologique : construction du capteur, compréhension du phénomène physique, traitement et interprétation des résultats. (Source : raspberryshake.org)	66
Figure 75 : Carte localisant les capteurs de type Raspberry Shake en activité et publiquement accessible.	67
Figure 76 : Localisation des potentiels sites d'implantations des capteurs sismologiques pédagogiques.	67
Figure 77 : Impact du design du réseau de surveillance sur les incertitudes de localisation. (en bas à gauche) Localisation de 3 réseaux de monitoring comprenant respectivement 15, 16 et 41 stations. (à droite) Résultats des simulations numériques d'erreurs de localisation en fonction du réseau utilisé, respectivement de haut en bas pour 15, 16 et 41 stations. (Source : (Gaucher et al. 2016)).	68
Figure 78 : Exemple de stations temps-réel. A gauche pour le monitoring de la centrale de Rittershoffen (Source : (Ravier et al. 2016) et à droite pour le monitoring de la centrale d'Insheim (Source : (Küperkoch et al. 2016)).	69
Figure 79 : Principe de la méthode de corrélation entre un signal provoqué (cordon détonant) dont la position et temps d'occurrence sont connus et un signal microsismique. La sommation de la corrélation permet d'aboutir à une courbe dite de détection qui permet, au-delà d'un certain seuil, de détecter les évènements sismiques. (Source : (Rebel et al. 2011)).	69
Figure 80 : (à gauche) Carte de localisation absolue des évènements induits durant les stimulations des puits de la centrale de Rittershoffen et b) après relocalisation par méthode de corrélation par des « master event ». (Source : (Lengliné et al. 2017))	70
Figure 81 : Exemple d'utilisation de l'inversion du tenseur des moments afin de caractériser les mécanismes aux foyers des évènements microsismiques et les corréler aux paramètres de production. Il est en particulier possible de suivre la réponse mécanique du réservoir durant les stimulations. (Source : (Baig & Urbancic 2010))	70
Figure 82 : Planning prévisionnel du déploiement du réseau de surveillance sismologique sur le PER sollicité.	71
Figure 83 : (à gauche) Calcul du champ de température relatif dans un maillage de 10 x 5 km faisant apparaître des boucles de convection dans un modèle à couches géologiques homogènes (Source : (Magenet et al. 2014)), (à droite) correspondance entre des profils thermiques provenant des modélisations THM et les profils de températures observées dans les puits profonds de Soultz-sous-Forêts et Rittershoffen (Source : (Vallier et al. 2020)).	73

Figure 84 : Schéma présentant l'influence de la circulation préférentielle des saumures au sein des failles au regard des profils de températures, à savoir faible au droit du compartiment effondré, plus élevé au niveau du bloc redressé et enfin le plus fort au droit de la faille. (Source : (Maurer 2019))	74
Figure 85 : Maillage longitudinal le long des failles majeures identifiées par la sismique 2D vintage.	74
Figure 86 : Positionnement des forages de gradient au regard de la zone d'imagerie maximale obtenue par la sismique réflexion 3D.	75
Figure 87 : Krigeage sur la distance entre forages montrant la zone dans laquelle une estimation par interpolation sera la plus pertinente.	75
Figure 88 : Schéma de la mise en œuvre d'une mesure de température par le biais des thermomètres sans-fil. (Source : (Schüppler et al. 2021))	76
Figure 89 : Schéma de la mise en œuvre d'une mesure de température par le biais du déploiement d'une fibre optique et d'un interrogateur de type DTS. (Source : (Schüppler et al. 2021; Galgaro et al. 2018))	76
Figure 90 : Planning prévisionnel de la campagne de forages de gradient sur le PER sollicité.....	78
Figure 91 : Description des 2 RIG de forages de la filiale VERCANA du Groupe Vulcan.	79
Figure 92 : Planning prévisionnel pour le forage exploratoire profond.	80
Figure 93 : (à gauche) Caméra spectrale Specim SWIR 3 et (à droite) schéma du fonctionnement. (Source : (Savitri et al. 2021))	83
Figure 94 : Exemple de carottes du Muschelkalk et du Buntsandstein issues du forage exploratoire EPS-1 (Sultz-sous-Forêts). (Source : (Aichholzer et al. 2019))	83
Figure 95 : Schéma simplifié présentant le principe d'une acquisition de diagraphie au sein d'un puits profond. (Source : (Rasouli 2022))	84
Figure 96 : (à gauche) Dispositif de prélèvement in situ de saumure géothermale.(Source : (Hsieh et al. 2021)). (à droite) Dispositif de prélèvement en surface. (Source : (Arnórsson et al. 2006))	84
Figure 97 : Laboratoire de chimie du Groupe Vulcan basée à Karlsruhe.....	85
Figure 98 : Planning prévisionnel pour la mise en œuvre des méthodes d'exploration géologiques, minéralogiques et géochimiques.	85
Figure 99 : Synthèse du programme exploratoire qui sera mise en œuvre par Vulcan Énergie France.	87
Figure 100 : Schéma d'intégration des données multidisciplinaires et multi échelles composant un projet de géothermie profonde. (Source : (Mandiuc et al. 2018))	87
Figure 101 : Chronogramme de la campagne exploratoire de Vulcan Énergie France.....	89

Table des tableaux

Tableau 1 : Description de la géométrie d'acquisition de l'exploration par CSEM.....	39
Tableau 2 : Coût estimatif d'une acquisition CSEM et gravimétrie.	41
Tableau 3 : Description des coûts associés au retraitement et la réinterprétation de la sismique 2D vintage présente au sein du PER sollicité.	44
Tableau 4 : Description de la géométrie d'acquisition en termes de réception des données sismiques.	50
Tableau 5 : Comparaison de la géométrie d'acquisition proposée avec les paramètres sources et récepteurs de la sismique 3D acquise en Alsace du Nord. (Source : (Richard et al. 2019) et (Salaun et al. 2020)).....	55
Tableau 6 : Caractéristiques des acquisitions sismiques prévues sur le périmètre sollicité. *Ne prend en compte que les caractéristiques d'une acquisition limitée à la France.	56
Tableau 7 : Coût estimatif d'une acquisition sismique de haute définition pour la zone 1.	63
Tableau 8 : Coût estimatif des acquisition sismiques de haute définition pour toutes les zones d'intérêts du périmètre sollicité.	64
Tableau 9 : Coût estimatif du déploiement du réseau sismologique agile et pédagogique sur la base de 32 stations.....	71
Tableau 10 : Coût estimatif du déploiement du réseau sismologique temps-réel sur la base de 5 stations.	71
Tableau 11 : Coût estimatif de la calibration du réseau sismologique par un tir d'un cordon détonant dans le puits et du développement d'un algorithme industriel de traitement des données par corrélation.	72
Tableau 12 : Coût estimatif d'une campagne exploratoire pour 32 forages de gradient.	78
Tableau 13 : Coût estimatif de la mise en place de la plateforme et des éléments de sécurisation de la nappe phréatique.	80
Tableau 14 : Coût estimatif de la foration du premier puits exploratoire profond.....	81
Tableau 15 : Coût estimatif des méthodes permettant la qualification du réservoir géothermique (géologie, minéralogie, géochimie).	86
Tableau 16 : Synthèse des coûts du programme exploratoire proposé par Vulcan Énergie France. 91	

1 Description et pertinence des méthodes d'exploration

La technicité des projets de production des saumures géothermales profondes tient particulièrement au fait que les données nécessaires à l'identification du réservoir sont multidisciplinaires et multi-échelles. Comme d'ores et déjà présenté dans le Mémoire Technique et Justification des limites, l'Alsace a été le lieu de mise en œuvre depuis plusieurs décennies de nombreuses méthodes exploratoires permettant dès lors un retour d'expérience quant à la pertinence de chacune des méthodes. Ainsi, dans ce document seront présentés les méthodes ayant le plus d'intérêt pour l'exploration du gisement profond Alsacien et utilisant les technologies les plus récentes.

De manière synthétique on peut distinguer deux classes de méthodes exploratoires :

- Les méthodes passives dont font partie la gravimétrie, la magnétométrie, la méthode tellurique, etc.

Les méthodes passives consistent pour la plupart en la mesure de champs (champ de pesanteur, champ magnétique). Elles sont généralement les moins onéreuses car les sources sont d'origine naturelle, ce qui évite des dépenses supplémentaires et des contraintes liées à l'utilisation d'appareils d'émission.

- Les méthodes actives dont font partie les méthodes acoustiques et sismiques, les méthodes électriques, les méthodes électromagnétiques, etc.

Les méthodes actives ou provoquées sont plus lourdes que les méthodes passives, puisqu'elles doivent comprendre un dispositif d'émission en plus du dispositif de mesure : elles sont donc également plus coûteuses.

1.1 Les méthodes potentielles

1.1.1 Description des méthodes

Gravimétrie

Le champ de gravité est la résultante de deux forces :

- L'attraction universelle, directement en rapport avec la masse des corps (densité)
- La force centrifuge, due à la rotation de la Terre (maximale à l'équateur et nulle aux pôles)

La gravimétrie, technique permettant de détecter les variations de densité (selon la composition des terrains) à partir de la mesure de l'intensité du champ de gravité g (Figure 1) comparée à une valeur de référence, se base donc sur les Lois d'attraction universelle (Lois de Newton), le potentiel gravitationnel et le champ gravitationnel. Les valeurs du champ magnétique différentes de celle de référence sont appelées anomalies. Afin d'obtenir les variations du champ gravitationnel dues à des causes géologiques, il est nécessaire de corriger les mesures de toutes les autres causes extérieures pouvant les influencer (dérive de l'appareil, marée, ellipticité de la Terre, correction de la topographie, etc.)



Figure 1 : Exemple d'un gravimètre Autograv CG-5. (Source : Wikipédia)

Magnétisme et tellurisme

La Terre possède un champ magnétique pouvant être assimilé à un aimant droit (dipôle). Il existe des variations de la valeur du champ magnétique dues, par exemple, à la composition du sous-sol. Ces variations sont appelées anomalies magnétiques. La prospection magnétique est basée sur le champ magnétique et la susceptibilité magnétique des minéraux. La méthode consiste à chercher et localiser les roches, formations et gisements en se basant sur des anomalies magnétiques.

Une des méthodes la plus utilisée est celle qui mesure le champ magnétique total en un point. La valeur obtenue est soustraite de la valeur du champ magnétique de référence mesurée à une station de référence au même instant. Cette différence est le reflet de la déformation des lignes de champ au point de mesure (la déformation de ces lignes de champ étant due à la présence de failles, de filons, de minéraux magnétiques, de bassins, de corps magnétiques, etc.). Le plus souvent, on utilise deux magnétomètres synchronisés, l'un étant fixé à la station de référence, l'autre se déplaçant avec l'opérateur selon les profils. Les mesures sont prises avec un pas préalablement choisi en fonction de la taille de l'anomalie recherchée (allant du simple objet aux formations géologiques).

Il existe des courants électriques naturels dans le sous-sol, dus à des réactions physicochimiques se produisant en profondeur. C'est au voisinage de certains minéraux (minerais, sulfures de cuivre, pyrite, graphite...), présentant la double propriété d'être bons conducteurs d'électricité et oxydables par les eaux de pluie, que se développent ces courants.

Pour mesurer les différences de potentiel, 2 électrodes, un câble et un voltmètre suffisent théoriquement ; il existe alors deux façons de procéder :

- La méthode des potentiels : une électrode est fixe en une base, l'autre est déplacée tout autour en différentes stations. Quand on a terminé d'exploiter une base on en prend une autre, on trace alors des cartes de potentiel.
- La distance entre deux électrodes est constante et c'est l'ensemble du dispositif que l'on déplace sur un profil, l'électrode de fin du dispositif prenant la place de l'électrode de tête du dispositif précédent ; on trace alors des profils de polarisation spontanée.

CSEM (Controlled-Source Electro Magnetic)

La méthode du CSEM utilise le champ électromagnétique transmise dans le sous-sol par une source contrôlée (généralement un dipôle électrique de grande puissance) et mesuré à différents endroits à l'aide de récepteurs électromagnétiques (Figure 2) pour ensuite calculer les variations de résistivité du sous-sol. Les objectifs de l'utilisation du CSEM sont similaires à ceux de la méthode magnétotellurique, à la différence que le CSEM est beaucoup moins sensible aux sources externes de bruit électromagnétique (par exemple, les zones industrialisées), à la variabilité de la source électromagnétique (modification de l'activité solaire) et permet une imagerie plus en profondeur. Il est donc bien adapté à l'exploration des saumures géothermales en milieu péri-urbain.



Figure 2 : Exemple d'équipements pour une campagne CSEM, à gauche une stations MT et à droite une station CSEM. (Source : (Darnet et al. 2021))

1.1.2 Résultats obtenus

Gravimétrie

En Alsace, que ce soit au Nord (Figure 3) ou au Sud (Figure 4), de nombreuses campagnes d'acquisitions de données gravimétriques ont eues lieu, respectivement en 1972, en 2013 et enfin en 2016. La dernière campagne a fourni les données les plus denses sur le secteur et les données les plus précises qui ont pu aboutir à des résultats d'une résolution suffisante pour les comparer avec ceux des méthodes sismiques en ce qui concerne les structures géologiques identifiées (Figure 3). De récents résultats laissent également à penser que l'outil gravimétrique permettrait d'assurer une surveillance ou une cartographie des zones de circulation car ayant mis en évidence la sensibilité du dispositif lors des phases d'arrêt / reprise des centrales géothermiques (Figure 5).

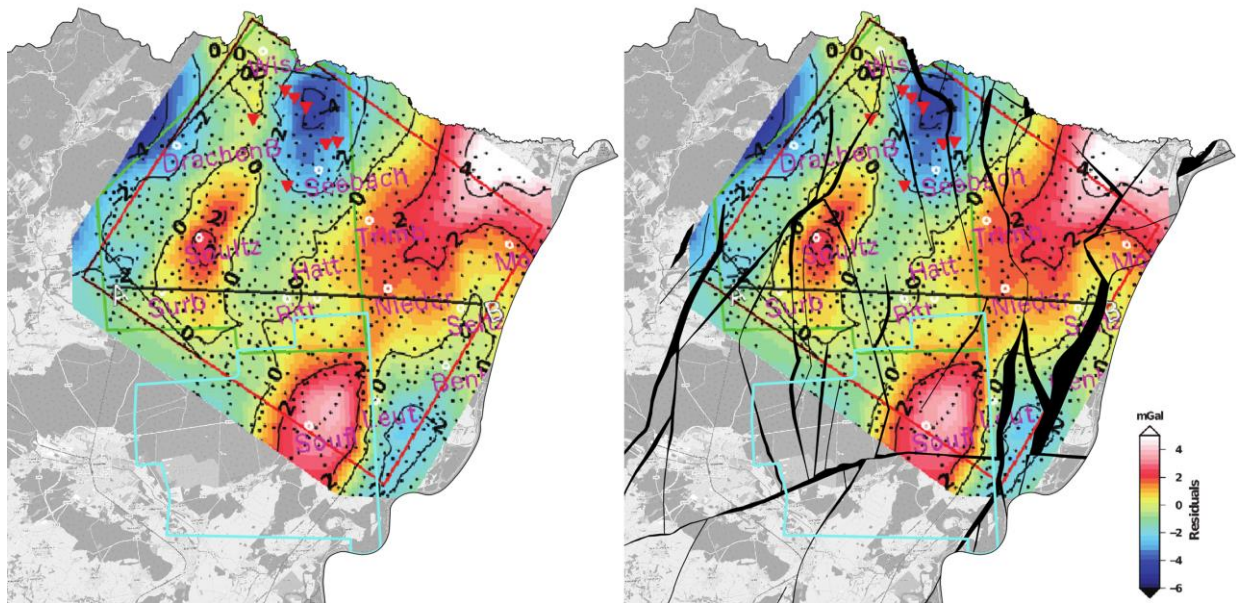


Figure 3 : Pseudotomographie filtrée pour des longueurs d'ondes supérieures à 60km. À droite, sont rajoutés les polygones de failles au toit du socle. En cyan, l'emprise sollicitée dans le cadre du PER Lithium dit les Cigognes. (Source : (Abdelfettah et al. 2020))

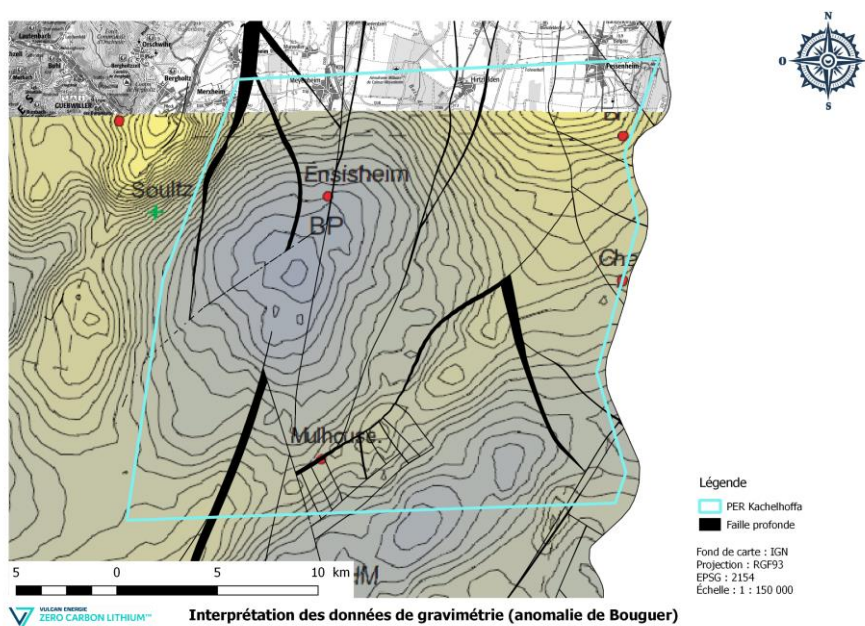


Figure 4 : Carte interprétative de l'anomalie de Bouguer au droit du périmètre sollicité. (Source : Lutz, 1999)

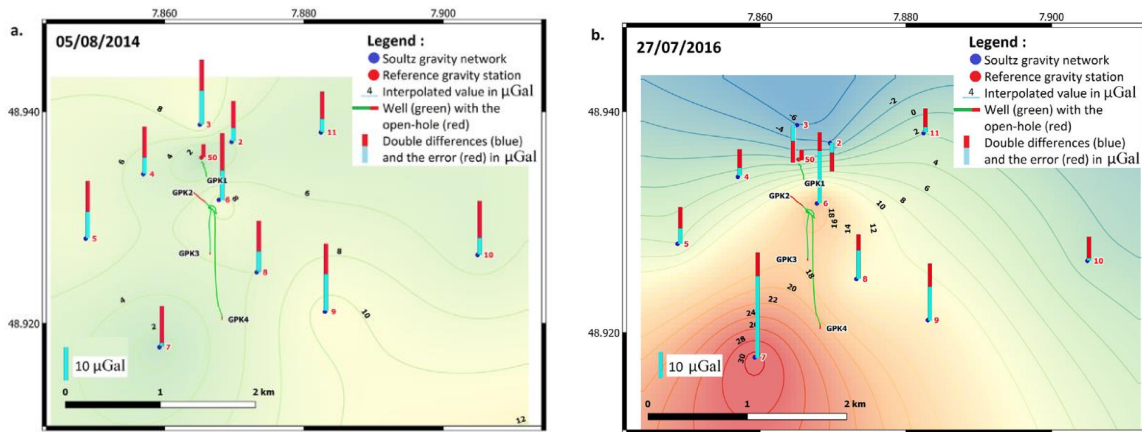


Figure 5 : Résultat de l'inversion des données gravimétriques pour le réseau gravimétrique de Soutz-sous-Forêts (à gauche) avant la production et (à droite) après le début de la production. (Source : (Portier et al. 2018))

Cette méthode potentielle, initialement dévolue à la caractérisation large maille des structures géologiques et de la possible composition des couches géologiques sous-jacentes en termes de densité, peu également avoir un intérêt dans le cadre d'un suivi proche des zones de circulation de saumures.

Le programme exploratoire comprendra une composante gravimétrique afin d'acquérir des données plus précises car bénéficiant des améliorations techniques quant à la mesure du champ de pesanteur.

Magnétisme et tellurisme

La région de Mulhouse a bénéficié d'acquisition de type magnéto-tellurique mais par le biais d'un nombre restreint de points de mesures (Figure 6).

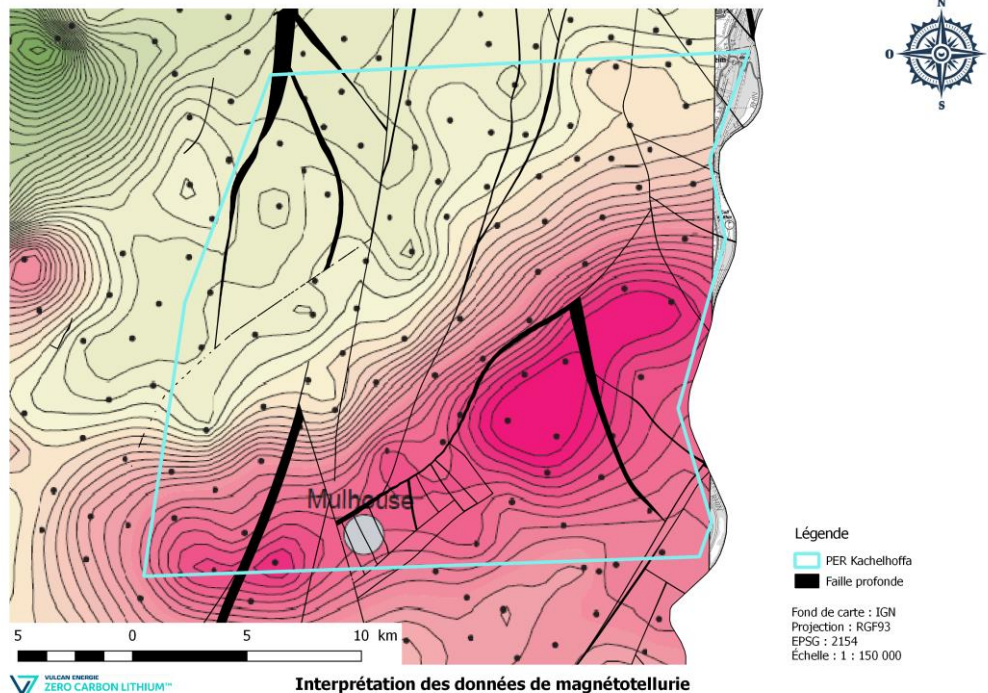


Figure 6 : Carte des anomalies du champ magnétique total au sol. La faible densité des stations (points) ne permet pas une interprétation aussi détaillée que pour la carte gravimétrique. (Source : Spreux (1971) et Edel (2002))

Cependant, une zone encadrant les projets de géothermie profonde de Soultz-sous-Forêts et de Rittershoffen a fait l'objet d'un profil MT d'une longueur d'environ 15 km (Figure 7 image du haut). L'interprétation des données a mis en évidence la capacité de cette méthode à identifier des accidents géologiques majeurs (failles) ainsi qu'une variabilité de la résistivité apparente permettant éventuellement de localiser les zones les plus perméables (Figure 7 image du bas).

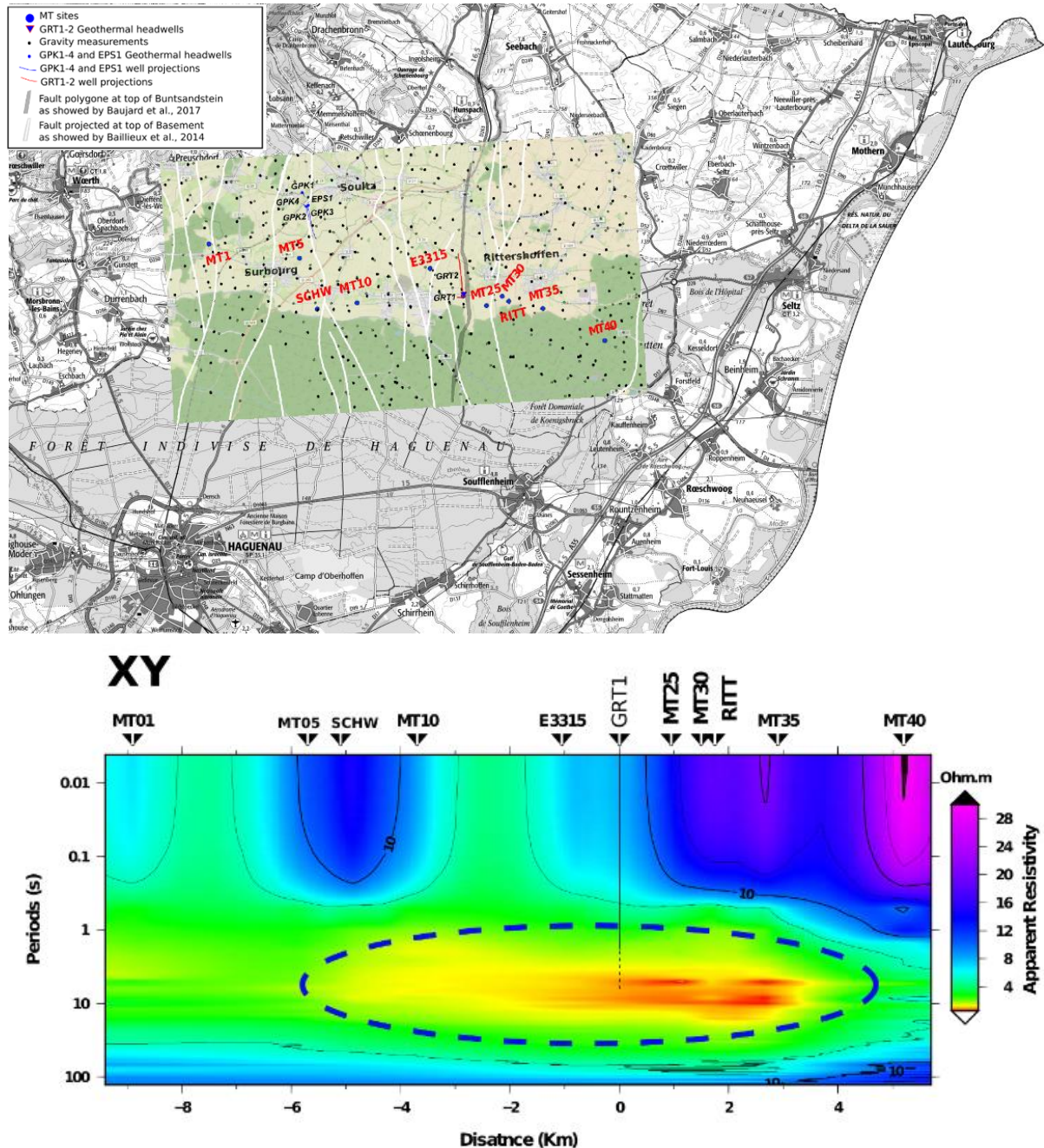


Figure 7 : (En haut) Localisation des stations MT et des points de mesures gravimétriques, (en bas) pseudo-section de la résistivité apparente. (Source : (Abdelfettah et al. 2019))

Cette méthode a permis de mettre en évidence les boucles de convections et des indications quant à la localisation du réservoir. Elle sera donc mise en œuvre dans le cas de la campagne exploratoire architecturée par Vulcan Energie France.

CSEM (Controlled-Source Electro Magnetic)

Au regard des résultats de la méthode MT (Figure 7 et Figure 9), le projet DEEP-EM, piloté en particulier par le BRGM, avait pour objectif d'apporter des éléments de confirmation quant à la pertinence de cette méthode. En effet, ce projet a pu acquérir en 2020 des données de types CSEM/MT sous un design 3D (Figure 8). Les résultats de cette campagne exploratoire n'ont pas encore tous été publiés.

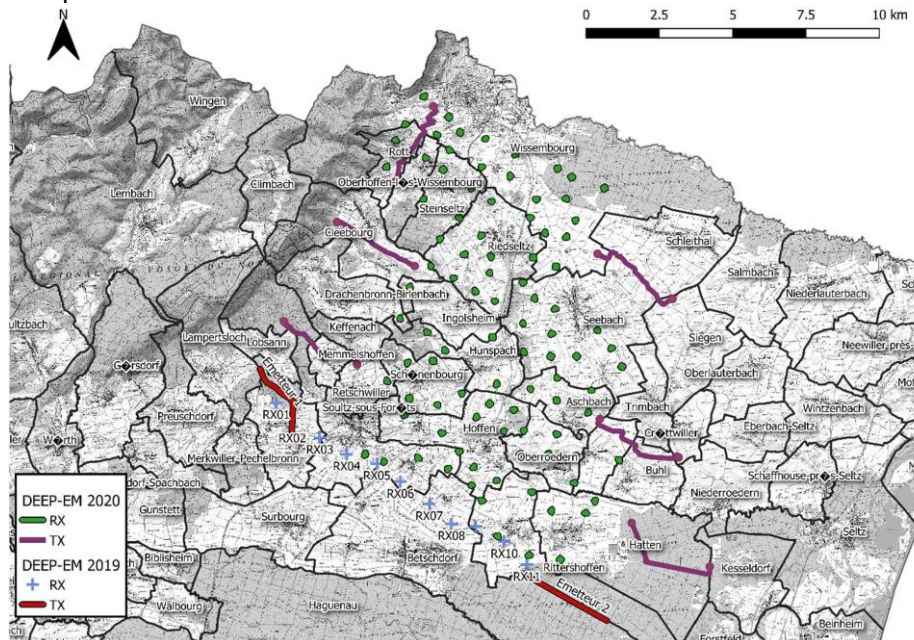


Figure 8 : Carte de localisation des campagnes successives de MT en 2019 et de CSEM/MT en 2020. (Source : (Neeb et al. 2020))

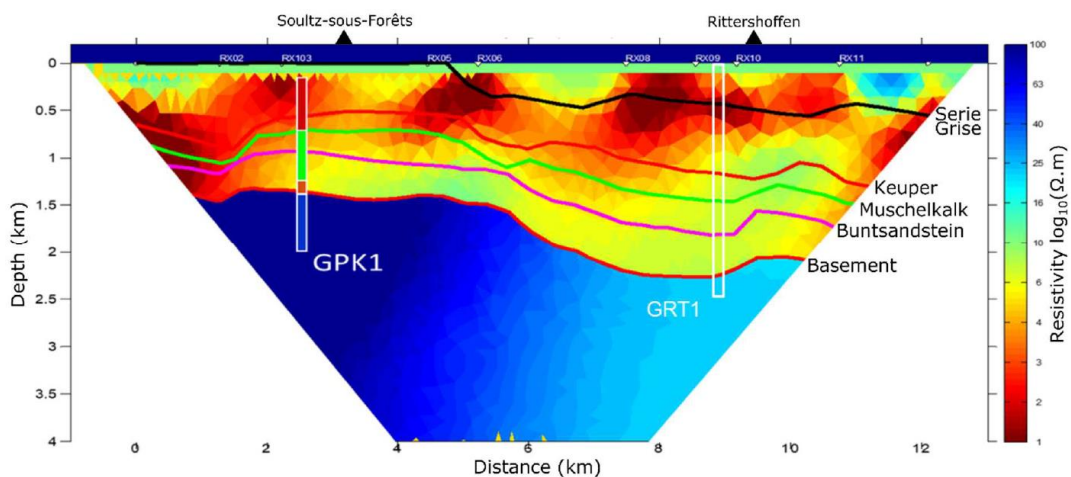


Figure 9 : Résultats des inversions pour la résistivité électrique à la suite de la campagne d'acquisition de 2019. (Source : (Neeb et al. 2020))

Le CSEM, malgré sa que trop récente mise en œuvre en Alsace, apparaît une méthode d'exploration pertinente et apportant une vraie plus-value afin d'identifier les zones de circulation de fluides.

Afin d'acquérir des données complémentaires et pertinentes pour l'identification du réservoir géothermique, Vulcan Energie France mettra en œuvre une large campagne de CSEM 2D/3D intégrant également des mesures gravimétriques et des profils MT afin de permettre la combinaison des mesures et la possibilité d'une inversion conjointe des données.

1.2 Les méthodes sismiques

1.2.1 Description de la méthode

Corrélation de bruit

Les méthodes dites de sismique passive reposent sur l'utilisation du bruit sismique ambiant continu et répétable. Se faisant, il est possible d'utiliser la redondance d'informations acquises sur des jours, des mois voire des années et d'en extraire des propriétés sur les milieux à travers lesquels les ondes se sont propagées (Source : (Lehuteur 2015)).

Par exemple, considérons un milieu arbitraire avec des sources de bruit (rouge) dans son sous-sol et deux géophones à sa surface libre. Ces sources de bruit envoient des ondes qui atteignent les géophones directement ou après réflexion sur les discontinuités des horizons géologiques (à gauche sur Figure 10). La corrélation des signaux enregistrés par les deux géophones engendre le même signal que celui qui aurait été enregistré par l'un des géophones et provenant d'une source positionnée au droit du second (à droite sur Figure 10).

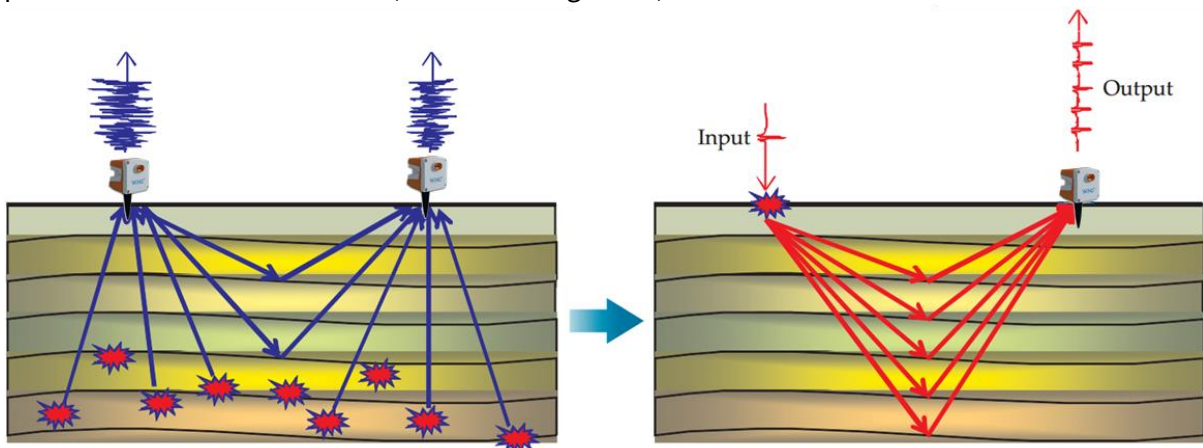


Figure 10 : Schéma simplifié du mécanisme de corrélation du bruit sismique. (Source : Modifié d'après (Snieder & Wapenaar 2010))

Sismique réflexion 2D / 3D

L'acquisition des données sismiques regroupe l'émission (source sismique), la propagation, la réception (récepteur sismique) et l'enregistrement des signaux sismiques (Figure 11).

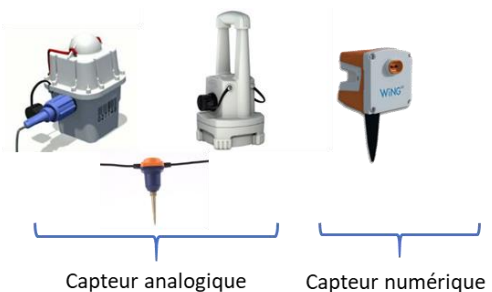


Figure 11 : (à gauche) Source sismique de type camion vibreur Mertz-26 d'une puissance de 276 kN (Source : (Richard et al. 2019)), (à droite) exemples de capteurs sismiques. (Source : Sercel)

Lorsque les ondes sismiques incidentes issues d'une source sismique atteignent une surface de discontinuité séparant deux milieux géologiques de natures différentes, elles seront partiellement

réfléchies et partiellement réfractées. Dans le cas du phénomène de réflexion, en atteignant un point de la surface de séparation de deux milieux de différentes impédances acoustiques, l'onde incidente subit une déviation (retour vers le haut) des rayons sismiques avec un angle de l'onde réfléchie égal à l'angle d'incidence (Figure 12).

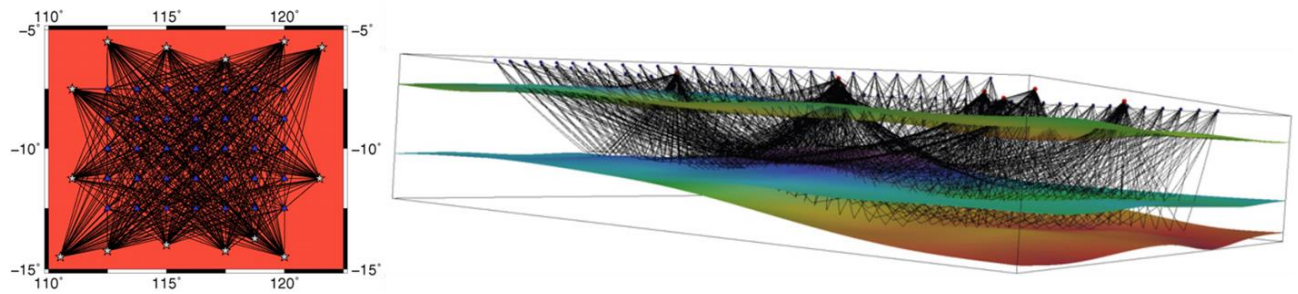


Figure 12 : Tracé de rais sismiques dans le cadre d'une acquisition sismique 3D. (Source : (Rawlinson et al. 2010))

Surveillance sismologique

Dans le cadre du développement de projet de géothermie profonde en milieu faillé, l'occurrence d'une microsismicité induite a été constatée dans tous les projets. Cette microsismicité peut être observée de manière naturelle avant même le début d'un projet et de manière induite durant la phase de forage en raison de l'injection des boues de forage servant à maintenir la stabilité du puits et la remonté des cuttings, durant les phases de développement du puits servant à améliorer la connectivité de l'ouvrage avec le réservoir et enfin durant la circulation en boucle fermée de l'exploitation. Ainsi, un dispositif d'écoute et de surveillance sismologique est déployé sur le terrain avant toutes opérations afin d'établir un état de référence de la sismicité au droit du projet et d'être en mesure de détecter et de localiser des évènements sismiques de très faibles magnitudes.



Figure 13 : Exemple d'une station sismologique de surveillance déployée dans le cadre du monitoring microsismique du projet de Rittershoffen. (Source : (Ravier et al. 2016))

1.2.2 Résultats obtenus

Corrélation de bruit

En Alsace du Nord, le projet EstOf ((Lehuteur et al. 2018)) consistant à déployer plusieurs centaines de capteurs sismologiques, a permis de mettre en exergue la capacité de cette méthode d'acquisition de données passives à recueillir des informations sur des paramètres important du sous-sol. En particulier, la variation spatiale de la vitesse des ondes S (Figure 14) permettrait d'identifier des zones favorables pour le développement de projet de géothermie. Ces données seraient à comparer avec les aspects structuraux qui apparaissent lors de l'interprétation des données de sismique réflexion (Figure 16).

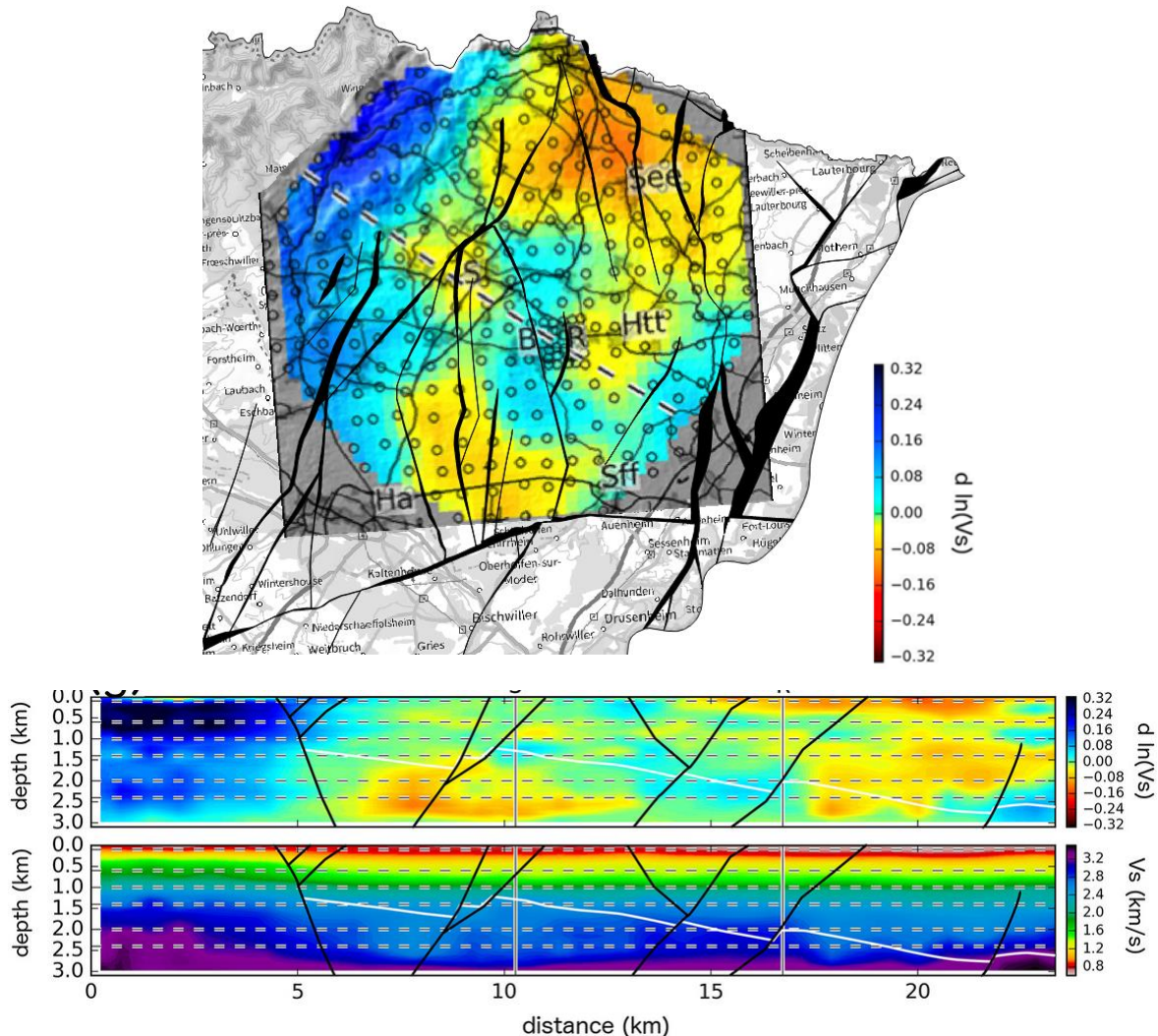


Figure 14 : Carte de la variation spatiale de la vitesse des ondes S à une profondeur de 2.4km et section selon l'axe NO-SSE reliant les projets de Soultz-sous-Forêts et de Rittershoffen. (Source : (Lehuteur et al. 2018))

La corrélation de bruit sismique permet donc d'identifier de possible anomalies de vitesses corrélées à la présence de saumures géothermales revêtant donc un intérêt dans le cadre de l'exploration.

Dans le cadre d'un déploiement assez dense de capteurs sismologiques utilisés dans le cadre du monitoring de la sismicité induite, la mise en œuvre de la méthode de corrélation de bruit sismique pourra être aisément mise en œuvre.

Sismique réflexion 2D / 3D

Mise en œuvre depuis des décennies, la sismique réflexion 2D permet d'établir une première image du sous-sol à large maille. En Alsace du Nord, la première campagne d'acquisition d'un bloc de sismique réflexion 3D (Source : (Richard et al. 2020)) a permis de mettre en évidence la pertinence de cette méthode qui apporte, via sa résolution sans égale au regard des autres méthodes exploratoires, une vision précise à la fois de la profondeur des couches géologiques mais également des structures géologiques sur la zone d'intérêt (Figure 15 et Figure 16).

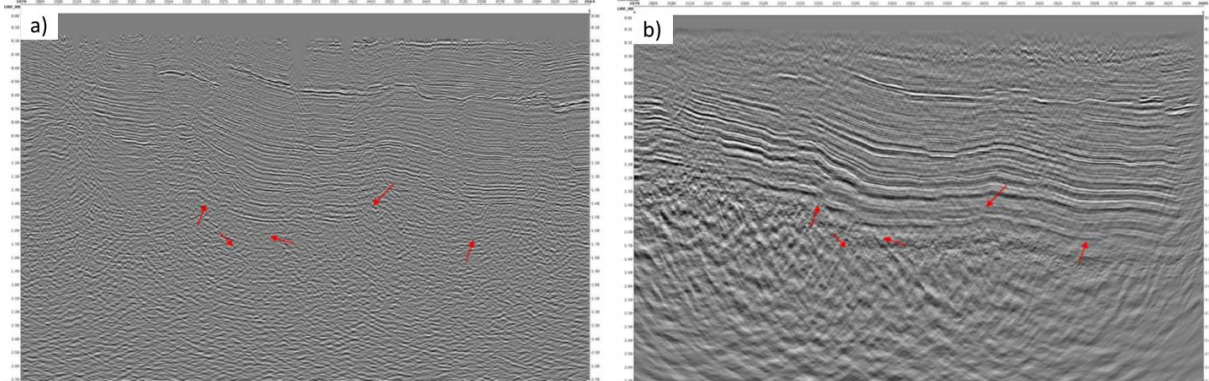


Figure 15 : Comparaison entre a) une coupe sismique issue des données sismiques vintage de 1984 et b) même section obtenue après une acquisition sismique 3D en 2018 et ayant suivi les traitements numériques avancés (PSDM). (Source : (Richard et al. 2020))

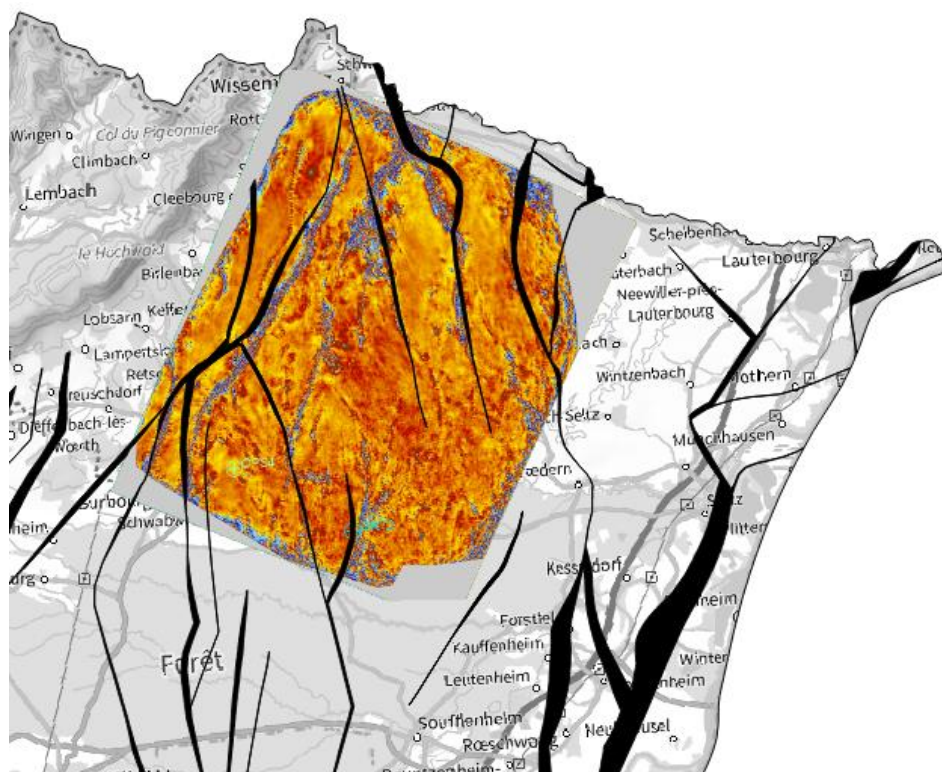


Figure 16 : Comparaison entre les failles au toit du socle identifiées par de la sismique vintage 2D (polygone noir) et celles identifiées sur un bloc 3D (en rouge). (Source : GeORG, (Salaun et al. 2020))

La sismique réflexion 3D apparaît comme un outil indispensable à la caractérisation de la cible géothermale et sera naturellement mise en œuvre dans le cadre du programme exploratoire. Par ailleurs, le retraitement d'anciennes lignes de sismiques 2D sera également considéré afin d'être utilisé dans le cadre de la phase de design de la sismique 3D.

Surveillance sismologique

Les réseaux d'Alsace du Nord, comprenant des stations sismologiques du Réseau National de Surveillance Sismologique (RéNaSS), du GEIE (projet géothermique de Soultz-sous-Forêts) et d'ECOGI (projet géothermique de Rittershoffen), ont permis d'assurer un suivi des opérations géothermiques depuis plusieurs années. Ces réseaux ont en particulier pu suivre les séismes induits durant les phases de stimulations des puits (Figure 17) et s'assurer que les magnitudes et PGV (Peak Ground Velocity) des différents événements demeuraient en-dessous des limites prescrites dans les arrêtés préfectoraux. Le monitoring de la sismicité naturelle permet également d'identifier de possible failles affectées par une circulation de fluides géothermaux et donc représentant des cibles pour de futurs ouvrages.

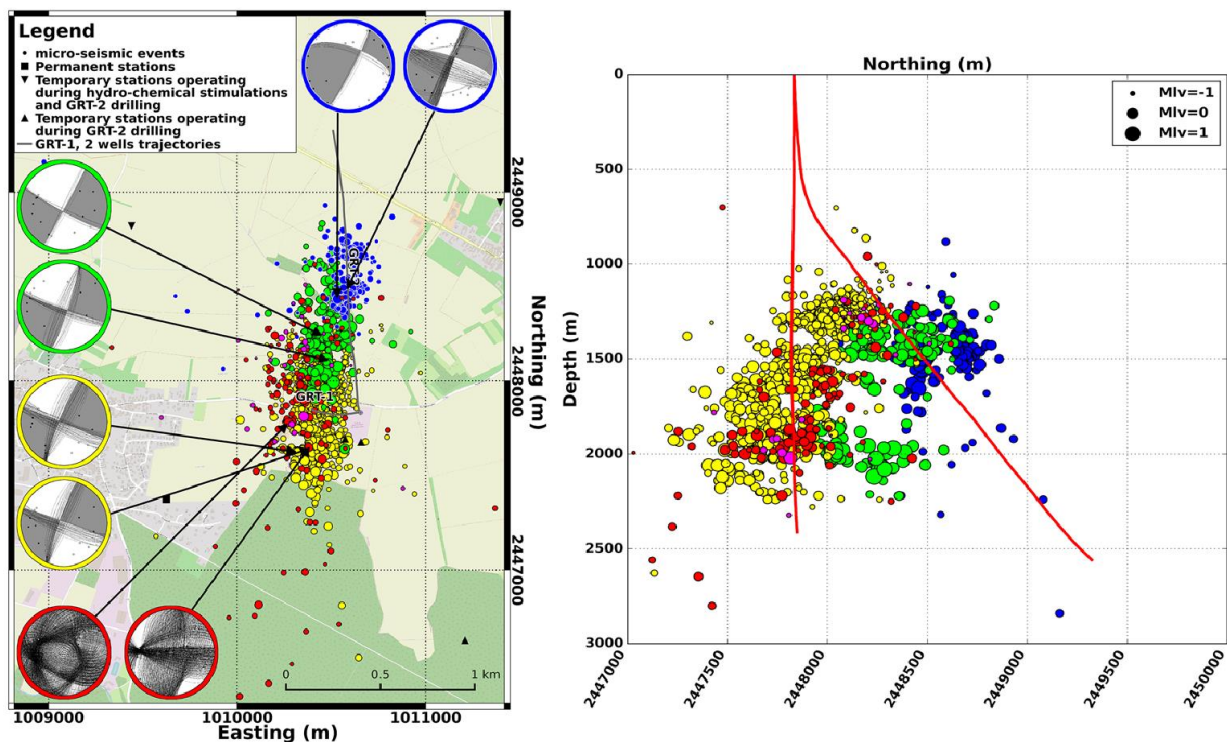


Figure 17 : (à gauche) Projection en surface de la localisation des événements microsismiques induits durant les phases de développement des puits de Rittershoffen ainsi que quelques mécanismes au foyer associés, (à droite) coupe au droit des puits de Rittershoffen et représentation des microséismes détectés et localisés. (Source : (Maurer et al. 2020))

L'Alsace méridionale est d'ores et déjà couverte par un important réseau de capteurs sismologiques opéré par le Réseau National de Surveillance Sismologique (RéNaSS, Figure 18). Ce dernier permet d'appréhender la sismicité naturelle et a permis de détecter 164 événements en 40 ans au sein du permis dont les magnitudes s'échelonnent de 0 à 4 (Figure 19).

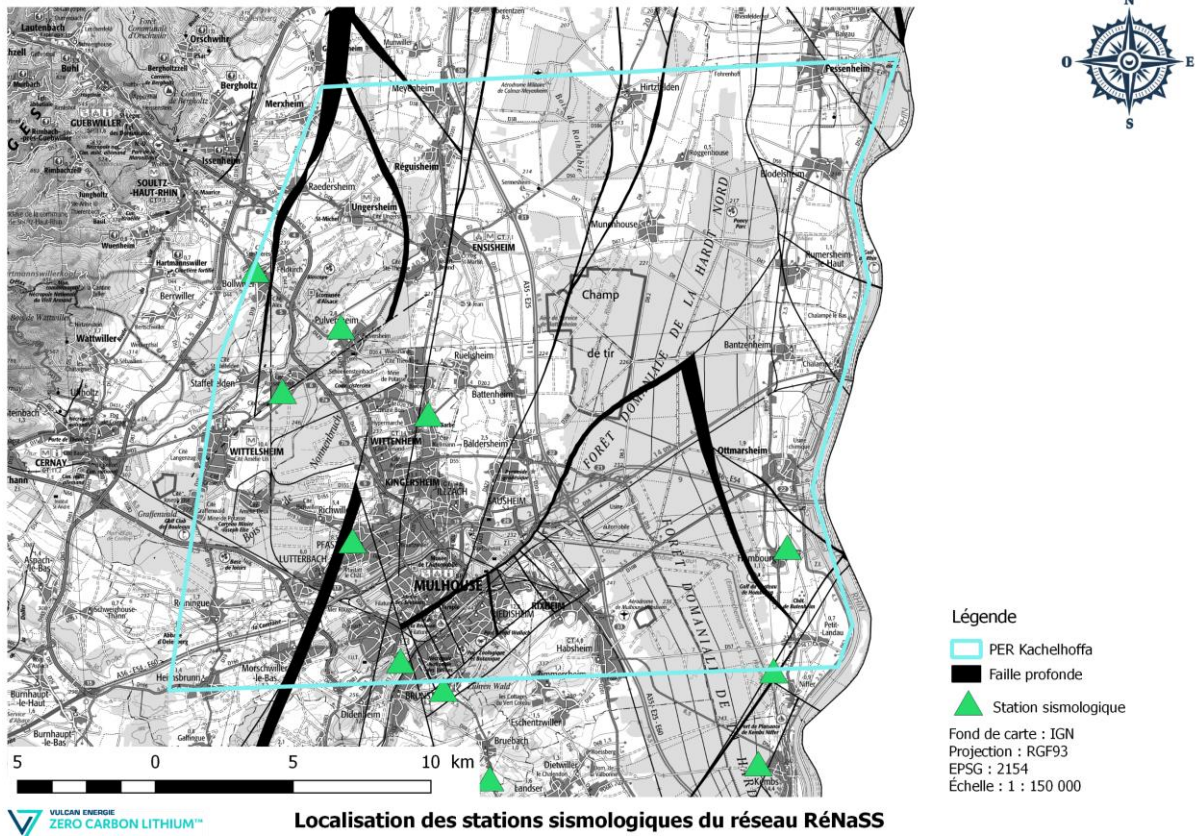


Figure 18 : Localisation des stations sismologiques du RéNaSS en Alsace du Sud. (Source : RéNaSS)

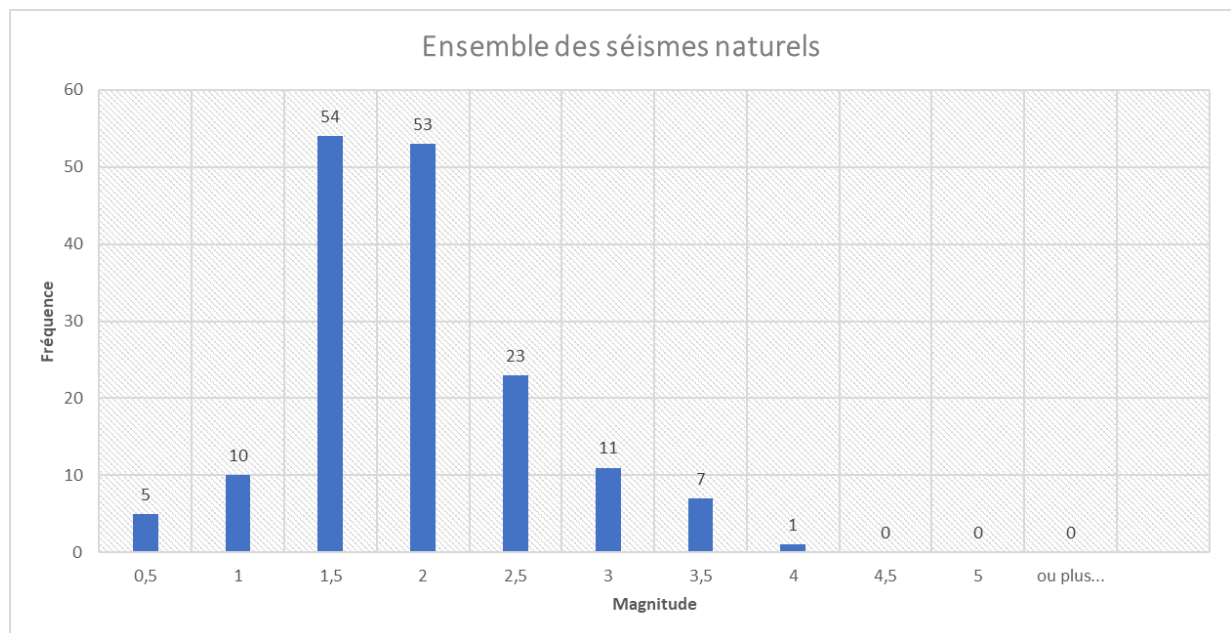


Figure 19 : Histogramme de la répartition des magnitudes des 164 séismes détectés au sein du périmètre sollicité. (Source : RéNaSS)

Le programme exploratoire de Vulcan Énergie France entend déployer des capteurs sismologiques dès l'obtention du permis afin d'établir un état de référence le plus précocement possible afin d'identifier de possibles structures sièges d'une circulation de saumures.

1.3 Les forages

1.3.1 Description de la méthode

Forage de gradient

Comme mentionné dans le Mémoire Technique de ce dossier, le sous-sol alsacien verrait naturellement apparaître des boucles de convections entre le socle cristallin et les couches géologiques du Trias. D'une extension latérale estimée à environ 1.5 km, elles seraient le signe d'une circulation importante de la saumure géothermale. Ces boucles de convections engendrent une anomalie thermique positive plus forte à leur projection orthogonale en surface. Ainsi, les forages de gradient se proposent de localiser ces lieux de circulation en effectuant des profils de températures sur les 200 premiers mètres du sous-sol. Cette méthode exploratoire est historiquement utilisée en milieu volcanique (Figure 17) car marqué par des contrastes de gradient thermique nettement plus fort qu'en milieu continental. S'agissant de forages de faible profondeur (< 200m), ils n'engendrent pas un déploiement d'équipements très important en surface (Figure 16). En effet, ce type d'ouvrage est tout à fait similaire à ceux réalisés dans le cadre de la géothermie dite de minime importance pour l'installation chez les particuliers d'une solution de chauffage géothermique. Dès lors que le forage est finalisé, une période d'attente au retour à l'équilibre de l'eau est nécessaire avant la mesure de la température en fonction de la profondeur.

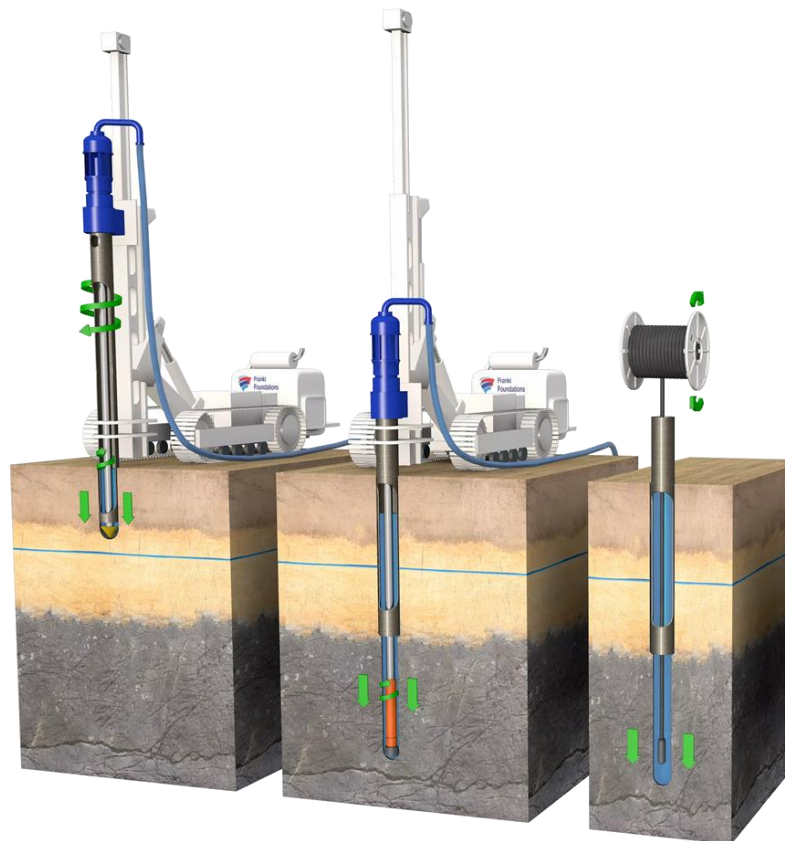


Figure 20 : Principe pour un forage géothermique de faible profondeur (<200m). (Source : Atlas-Fondations)

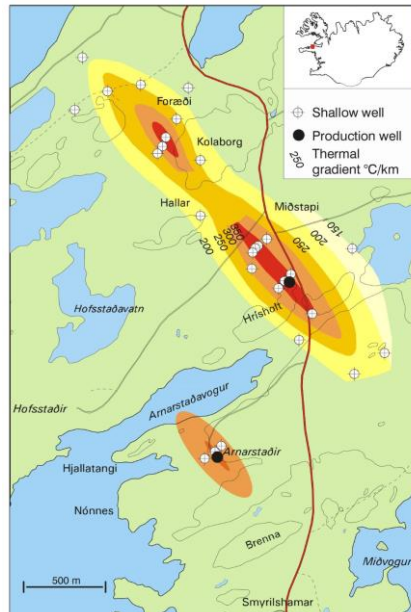


Figure 21 : Identification spatiale des anomalies de température par le biais de forages de gradient dans l'Ouest de l'Islande. (Source : (Saemundsson 2008))

Forage exploratoire profond

Dès lors que l'ensemble des études préalables auront été effectuées, la cible géothermique sera finement caractérisée afin d'établir un programme de forage et une complétion adéquate (Figure 22).

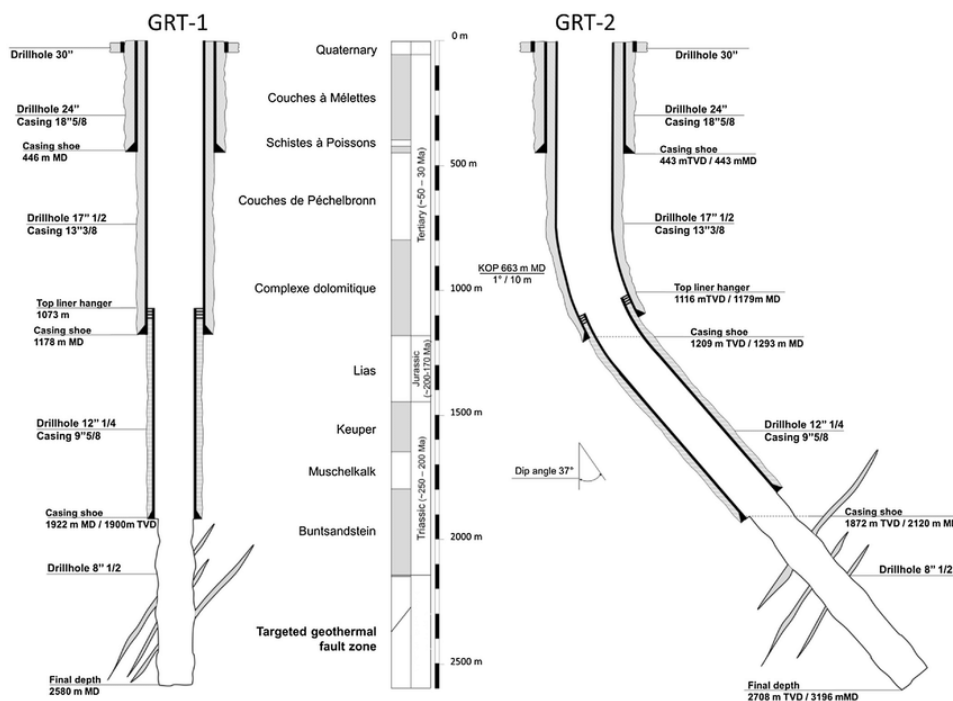


Figure 22 : Complétion des puits géothermiques du projet ECOGI à Rittershoffen. (Source : (Baujard et al. 2017))

Le premier forage profond aura comme objectif de confirmer la présence de la ressource en qualifiant sa température et sa productivité/injectivité. Cette validation ouvrira dès lors la possibilité

de mettre en œuvre le forage du deuxième puits afin de créer la boucle géothermale au sein du même réservoir. Préalablement, à toutes opérations de forages, une plateforme (accueillant le RIG de forage, Figure 23) aura été mise en place de même que l'intégralité du dispositif de surveillance allant de la surveillance sismologique à la surveillance de la nappe phréatique avec la mise en place de puits piézométriques au droit du site de forage.



Figure 23 : Dessin illustratif d'une plateforme de forage, du RIG et des équipements déployés. (Source : Électricité de Strasbourg)

1.3.2 Résultats obtenus

Forage de gradient

Dans le cadre du développement de projets de géothermie au sein de l'Alsace du Nord, une campagne de 7 forages de gradient a été réalisée (Figure 19).

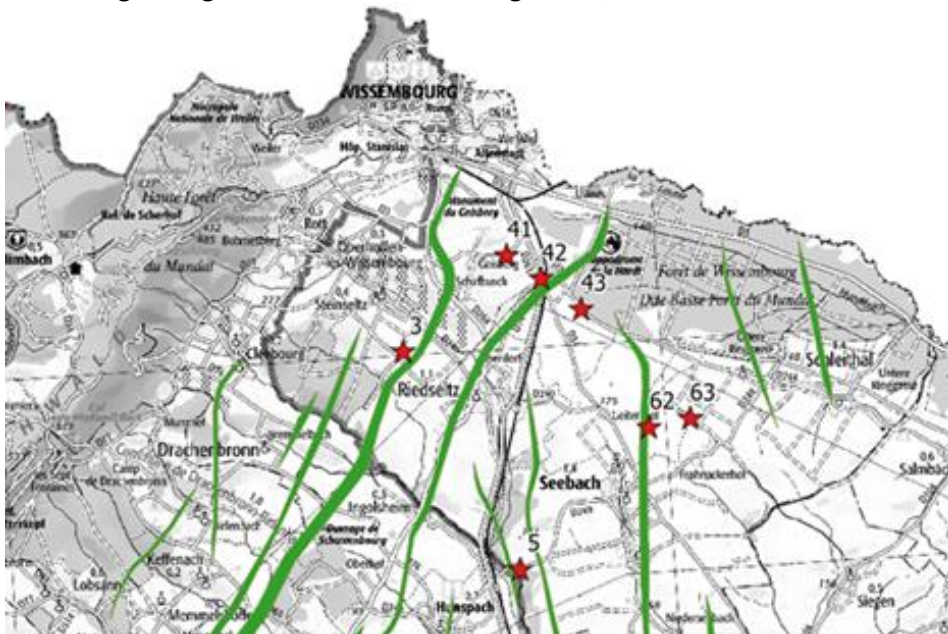


Figure 24 : Localisation des 7 forages de gradient réalisés par Électricité de Strasbourg en Alsace du Nord. (Source : (Maurer et al. 2018))

Ces forages ont permis plusieurs conclusions à savoir, dans un premier temps, que cette méthode d'exploration était également viable en milieu continental en identifiant des variations de l'ordre de [5 -10] % du gradient géothermique le long d'un profil de 3 forages et, dans un second temps, que l'intégralité de l'Alsace du Nord aurait une température de l'ordre de 150 °C au niveau du toit du cap-rock (Figure 20).

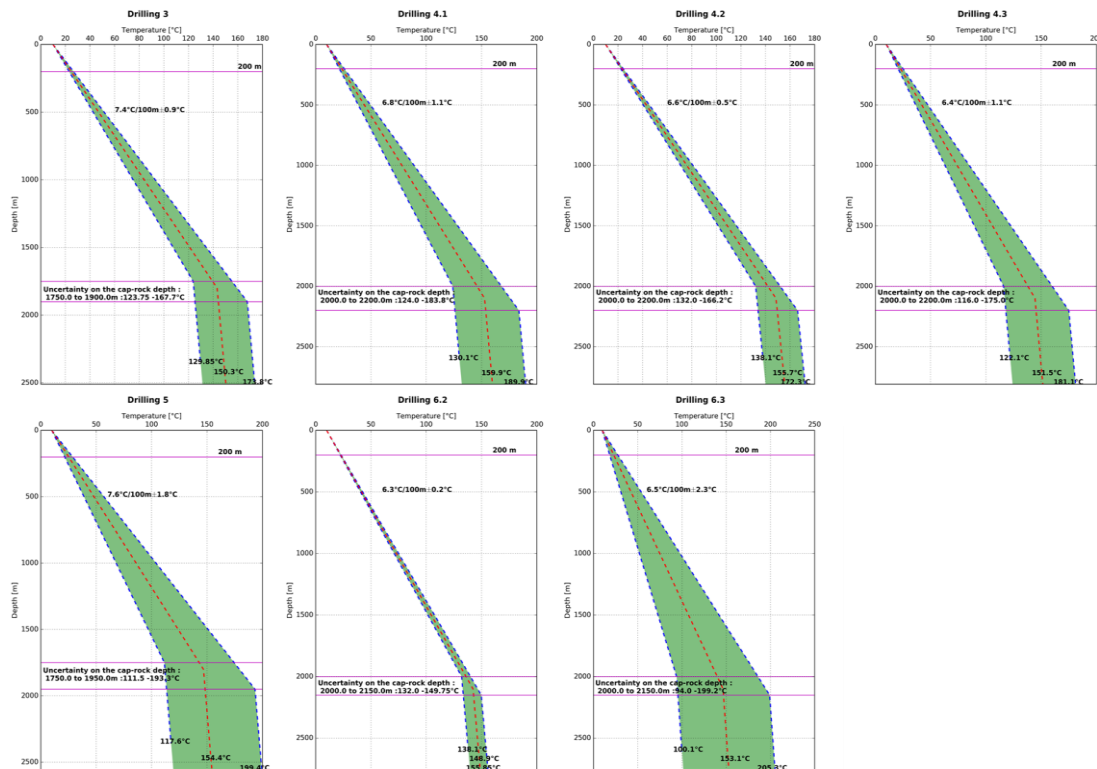


Figure 25 : Profils de températures de 7 forages de gradient sur les 200 premiers mètres et leurs extrapolations jusqu'à la cible géothermique. (Source : (Maurer et al. 2018))

Cette méthode apparaît intéressante à mettre en œuvre sur le périmètre sollicité dans le but d'une part, d'apporter des données supplémentaires afin d'étayer la pertinence de la méthode et d'autre part, de confirmer les anomalies thermiques au droit des structures les plus représentatives du Fossé Rhénan Supérieur qui se trouvent justement dans la zone d'intérêt du PER.

Forage exploratoire profond

Les forages caprofond réalisés en Alsace du Nord (Figure 26) ont tous permis d'envisager une mise en production des saumures profondes. Cela fut le cas pour le site de Soultz-sous-Forêts qui, suite à la découverte de la présence de saumures géothermales dans le sous-sol, a abandonné le concept HDR (nécessitant un apport extérieur en eau) pour directement valoriser les saumures profondes. De même, après une phase de développement du puits GRT-1 de Rittershoffen, la connectivité avec le réservoir a pu être réalisée ouvrant la foration du deuxième puits qui s'est directement révélé un excellent producteur ne nécessitant aucune stimulation particulière afin de le connecter au réseau de failles constituant le réservoir.



Figure 26 : Vue aérienne du site de forage du projet dit ECOGI (Rittershoffen) d'Électricité de Strasbourg.
(Source : (Ravier 2021))

Les projets du Fossé Rhénan supérieur ont permis d'identifier plusieurs types de réservoir (Figure 27 à gauche) et plusieurs types de trajectoires (Figure 27 à droite) de puits permettant une production des saumures.

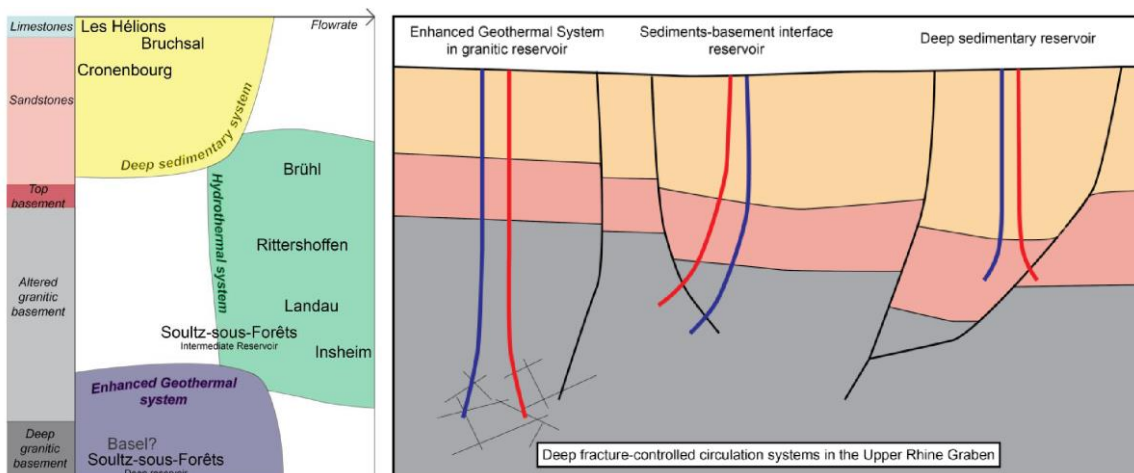


Figure 27 : (à gauche) Schéma des différents types de réservoirs mis en production, (à droite) les différentes trajectoires de puits ayant permis d'atteindre les cibles géothermales. (Source : (Vidal 2017))

Comme détaillé dans le Mémoire Technique, de nombreux puits profonds ont d'ores et déjà mis en exergue de multiple réservoir au sein du périmètre sollicité.

Le programme exploratoire atteindra son objectif en proposant, après l'aboutissement des études géosciences, un design de forage exploratoire profond permettant *in fine* de confirmer la présence et la possible mise en production de la ressource géothermale.

1.4 Les méthodes géologiques, minéralogiques et chimiques

1.4.1 Description de la méthode

Géologie et minéralogie

Si les méthodes géophysiques permettent d'aboutir à une imagerie du sous-sol, l'interprétation de ces données revêt également une grande importance afin de convenablement établir le programme de forage et les points d'ancrages des différentes sections du puits. Cette compréhension de la géologie peut être principalement obtenue par le biais de l'analyse des forages réalisés dans la zone d'intérêt. Outre ces données *in situ*, des études et prélèvements sur affleurements sont également possibles. On notera que l'Alsace possède de nombreux sites (carrières, affleurements dans le massif des Vosges) permettant de faire ces études préalables (Figure 28).

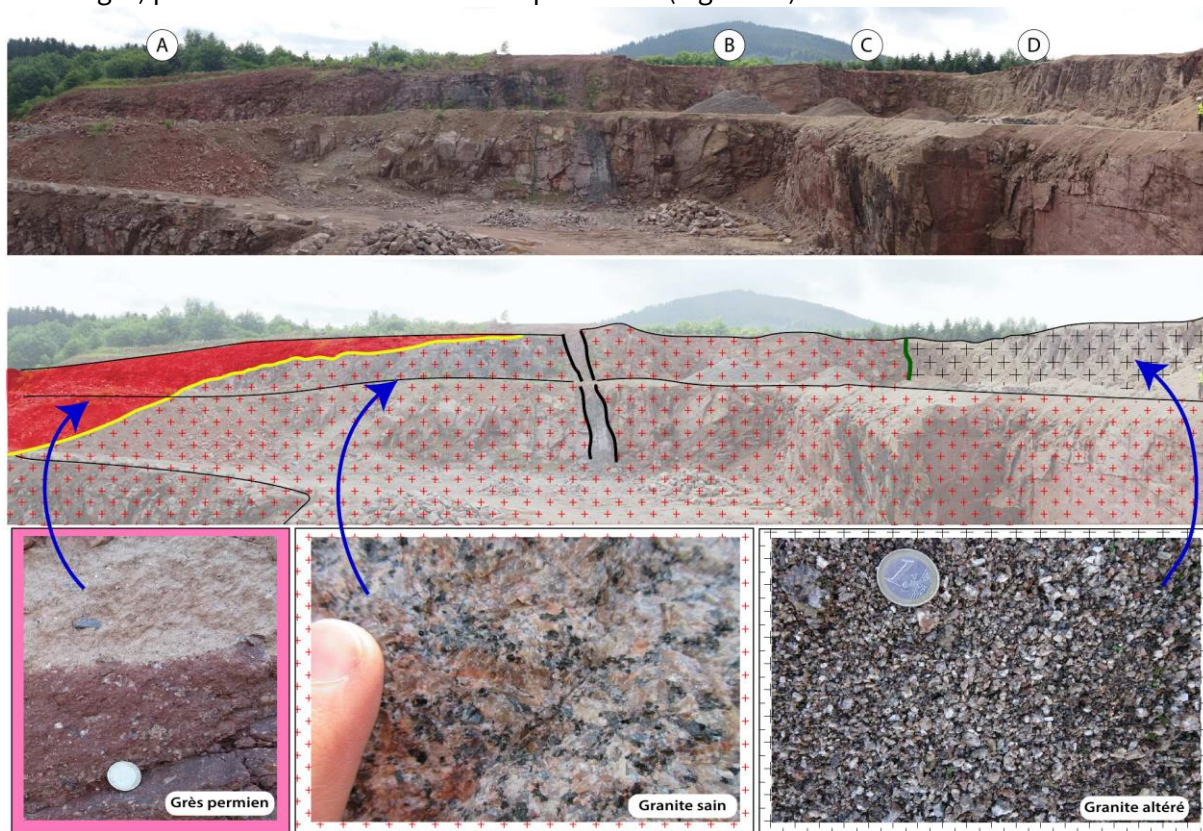


Figure 28 : Exemple d'affleurement sur carrière permettant des analyses structurales, géologiques et minéralogiques. (Source : (Aichholzer 2019))

Géochimie des saumures

La géochimie consiste dans l'étude de la répartition des éléments chimiques, de leur distribution dans les roches, les minéraux, les eaux et les gaz terrestres, de leur origine, de leur nature et de leur comportement au cours des processus géologiques. Ainsi, à la fin des forages profonds sont réalisés des prélèvements d'eau géothermale afin de procéder à son analyse. Cependant, il est à noter que les échantillonnages faits en surface posent la problématique de la rupture d'équilibre géochimique du fluide car loin de ses conditions de pression et de température au sein du réservoir. Ainsi, il sera préférentiellement réalisé des prises d'échantillons au droit du réservoir et de manière *in situ* afin de conserver au maximum les caractéristiques du fluide.

1.4.2 Résultats obtenus

Géologie et minéralogie

Les nombreux travaux géologiques entrepris en Alsace du Nord ((Düringer & Vecsei 1998), (Vidal et al. 2015), (Düringer et al. 2019), (Aichholzer et al. 2019)) ont permis d'aboutir à une connaissance très détaillée autant de la pile sédimentaire (Düringer et al., 2019) que du socle cristallin ((Cocherie et al. 2004), (Stussi et al. 2002)). Des études récentes ont permis de mettre en relation les données acquises sur les carottes de Soultz-sous-Forêts et les cuttings de Rittershoffen (Figure 29).

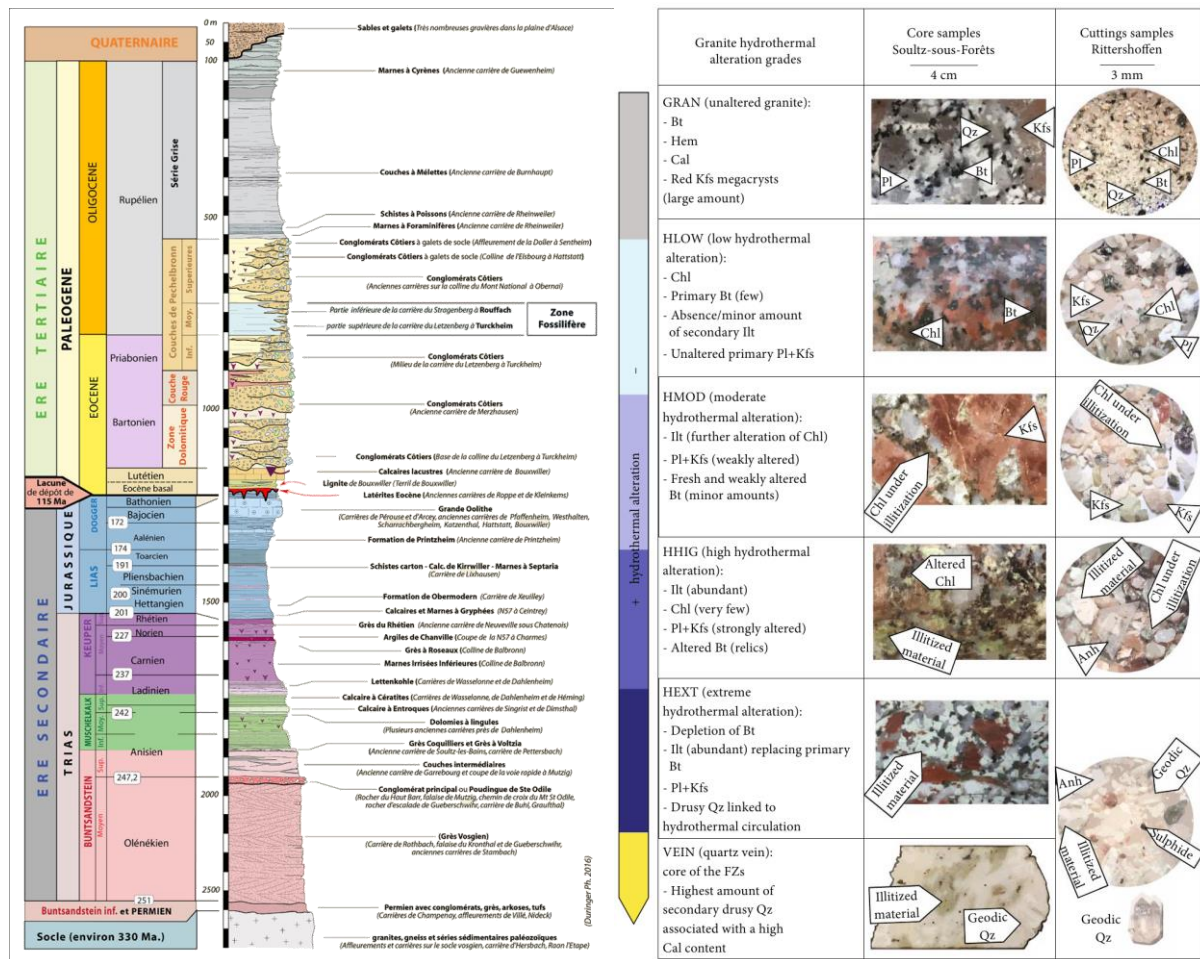


Figure 29 : (à gauche) Exemple de lithostratigraphie sur les bords du fossé et le lieu des affleurements. (Source : (Düringer et al. 2016)). (à droite) Comparaison des études minéralogiques faites sur des carottages et des cuttings respectivement sur les projets de Soultz-sous-Forêts et Rittershoffen. (Source : (Glaas et al. 2019))

On note la plus-value importante des travaux réalisables sur des carottes. Cependant, des technologies permettent tout de même de tirer profit des cuttings comme par exemple le travail sur lames minces et binoculaire et plus encore par l'usage de microscopie électronique à balayage. Concernant l'analyse sur des éléments solides, la technologie la plus récente utilise la spectrométrie de masse afin de détecter des éléments en traces.

Des données lithostratigraphiques sont également disponibles en Alsace du Sud par le biais des forages d'exploration réalisés dans les années 80. On peut en particulier citer le forage dit « Bellemagny » qui a atteint une profondeur de 2 741m (Figure 30).

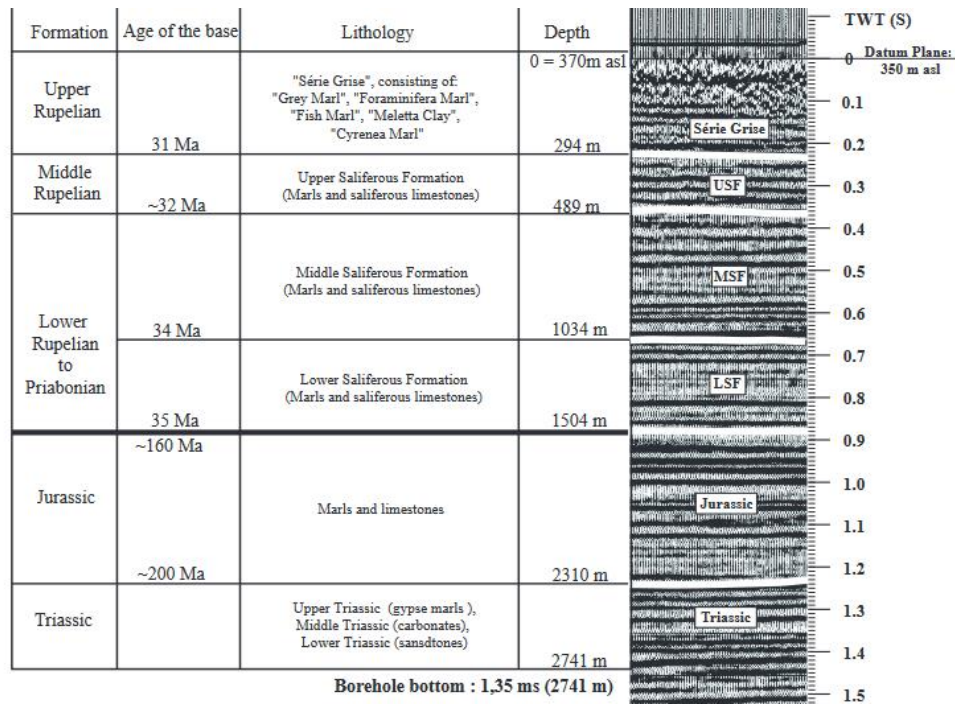


Figure 30 : Corrélation entre la coupe lithostratigraphique du forage Bellemagny et des données de sismique 2D vintage. (Source : Le Carlier de Veslud et al., 2005)

Une connaissance a priori des couches géologiques sera nécessaire Afin d'anticiper la phase forage. Ainsi, il sera proposé de conduire des prélèvements sur affleurement, le carottage du forage profond exploratoire et des analyses sur cuttings.

Géochimie des saumures

Les études géochimiques ont permis de qualifier et quantifier les constantes chimiques (présence et concentration des éléments de type Na, Ca, K, Mg, Fe, Sr, Mn, As, Zn, Ba, Li, SiO₂, Cl, SO₄, etc.) et physiques (salinité, conductivité, pH, etc.) des saumures géothermales d'Alsace du Nord. Ces paramètres ont même bénéficié d'un suivi dans le temps afin de caractériser les variations temporelles des saumures géothermales profondes (Figure 31).

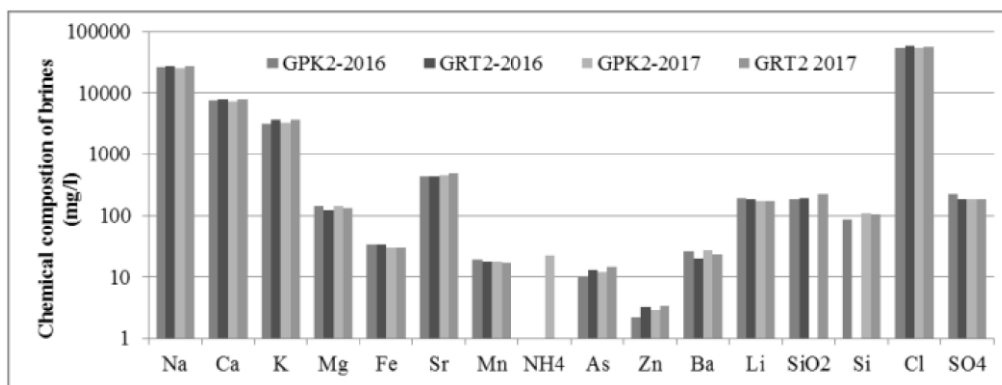


Figure 31 : Composition des saumures géothermales des projets de Sultz-sous-Forêts et de Rittershoffen et évolution sur 2 années. (Source : (Mouchot et al. 2019))

Afin d'aboutir à une compréhension plus fine de la composition des saumures, il sera mis en œuvre des prélèvements *in situ* au droit des réservoirs identifiés (cf. Mémoire Technique chapitre 4.4).

2 Stratégie d'exploration du périmètre sollicité

Le périmètre sollicité dans le cadre de cette demande de Permis Exclusif de Recherches de gîtes Géothermiques dénote par le potentiel chaleur spatialement hétérogène (Figure 32).

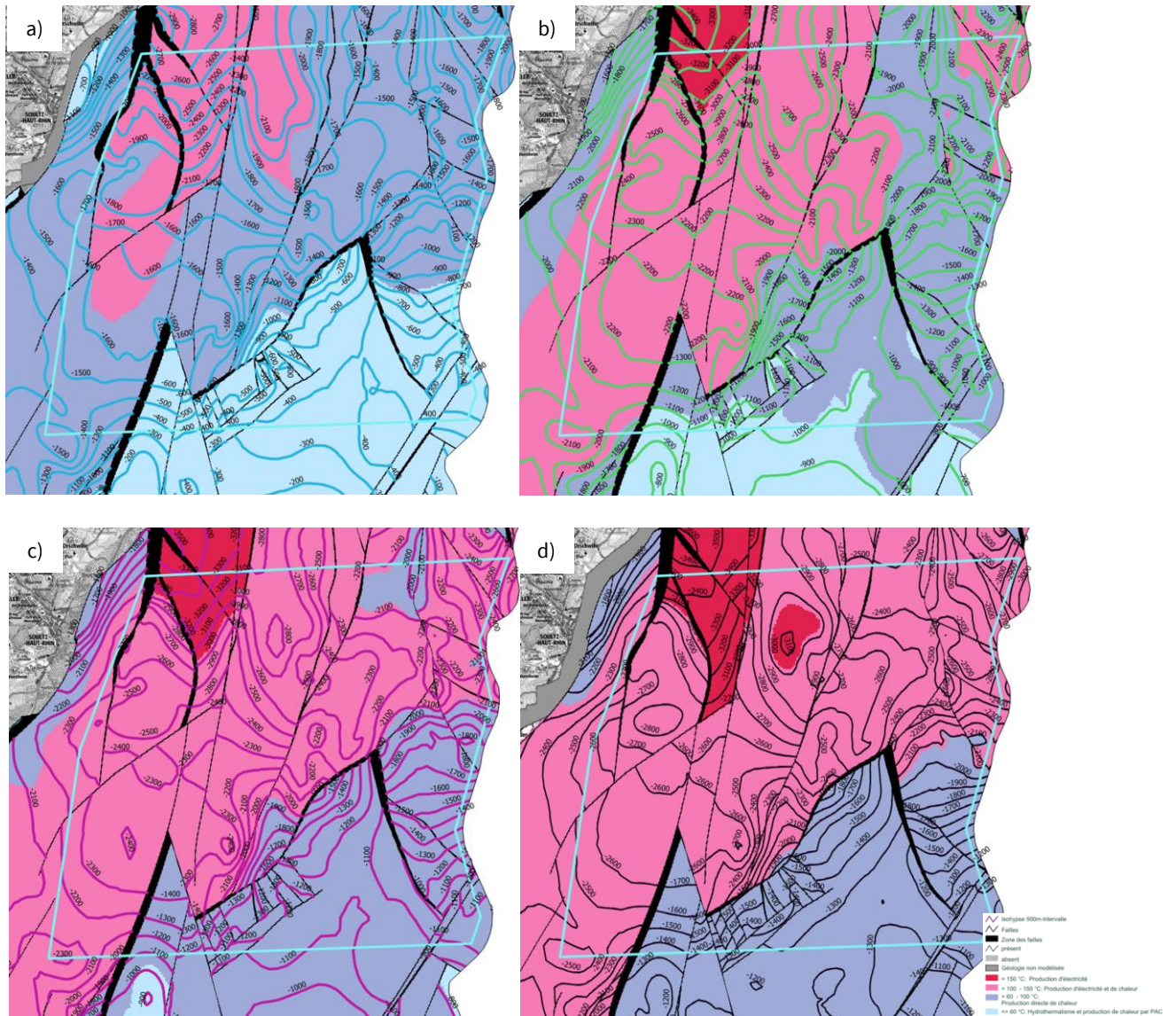


Figure 32 : Carte des classes de températures au a) toit de la Grande Oolithe, b) du Muschelkalk, c) du Buntsandstein et d) du toit du socle. (Source : GeORG)

En effet, la structure géologique sous-jacente fait apparaître des hauts et bas structuraux associés à un gradient moyen de l'ordre de 5°C/100m dans la zone d'études qu'il a été possible d'inférer par le biais de l'étude des forages anciens (Figure 33).

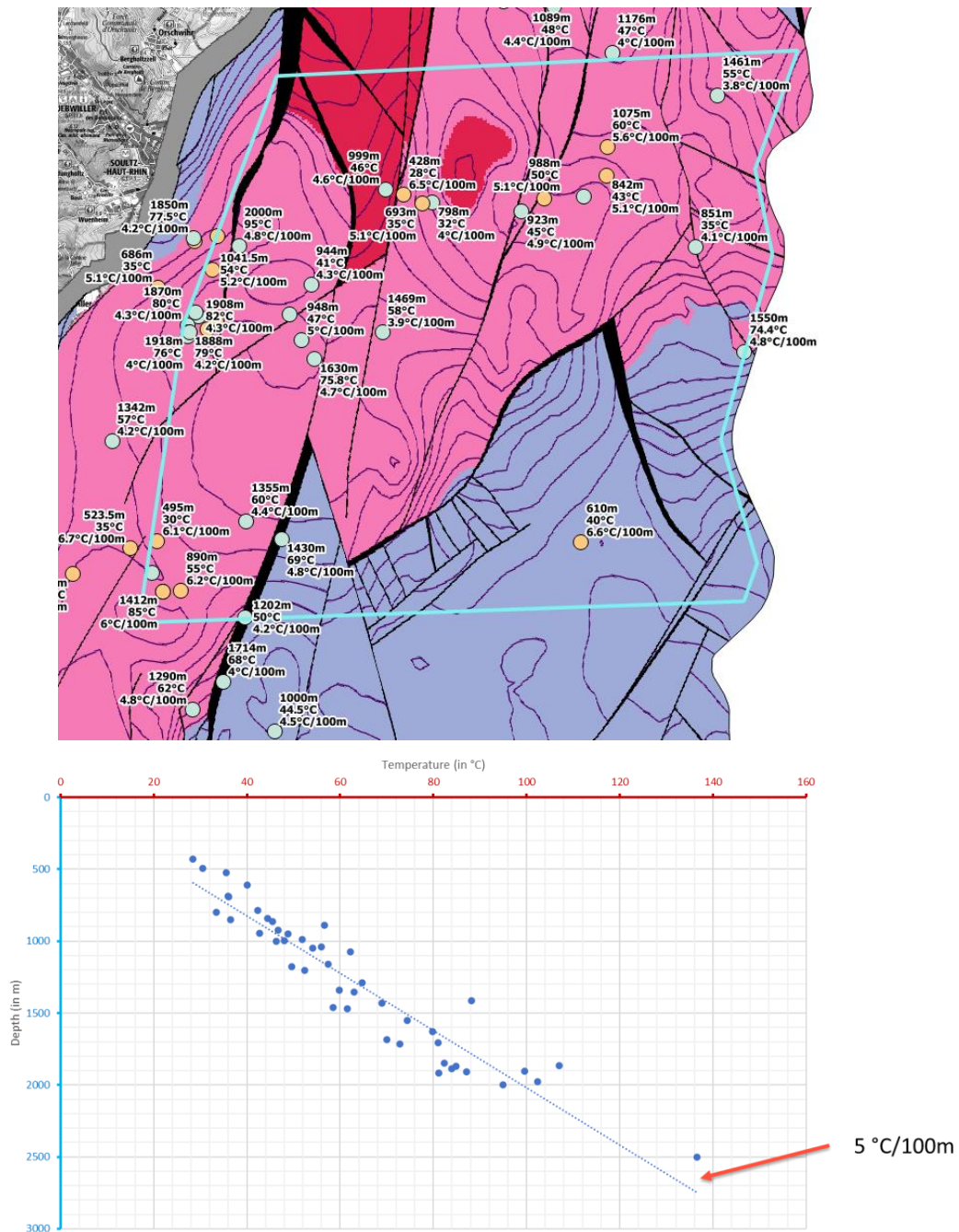


Figure 33 : En haut, localisation des forages présentant des données de température. En bas, répartition des gradients géothermiques observés au regard d'une régression linéaire à 5 °C/100 m.

Ainsi, l'exploration du périmètre sera fragmentée en plusieurs phases qui verront s'associer la poursuite des études de potentiel, des restrictions spatiales eues égard à la protection de l'environnement, des sollicitations d'industriels et les apports des élus du territoire dans la sélection des zones les plus pertinentes au regard de développement économique dont ils ont la charge. En l'état actuel des connaissances et du projet de développement de la valorisation des saumures géothermales, il sera proposé d'entamer en priorité une exploration au Nord Est de l'agglomération de Mulhouse (Figure 34). En effet, cette partie du territoire pourra aisément permettre d'envisager toutes les gammes de températures intéressantes pour le développement de projets variés. Comme mentionné dans le Mémoire Technique, les profondeurs maximales envisageables se situent entre 1 300 m et 2 700 m avec des températures comprises entre 60 °C et 150 °C. Proche de l'agglomération

mulhousienne, des réseaux de chaleur et d'importants industriels, un projet de décarbonation d'envergure pourra être coconstruit dès lors que l'exploration aura permis de mieux caractériser la ressource géothermale.

Dans un second temps sera poursuivi l'exploration du périmètre sur 4 autres zones permettant là aussi d'envisager de multiples possibilités de décarbonation ou de développement à faible impact carbone. L'ordre de développement sera décidé avec toutes les parties prenantes et là encore au regard des études et des contraintes surfaces.

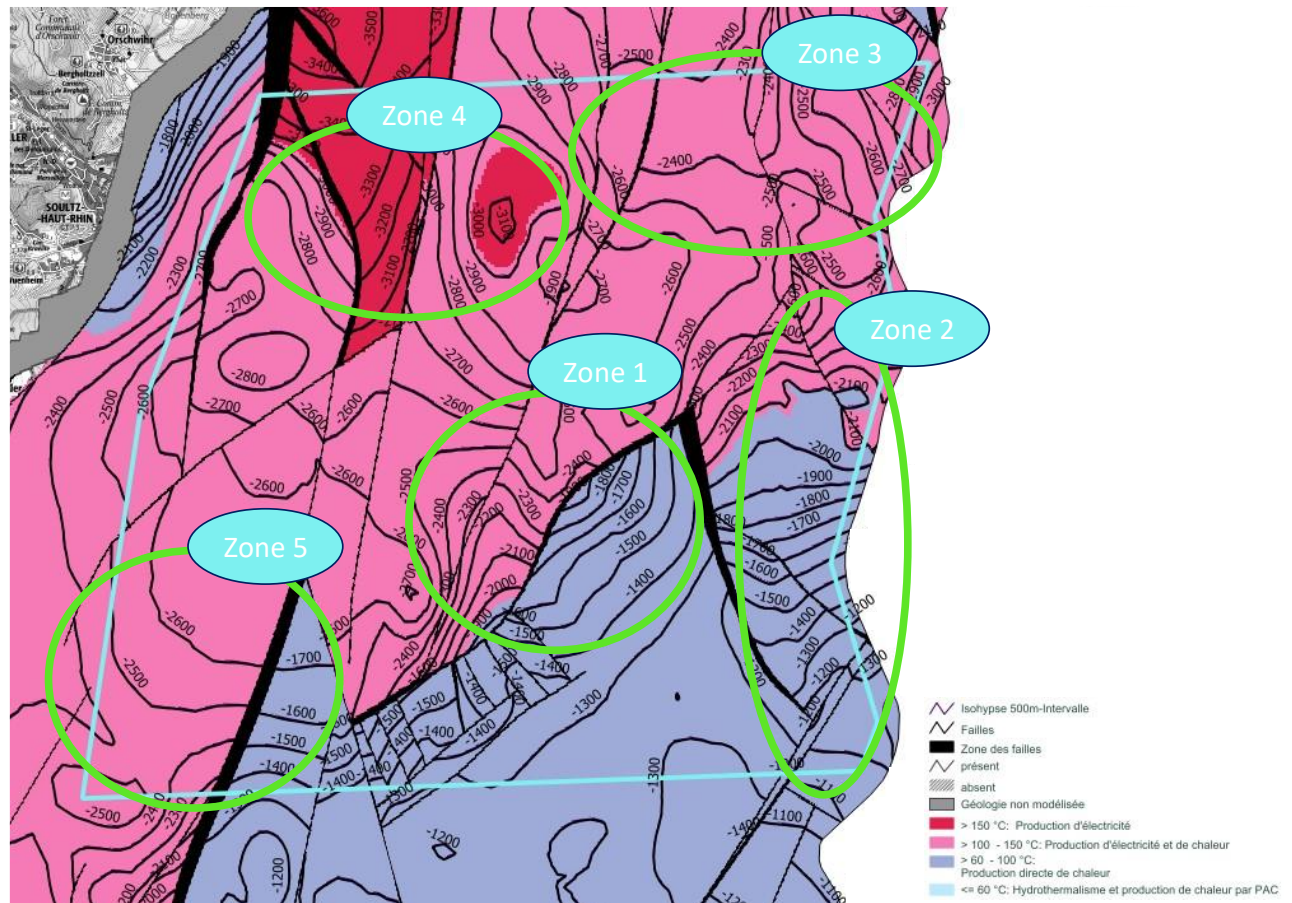


Figure 34 : Zonage des sites à potentiel géothermique pour la déclinaison d'une campagne exploratoire.

A l'heure actuelle, la partie la plus à l'Ouest demeure vierge de toute programmation d'exploration en raison de la problématique associée au site de stockage de Wittelsheim.

3 Mise en œuvre des méthodes potentielles

3.1 Description technique

Les résultats des différentes méthodes potentielles mises en œuvre en Alsace du Nord et partiellement sur l'emprise sollicitée permettent d'élaborer une sélection de ces méthodes au regard des structures inférées dans la zone d'étude (succession horst/graben, blocs synthétiques, profondeur supérieure à 2 000m). En effet, la structure consistant en un horst suivi par un graben dans lequel se situe des blocs délimités par des failles majeures semble confirmée par les méthodes potentielles de large échelle telles que la gravimétrie. Ainsi, il ne parait pas nécessaire de recourir à une campagne de gravimétrie de grande ampleur sur le périmètre sollicité. Cependant, il serait pertinent, dans l'attente des résultats définitif de la campagne DeepEM, de réaliser un long profil de CSEM afin d'intersecter toutes les structures et d'y détecter d'éventuelles anomalies magnétiques / électriques signifiant une possible circulation préférentielle.

En effet, les résultats de la campagne EM passive de 2019 (Figure 7 et Figure 35) sur une ligne de 12 km a mis en évidence la capacité cette méthode à révéler les accidents géologiques majeurs et à identifier une anomalie profonde ayant une extension de près de 7 km.

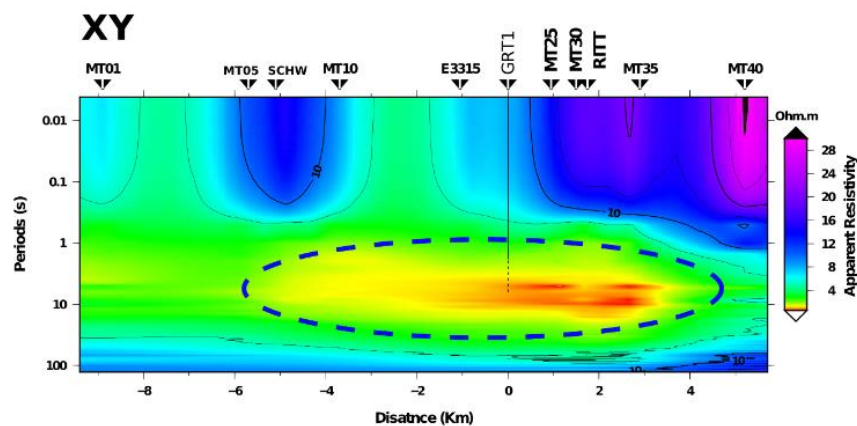


Figure 35 : Pseudo-section de la résistivité apparente selon une ligne MT reliant Sultz-sous-Forêts à Rittershoffen. (Source : (Abdelfettah et al. 2019))

Afin d'améliorer encore la résolution et la profondeur de pénétration du champ induit, il sera donc mis en œuvre des lignes CSEM 2D pour identifier les zones de circulation de fluide géothermale.

Une des innovations proposées sera non plus d'opérer perpendiculairement aux failles mais de manière colinéaire à ces dernières. En effet, de récents travaux tendent à mettre en évidence la variabilité spatiale des boucles de convections naturelles au sein d'une même faille (Figure 36). Ainsi, ayant *a priori* la position des failles par le biais des données de sismique 2D vintage, il est possible de designer des lignes 2D de CSEM le long de ces structures afin d'identifier la zone au plus fort potentiel géothermique (Figure 37).

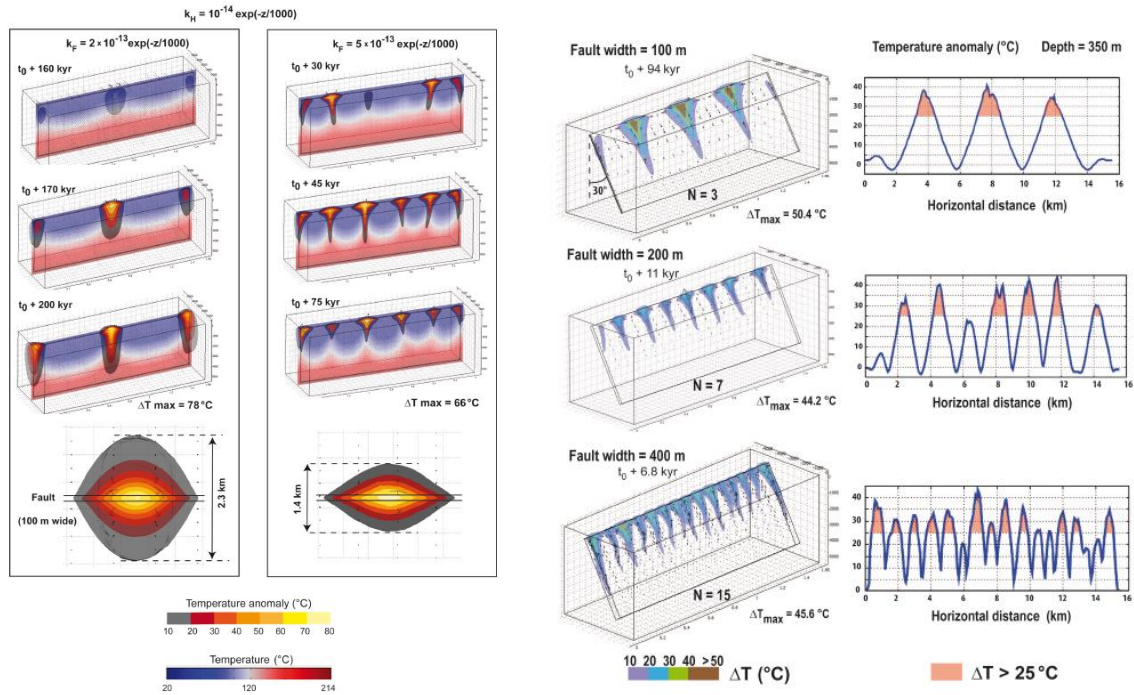


Figure 36 : Effet de la perméabilité et de la largeur de faille sur la taille des boucles de convection. (Source : Guillou-Frottier et al., 2020)

Le tracé des lignes de CSEM aura principalement pour objectif d'éviter les zones urbaines et péri-urbaines sources de bruit pour les données acquises (Figure 37).

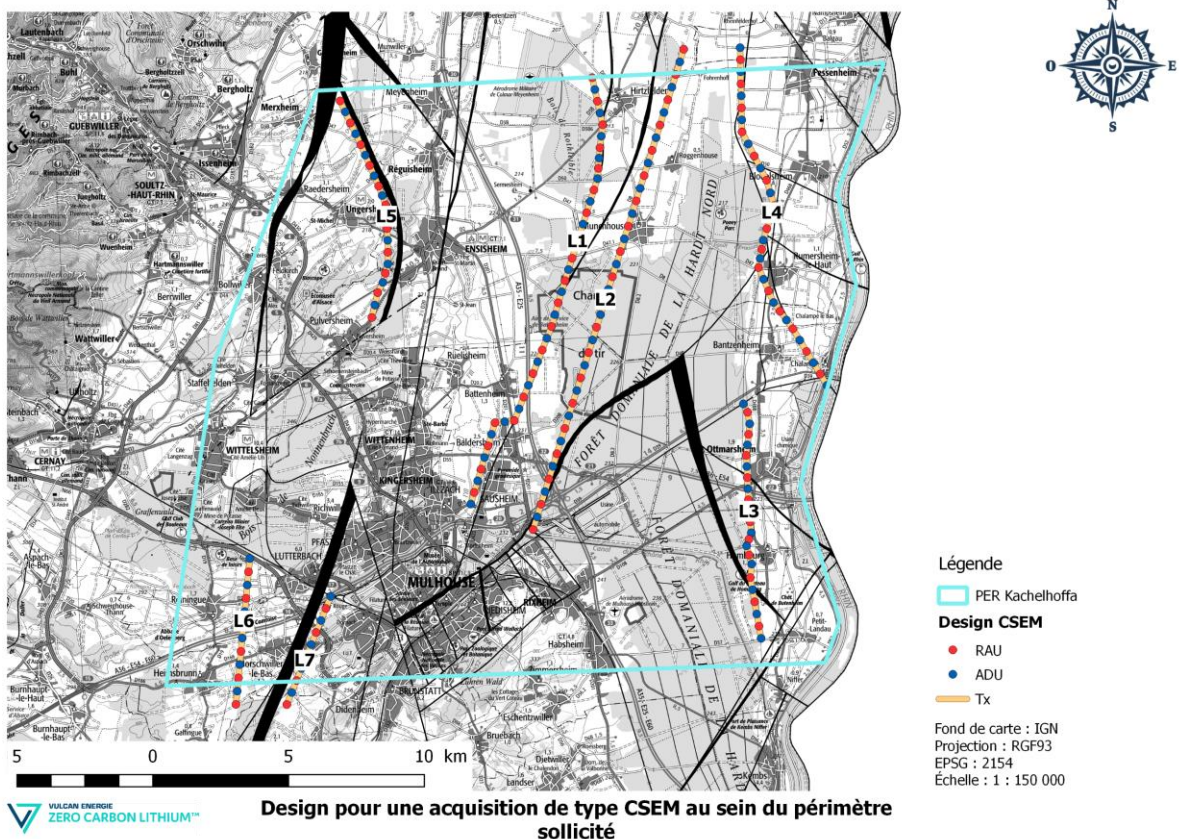


Figure 37 : Design préliminaire pour l'acquisition de lignes CSEM.

Le design se cale également sur les routes et chemins afin de réduire au maximum l'empreinte au sol du déploiement des capteurs (Figure 38 et Figure 38).



Figure 38 : Équipements d'acquisition des données électriques et magnétiques, respectivement une base dite ADU (à gauche) et une base RAU (à droite). (Source : (Darnet et al. 2021))

Ainsi, il est proposé de déployer 8 profils CSEM avec les équipements suivants :

Profil	Longueur du profil	Nombre d'ADU / RAU	Distance entre stations	Longueur des lignes sources
Ligne 1	17 km	34	~500 m	2 à 3 km
Ligne 2	18 km	36		
Ligne 3	9 km	18		
Ligne 4	13 km	26		
Ligne 5	8 km	16		
Ligne 6	5 km	10		
Ligne 7	4 km	8		
TOTAL	74 km	148		

Tableau 1 : Description de la géométrie d'acquisition de l'exploration par CSEM.

S'agissant d'un coût relativement marginal, il sera également mis en œuvre des mesures ponctuelles de gravimétrie (au droit de chaque station ADU et RAU) afin, dans un intérêt de recherche et développement (R&D), d'acquérir des données qui pourront être corrélées aux mesures CSEM et, comme présenté dans les chapitres suivants, aux données de sismique et aux données de puits. Ce pré-design sera revu avec le département géophysique du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) qui possède une très grande expertise dans toute la chaîne de valeur des méthodes potentielles allant du design au traitement en passant par l'acquisition des données (M. Darnet 2020).

3.2 Planning

S'agissant de méthodes peu invasives et appliquées uniquement selon une ligne 2D, elles pourront être découplées des autres opérations d'exploration. Par ailleurs, concernant le CSEM, la propagation du champ EM sera d'autant plus important que le sol sera humide. Ainsi, cette acquisition de données CSEM se fera préférentiellement en automne (Figure 39).

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Température moyenne (°C)	2.3	2.9	6.4	10.6	14.8	18.5	20.3	19.9	16	11.6	6.4	3.2
Température minimale moyenne (°C)	-0.4	-0.4	2.1	5.7	10	13.6	15.6	15.4	11.9	8.1	3.5	0.7
Température maximale (°C)	5.2	6.6	10.9	15.4	19.2	23	24.7	24.4	20.4	15.7	9.7	6
Précipitations (mm)	79	66	74	67	88	85	89	80	76	81	84	93
Humidité(%)	81%	78%	74%	68%	69%	66%	65%	67%	72%	79%	84%	83%
Jours de pluie (jréé)	10	9	10	9	10	10	10	9	8	9	10	11
Heures de soleil (h)	4.0	5.1	6.8	9.1	10.0	11.3	11.5	10.2	8.0	6.2	4.6	4.0

Figure 39 : Données météorologiques du Bas-Rhin concaténées de 1991 à 2021. (Source : climat-data.org)

L'objectif est d'obtenir les résultats des interprétations de manière synchrone avec celles des autres méthodes afin d'aboutir à un jeu de données multidisciplinaires permettant d'avoir tous les éléments décisionnels pour la définition de la cible géothermique. Ainsi, le design pourra être engagé très rapidement après l'obtention du PER alors que la mise en œuvre de la méthode ne sera effective qu'en automne (Figure 40).

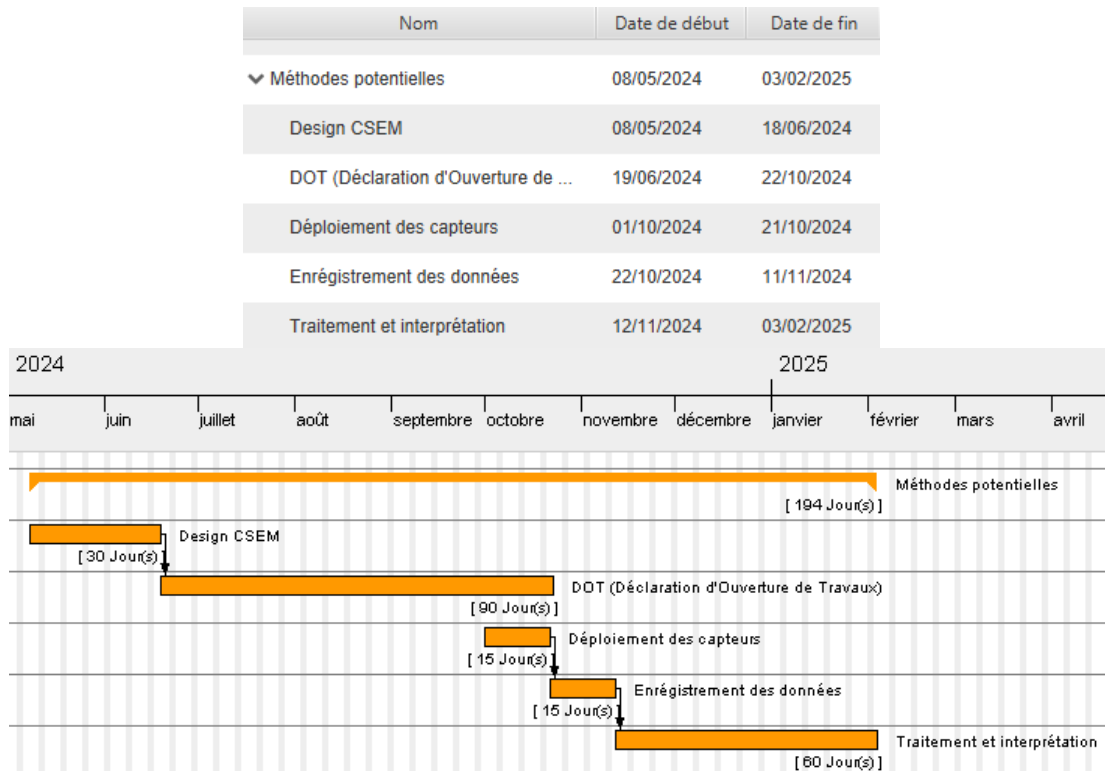


Figure 40 : Planning de l'exploration par méthode potentielle CSEM et gravimétrie.

3.3 Coût

Le principal coût (Tableau 7) d'une exploration par méthode potentielle de type CSEM réside dans l'achat et/ou la location des sources électriques puissantes. Par ailleurs, l'accompagnement du projet par un permitman apparaît nécessaire afin d'assurer l'obtention et le suivi des demandes d'accès pour le déploiement des capteurs et des sources. Enfin, les coûts du traitement et de l'interprétation pourront si nécessaire être internalisés au sein du Groupe Vulcan car les compétences techniques sont présentes.

Design	Permitting	Acquisition (CSEM + gravimétrie)	Traitement / Interprétation	Coût total
10 k€	30 k€	400 k€	50 k€	490 k€

Tableau 2 : Coût estimatif d'une acquisition CSEM et gravimétrie.

4 Mise en œuvre du retraitement de la sismique 2D

4.1 Description technique

Afin de valider le positionnement des structures géologiques, il sera réalisé un retraitement des lignes sismiques vintage préexistantes (Figure 41). En effet, le retraitement avec des méthodes de processing avancées permettra d'améliorer l'imagerie des failles et le suivi des horizons géologiques sur les anciennes lignes 2D vintage

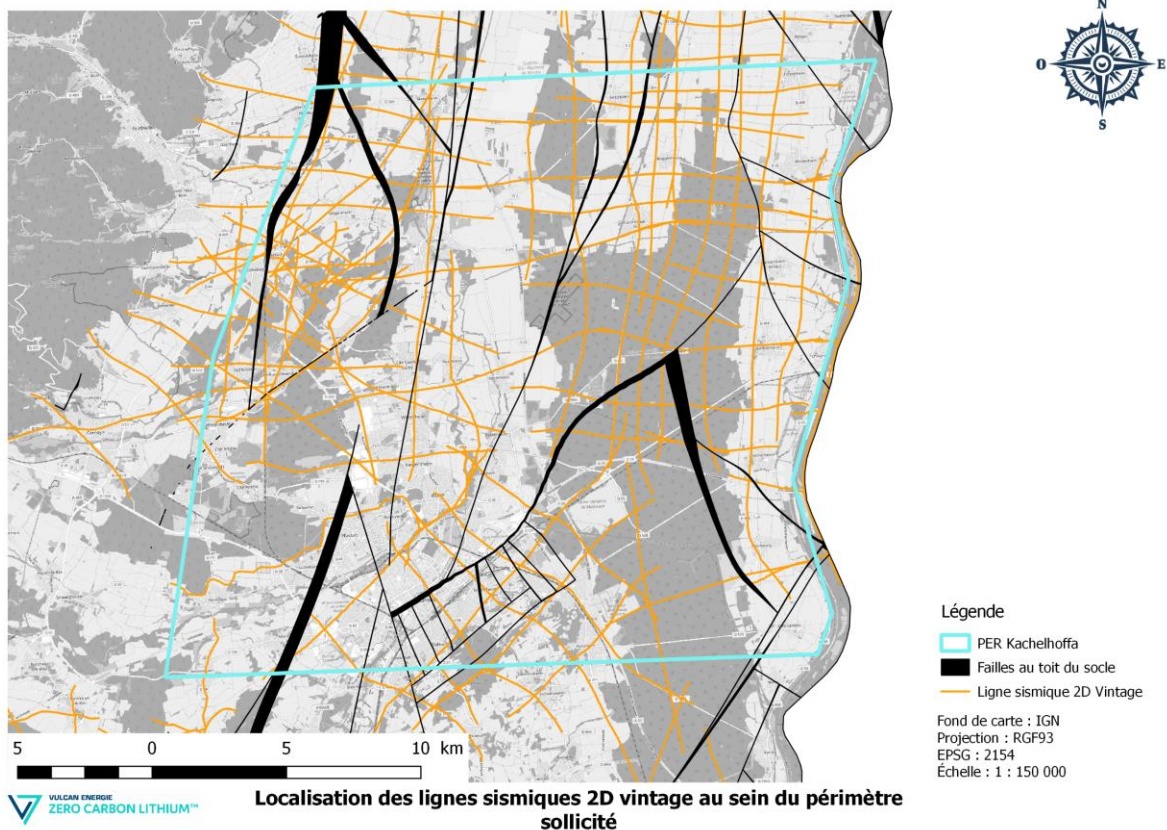


Figure 41 : Sélection de lignes sismiques 2D vintage à retraiter afin de valider le positionnement des structures géologiques sur le périmètre du PER sollicité.

Les lignes identifiées représentent environ 800 km linéaire de données.

4.2 Planning

S'agissant uniquement de retraitement de données sismiques, aucune action sur le terrain n'est à considérer. Ainsi, le travail informatique pourra débuter très rapidement après l'obtention du Permis Exclusif de Recherches (Figure 71). Le principal objectif réside dans le fait que les résultats doivent être obtenus rapidement afin qu'ils soient intégrés dans le design définitif de la sismique 3D.

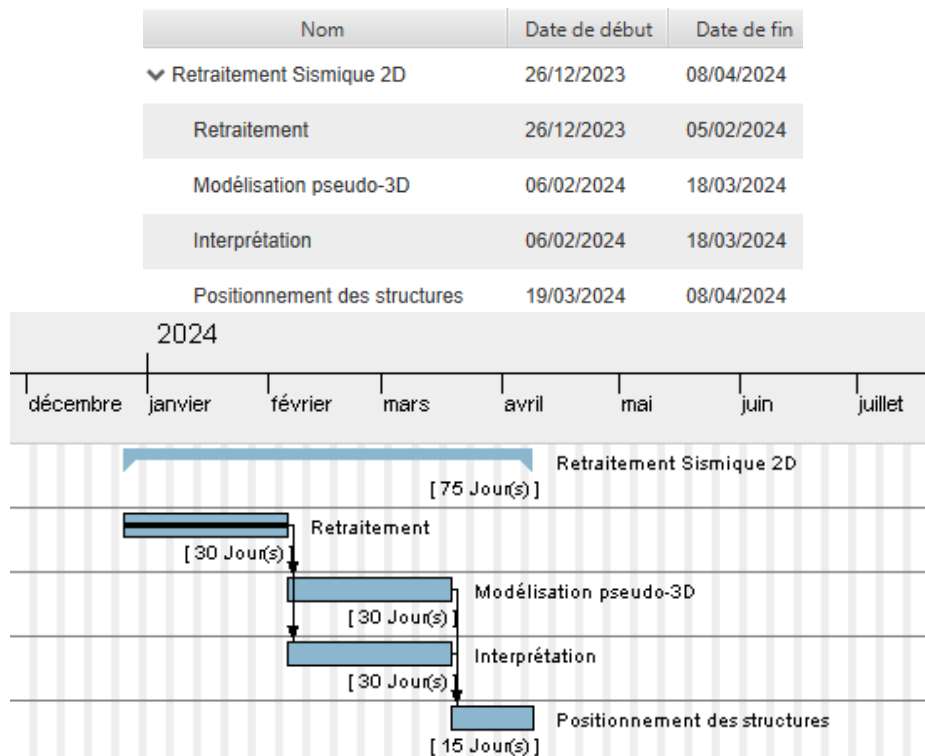


Figure 42 : Planning prévisionnel pour le retraitement de sismique 2D vintage.

4.3 Coût

Les données sismiques vintage sont disponibles à l'achat au sein du service Minergies, le portail français des ressources énergétiques du sous-sol (hydrocarbures, géothermie à haute température, stockage souterrain). La tarification est de 50 €/km HT pour la mise à disposition des lignes sismiques vintage (carottages et LVL compris). L'extraction envisagée comprend près de 800 km linéaires de données sismiques.

Le process de traitement, de modélisation et d'interprétation des données sismiques pourront être internalisés au sein du groupe Vulcan. Cependant, afin d'établir la correspondance en termes d'engagement financier, il est indiqué dans le Tableau 3 les tarifs usuels pour ce type de services lorsqu'ils sont externalisés (1 200 €/km pour le traitement et 600 €/km pour l'interprétation).

	Achat des lignes sismiques	Traitement des données	Modélisation pseudo-3D	Interprétation	Coût total
Externalisé	40 k€	960 k€	100 k€	480 k€	1 580 k€
Groupe Vulcan	40 k€	Vulcan Energy Subsurface	Vulcan Energy Subsurface	Vulcan Energy Subsurface	40 k€

Tableau 3 : Description des coûts associés au retraitement et la réinterprétation de la sismique 2D vintage présente au sein du PER sollicité.

5 Mise en œuvre d'une sismique réflexion 3D

5.1 Description technique

Le Mémoire Techniques ainsi que le chapitre 1.2.2 ont mis en exergue l'apport décisif des acquisitions sismiques réflexion 3D pour l'imagerie des structures du sous-sol. La meilleure définition de la pile sédimentaire (provenant des hautes fréquences du camion vibreur) permet d'établir un programme de forage détaillé anticipant les différentes côtes des horizons géologiques. La capacité d'imagerie des failles majeures et secondaires permet de déterminer avec précision la trajectoire des puits afin d'une part, assurer la stabilité de l'ouvrage en phase forage et d'autre part, de cibler la zone à plus forte porosité de fractures.

Compte tenu du fait que le sous-sol d'Alsace du Nord soit parsemé d'un important réseau de failles, un des paramètres clés à prendre en compte dans le design de la future acquisition sismique sont les azimuts couverts par la géométrie d'acquisition. La notion d'azimut en acquisition sismique peut être imagée à travers le design des acquisitions sismiques faites en mer (dit offshore). En effet, le parcours des bateaux sismiques (tirant les sources (airgun) et les récepteurs (streamer)) permet de bien visualiser la contribution des angles d'imageries (Figure 43).

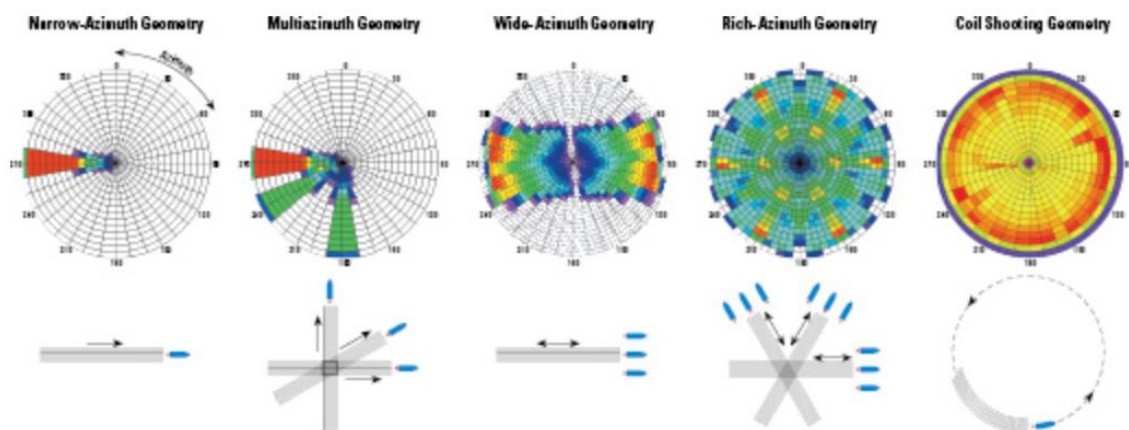


Figure 43 : Schéma de la couverture azimutale dans le cadre d'une acquisition sismique marine. Le diagramme de rose permet d'identifier les angles couverts par les différents trajets des ondes dans le sous-sol (Source : (Amundsen & Landrø 2008))

En sismique terrestre (dit onshore), la couverture azimutale dépendra principalement de la géométrie d'acquisition et de l'envergure du dispositif d'écoute actif (Figure 44). L'impact financier et opérationnel sera donc proportionnel au nombre de canaux actif durant l'acquisition des données.

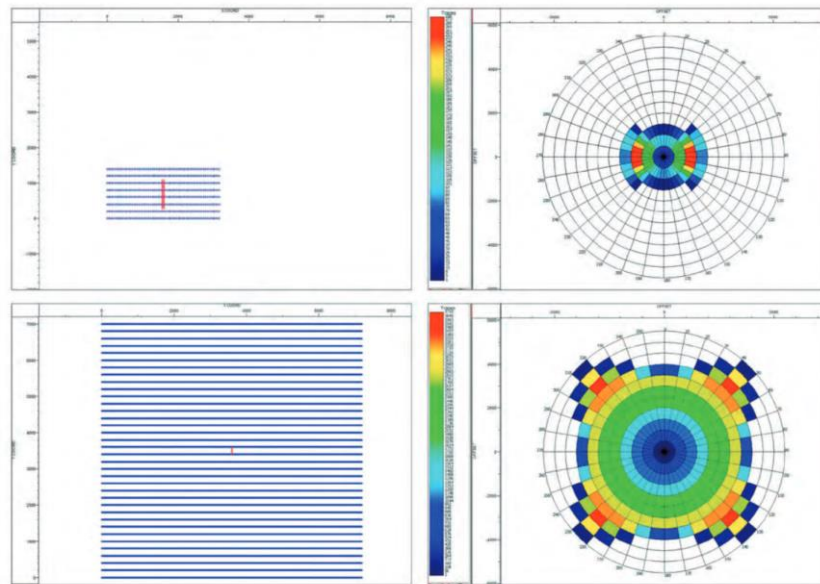


Figure 1 Acquisition template and offset-azimuth-fold coverage plots for the 1999 conventional narrow-azimuth survey (top) and the full-azimuth 2013 point-receiver survey (bottom).

Figure 44 : (à gauche) Dispositif d'écoute actif (point bleu) pour chaque salvo de tirs (en rouge). (à droite) Diagramme de Rose de la couverture azimutale en fonction de l'offset et du design d'acquisition, dit respectivement « narrow azimuth » (en haut) et « full azimuth » (en bas). (Source : (Xiao et al. 2014))

En effet, le parcours des ondes sismiques se devra d'être homogène quel que soit la direction de l'espace afin de s'affranchir au maximum des effets de réflexion sur les plans de failles (Figure 45 et Figure 46). La résolution et la localisation des failles s'en trouveront notablement améliorées.

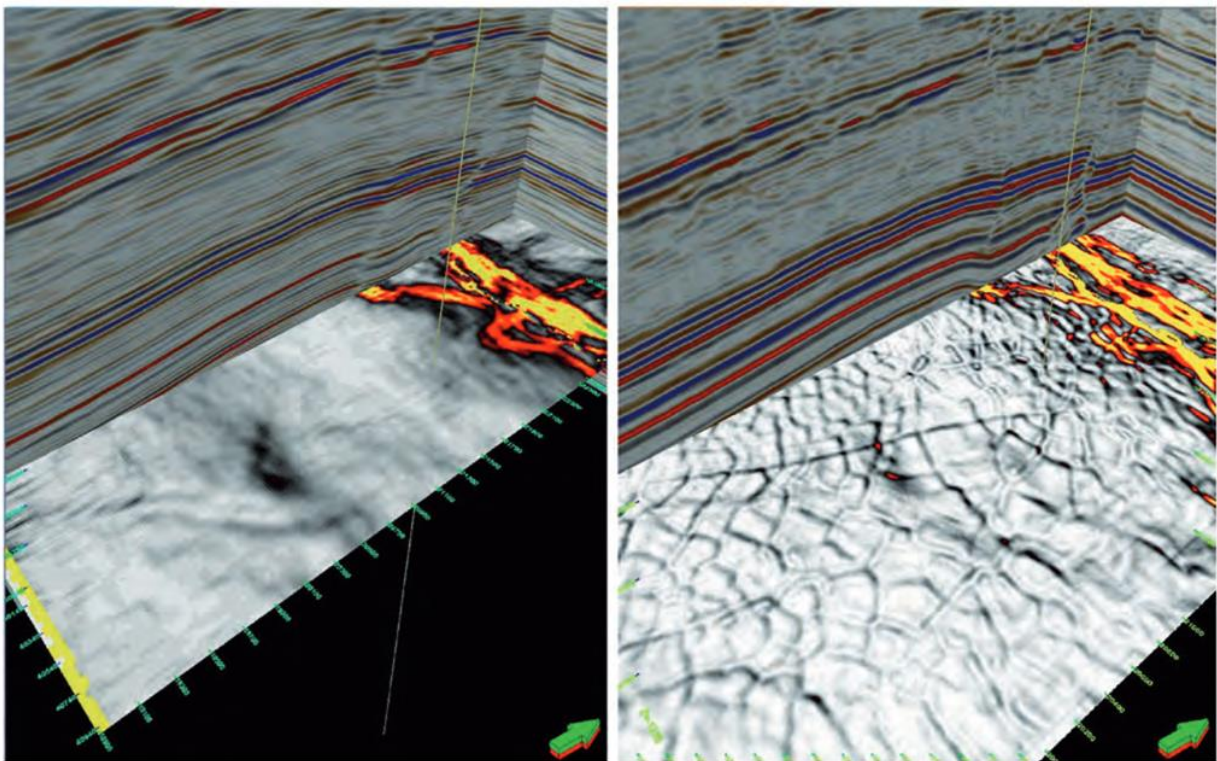


Figure 45 : Section sismique inline/crossline et attribut sismique "Cohérence" issu d'un blo sismique 3D. (Source : (Xiao et al. 2014))

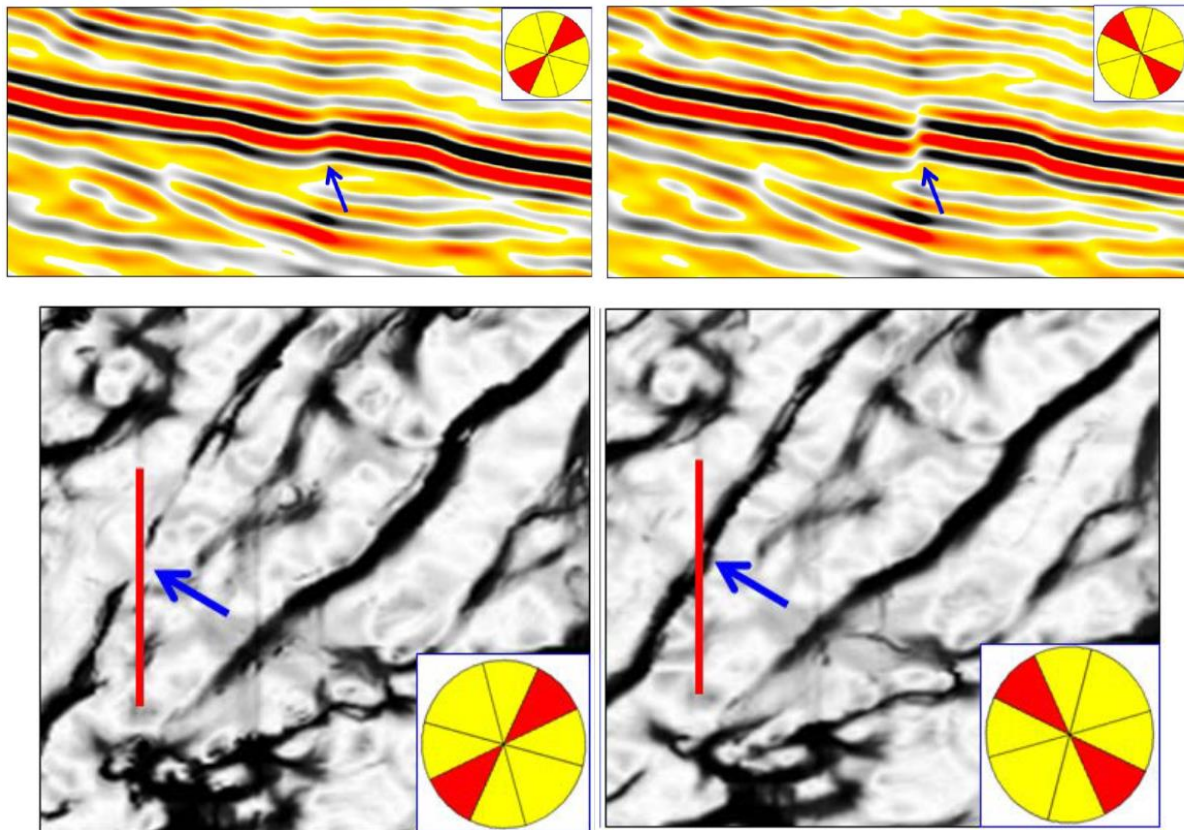


Figure 46 : Section sismique inline et attribut cohérence d'un cube de sismique 3D selon deux azimuts permettant de mettre en exergue l'importance de l'imagerie WAZ pour l'identification des failles. (Source : (Zhu et al. 2019))

Les cibles géothermales s'échelonnant entre [2 500 – 3 500]m de profondeur, il conviendra de déployer un dispositif ayant suffisamment d'offset (Figure 47 et Figure 48) afin de garantir une imagerie des failles ancrées dans le socle cristallin. Un offset d'au moins 3 500m sera à obtenir.

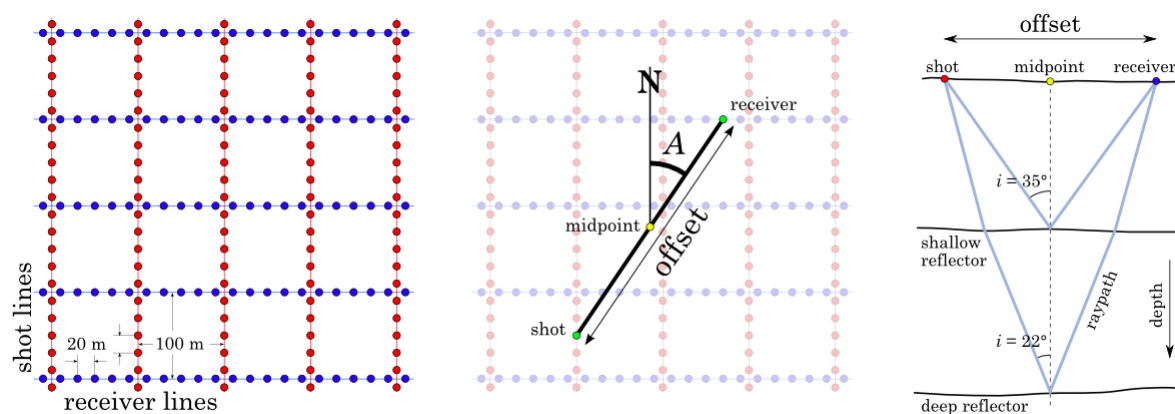


Figure 47 : Définition de l'offset, distance séparant un point de tir d'un récepteur. (Source : SEG Wiki)

Enfin, pour imaginer une zone d'intérêt en profondeur, il convient de considérer ce que l'on nomme des « marges » nécessaires autant durant l'acquisition que durant le processing. Le calcul de ces zones tampons (Figure 48) fait principalement intervenir la profondeur de la cible, le pendage des structures à imager, la vitesse de propagation, les fréquences dominantes à la cible et la grille d'acquisition.

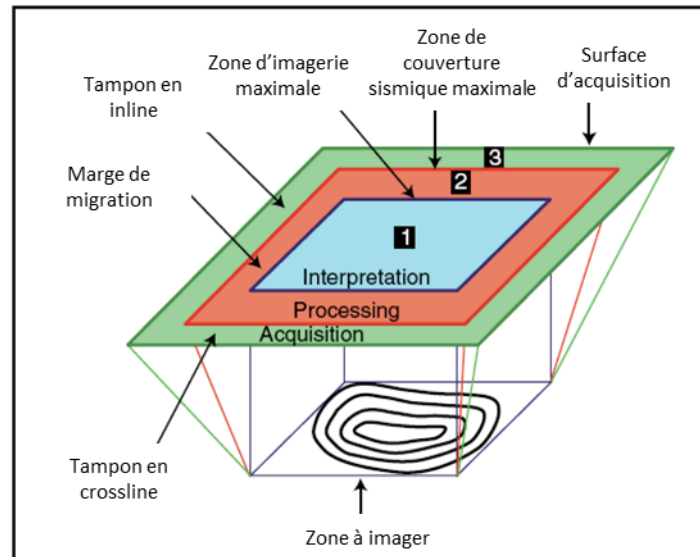


Figure 48 : Schéma des différentes marges nécessaires à l'obtention de qualité maximale d'imagerie pour une zone donnée. (Source : (Cameselle 2010))

Ainsi, une estimation conservatrice permet d'établir des marges de l'ordre de 2 km dans le contexte de la zone et de la cible à imager (Figure 49).

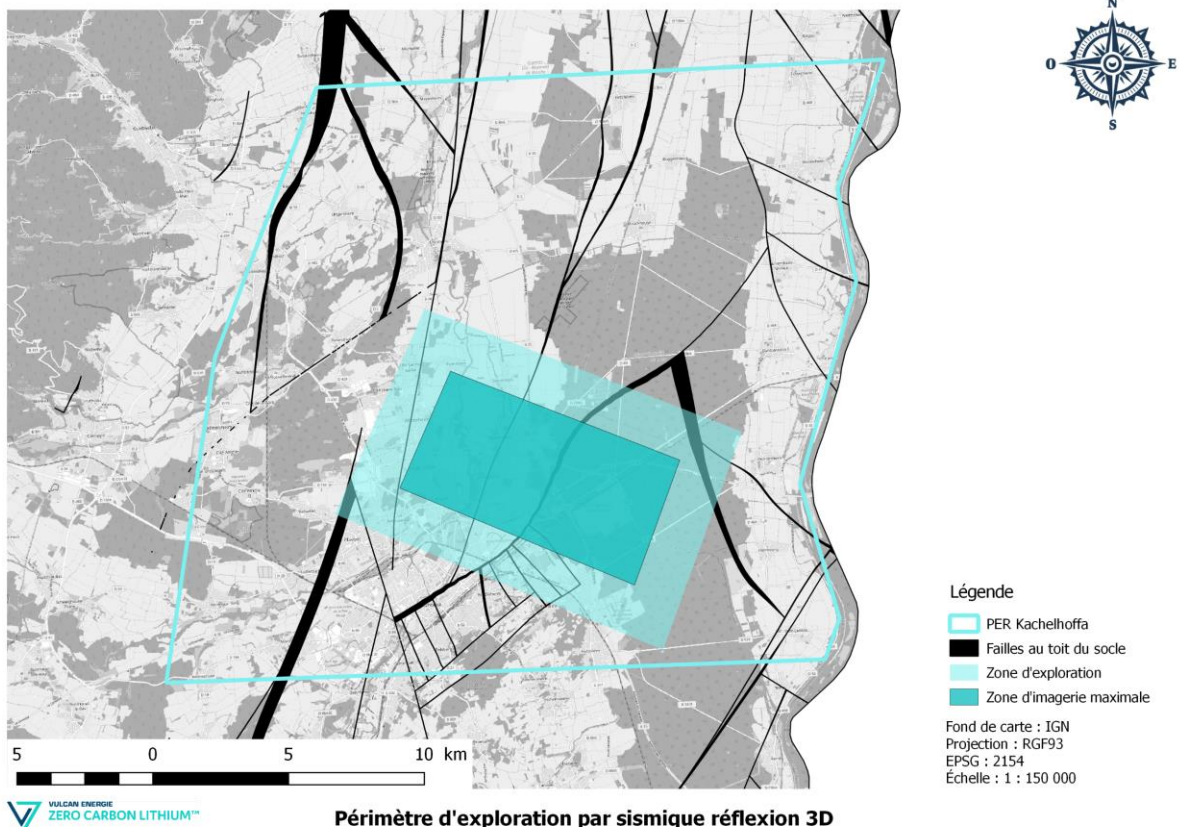


Figure 49 : Carte de l'emprise d'acquisition (en bleu transparent) nécessaire pour l'imagerie maximale du centre du dispositif (en bleu foncé). Une zone tampon de 2 km, comprenant la montée en couverture et les marges de migrations, a été considérée.

Fort du retour d'expérience de l'acquisition sismique 3D de 2018 en Alsace du Nord ((Richard et al. 2019)), une méthode d'acquisition plus agile sera proposée dans le cadre de l'acquisition d'une sismique réflexion 3D dans l'emprise du PER sollicité. L'emprise de l'exploration aura pour objectif

de couvrir les structures géologiques précédemment identifiées. Un périmètre de 100 km² (Figure 50) a donc été défini au sein du PER sollicité. Il correspond à l'acquisition sismique 3D nécessaire sur la zone 1 afin d'imager le réservoir géothermique sous-jacent. Les autres zones d'intérêts présentes dans le périmètre se verront designer des acquisitions dédiées.

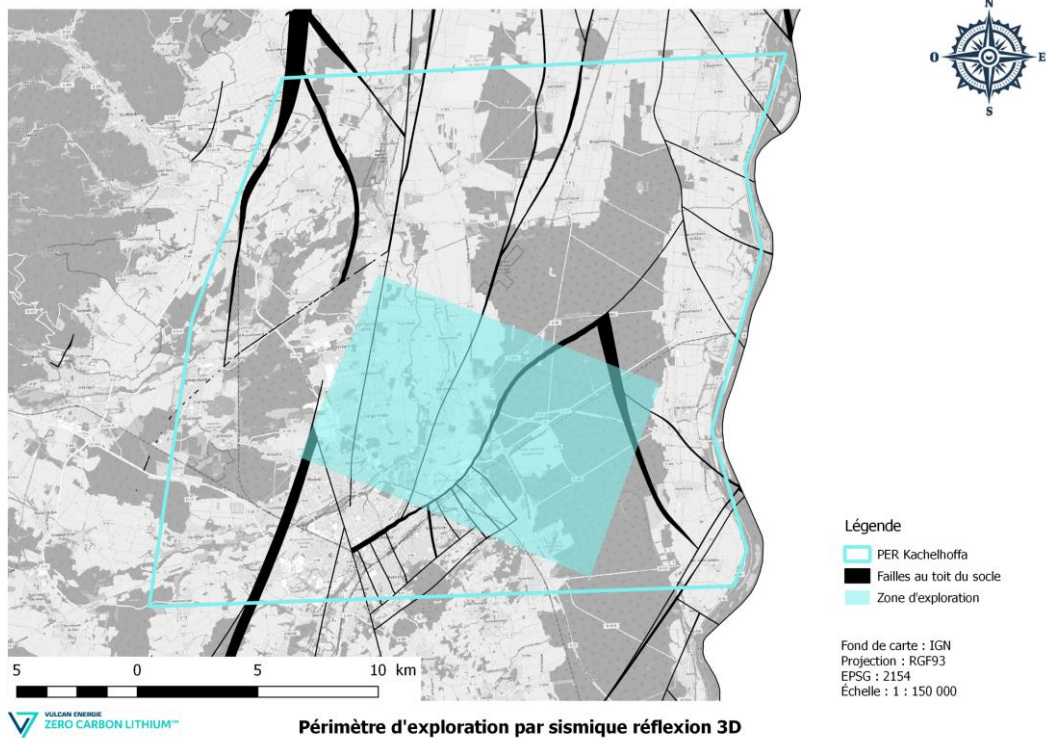


Figure 50 : Emprise du périmètre d'exploration par sismique réflexion 3D au sein du PER sollicité.

Ce périmètre d'exploration concernera des surfaces (Figure 51) accueillant principalement des forêts (46 km²), de l'agriculture (24 km²), des zones commerciales/industrielles (11 km²) et des zones résidentielles (3 km²). Ainsi, une géométrie d'acquisition adaptée à ces environnements doit d'ores et déjà être pris en compte afin d'assurer une empreinte surface la plus limitée possible.

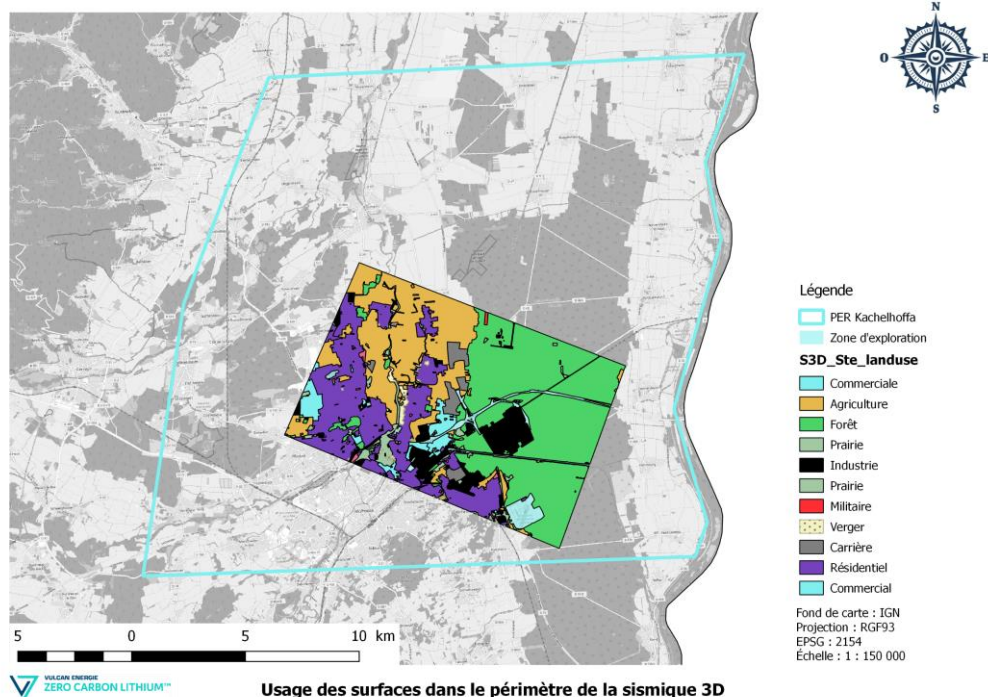


Figure 51 : Usage des surfaces dans le périmètre de l'exploration sismique du PER sollicité. (Source : OSM)

Considérant les objectifs d'imageries et la réduction de l'impact de l'acquisition, il a été architecturé une géométrie permettant d'acquérir les données le plus rapidement possible. D'un point de vue technique, la principale amélioration au regard de l'acquisition sismique 3D de 2018 en Alsace du Nord sera l'utilisation de récepteurs de type Nodes (Figure 52) ne nécessitant donc pas l'apport de capteurs analogiques comme les SG-10 ou SG-5. L'objectif premier est d'augmenter l'agilité du déploiement/repli des capteurs et d'utiliser des technologies totalement sans-fil afin de limiter le désagrément pour les agriculteurs.

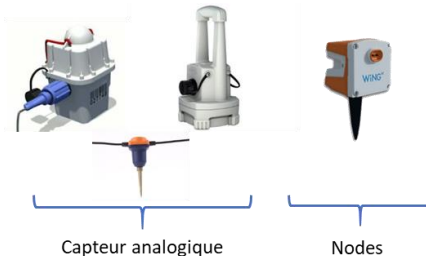


Figure 52 : Exemple de dispositifs d'enregistrement des données sismiques. (Source : Sercel)

A la différence des 6 géophones en série dans le cas d'une bretelle de SG-10, le Node ne permet aucune redondance d'information ni aucun filtrage spatial du bruit par le layout de déploiement. Ainsi, il sera proposé de réduire l'inter-trace (distance entre 2 récepteurs) par rapport à l'acquisition sismique 3D de 2018 (Tableau 4). Par ailleurs, comme l'acquisition sera WAZ (Figure 44), l'orientation des lignes sismiques au regard des structures géologiques n'est pas critique comme cela pourrait être le cas dans le cadre d'une acquisition sismique 2D. Ainsi, une géométrie d'acquisition orienté NNW-SSE en ligne réceptrice est proposée dans ce design initial (Figure 53).

Distance entre ligne récepteur	Nombre de lignes	Distance entre récepteur	Type de récepteur	Nombre de traces
200 m	42	20 m	Node	~27 000

Tableau 4 : Description de la géométrie d'acquisition en termes de réception des données sismiques.

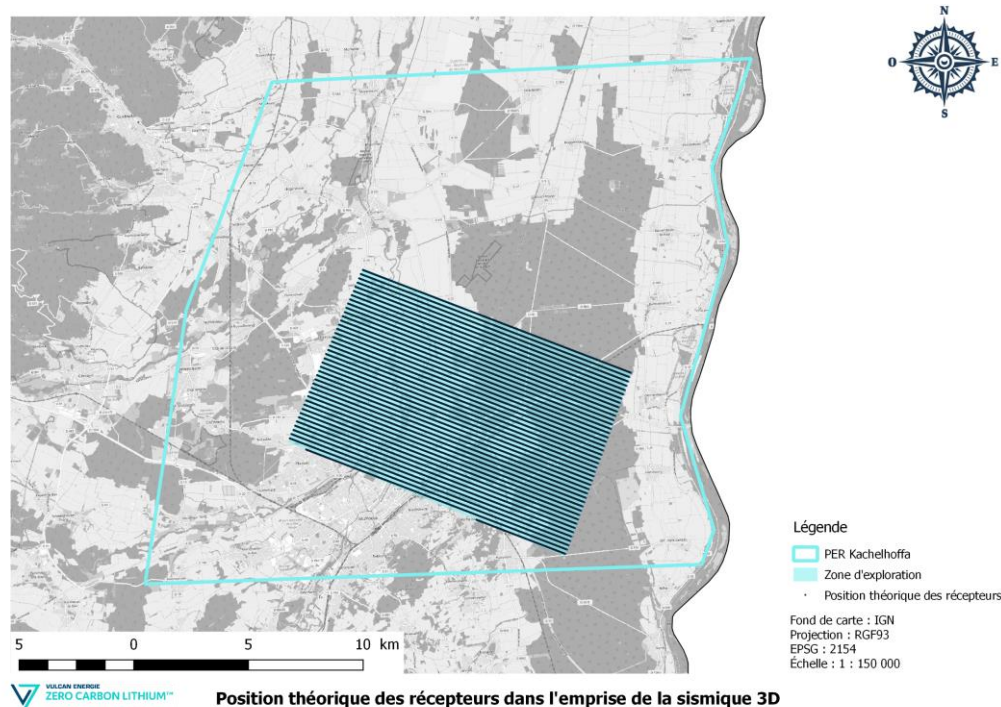


Figure 53 : Géométrie de déploiement des capteurs sismiques dans le cadre de l'exploration par sismique 3D.

Considérant les objectifs d'imagerie, un des challenges principal est de parvenir à soustraire le bruit ambiant et le bruit induit par l'émission même de la vibration acoustique appelé « ground-roll ». Cette soustraction est réalisée en créant un modèle numérique car l'échantillonnage spatial de la sismique de 3D de 2018 s'est avérée insuffisant (Figure 54). Ainsi, en plus de l'aspect redondance d'information, une autre justification à la réduction de l'inter-trace est d'améliorer notablement la suppression du bruit.

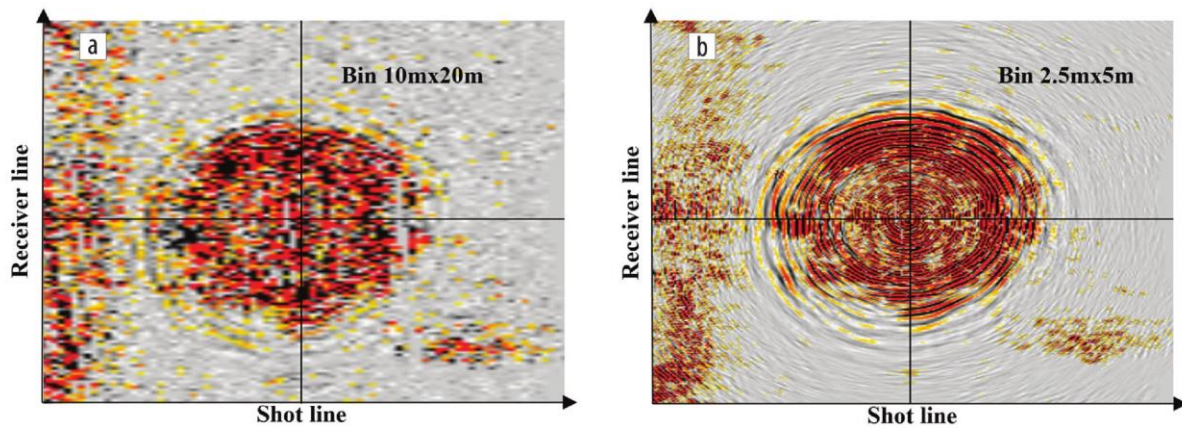


Figure 54 : a) Coupe en temps de l'acquisition sismique 3D en Alsace du Nord présentant le bruit issu d'un point de vibration et b) la modélisation permettant la soustraction dans les données. (Source : (Salaun et al. 2020))

De la même façon que les récepteurs, une géométrie spécifique pour les sources (les camions vibrateurs) doit être établie. Afin, de conserver une stratégie visant à diminuer l'empreinte sur les activités en surface, il sera proposé d'utiliser un vibreur unique par flotte. La nécessaire perte de puissance par rapport aux flottes de plusieurs vibrateurs sera compensée par une augmentation du nombre de points vibrés (PV). De plus, des technologies de pointe permettent d'utiliser plusieurs camions vibrateurs à différent endroit du périmètre d'acquisition permettant ainsi d'augmenter le nombre de PV / jours ((Gillot n.d.)). Un maillage orthogonal en position récepteurs et sources (Figure 55) est la géométrie la plus fréquente car permettant la mise en œuvre aisée des algorithmes de traitements.

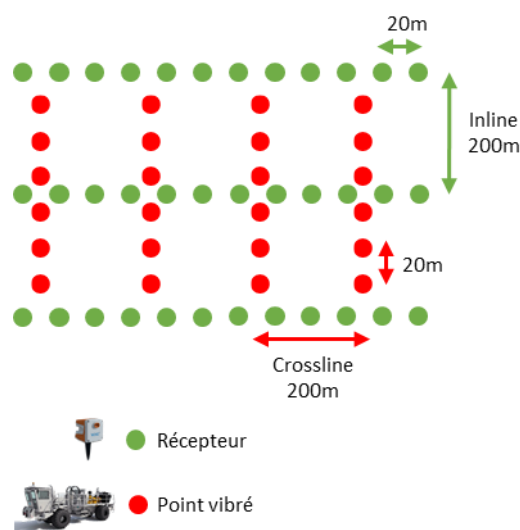


Figure 55 : Géométrie d'acquisition orthogonal proposée dans le cadre de la sismique 3D mise en œuvre sur le périmètre de l'exploration.

Cette géométrie permettrait d'aboutir à un bin (Figure 56) de 10m x 10m se rapprochant de l'échantillonnage nécessaire pour résoudre le bruit provenant du ground-roll (Figure 54).

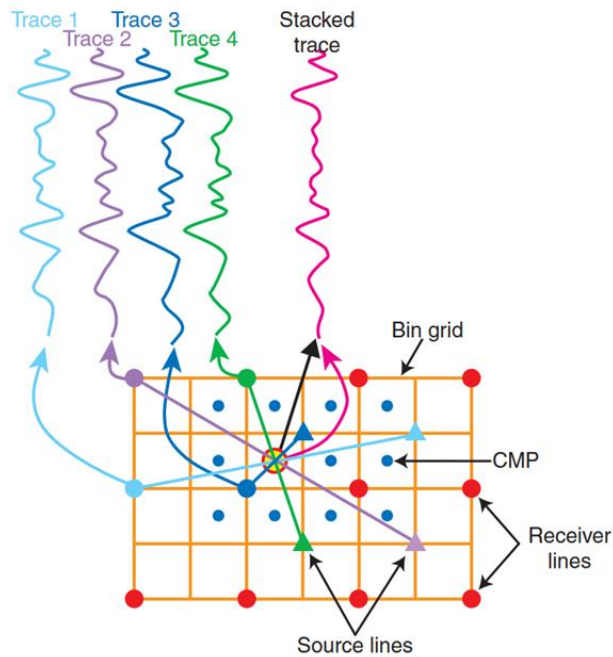


Figure 56 : Schéma explicatif de la notion de bin en sismique réflexion. Il est défini par la demi longueur de l'inter-trace et de l'inter-PV soit dans le cas proposé 10mx10m. (Source : (Cameselle 2010))

Si le déploiement des capteurs sur le terrain n'est que très peu impactant sur la faune et la flore (déplacement en véhicule uniquement sur route et chemin et déplacement à pied dans les champs et les forêts), l'impact du passage des camions peut se révéler plus contraignant. Ainsi, le maillage théorique (Figure 57), comprenant plus de 27 000 PV, sera dégradé afin de réduire cet impact.

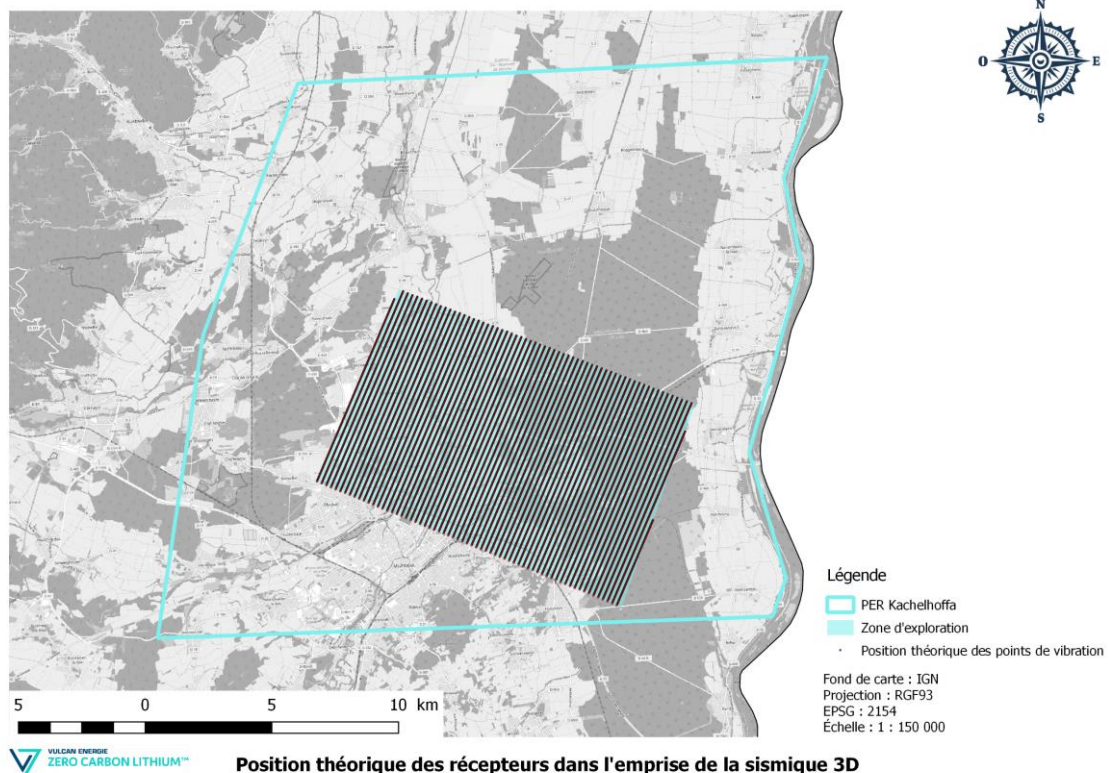


Figure 57 : Positions théoriques des points vibrés au sein du périmètre exploré.

Conventionnellement, il est d'usage de déporter les positions théoriques des points de vibrations sur les routes et chemins les plus proches (Figure 58).

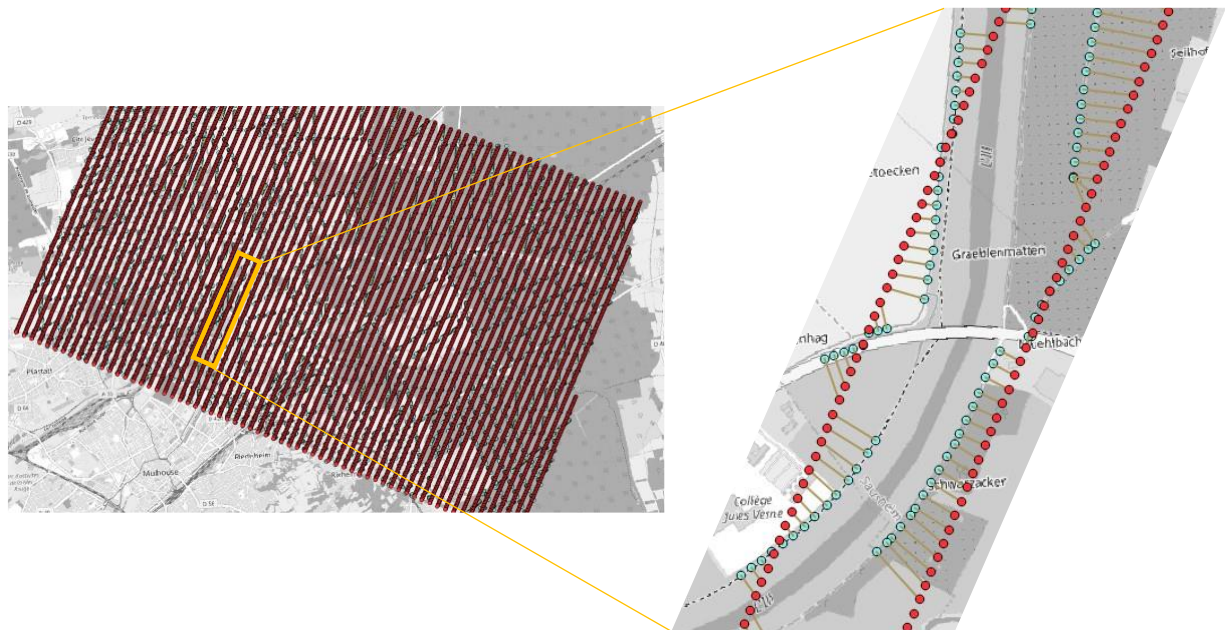


Figure 58 : Exemple de déport de PV de la position théorique vers une route.

Ce déport permet d'avoir une estimation plus crédible du nombre de points vibrés réellement envisageable dans le périmètre exploré. Il en résulte qu'environ **18 000 points vibrés** sont réalisables par le biais de cette méthode de repositionnement de positions sources (Figure 59).

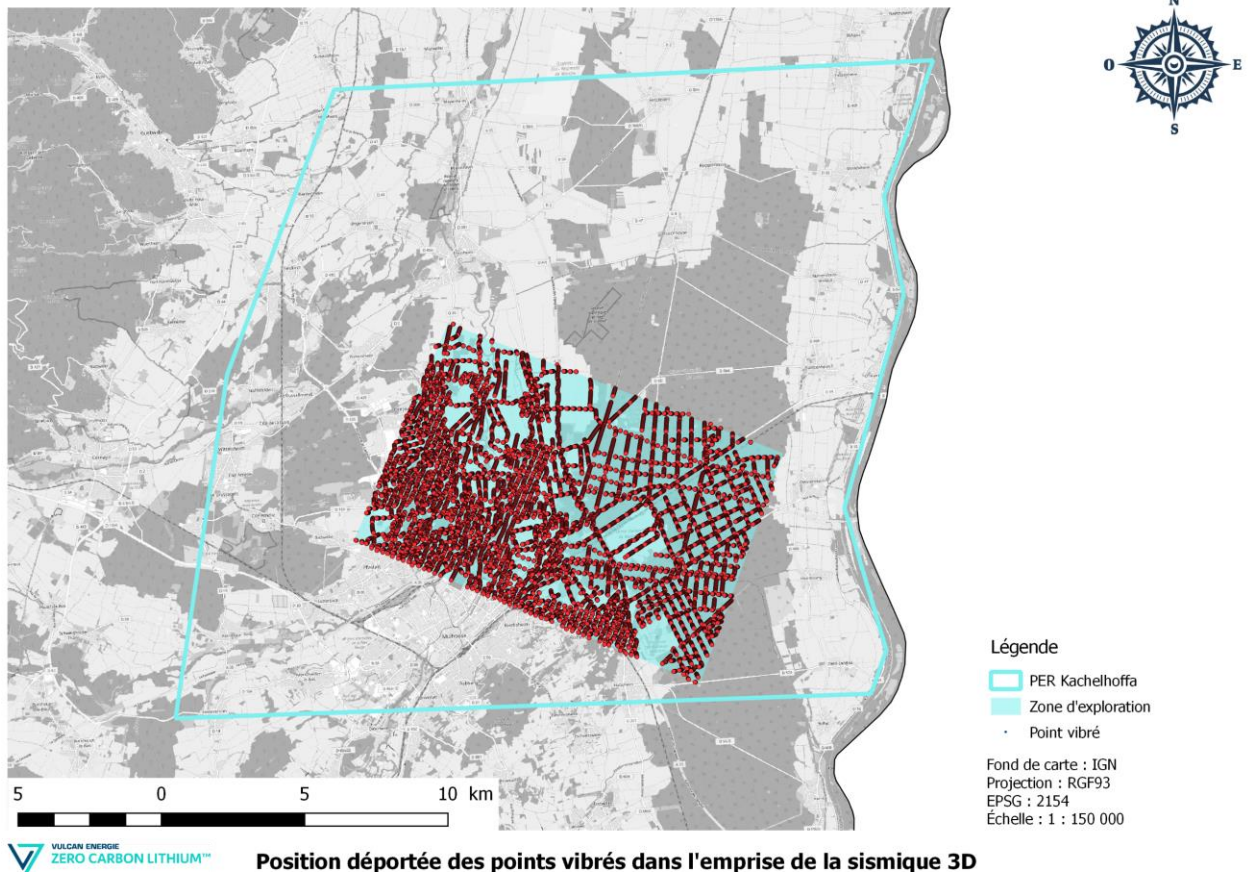


Figure 59 : Carte des points de tirs (18 000) déportés sur les routes et chemins du périmètre d'acquisition.

Une autre méthode de déport consisterait à ne plus considérer le maillage orthogonal et de placer des points vibrés tous les 20m (Figure 60) sur toutes les routes et tous les chemins disponibles en modulant uniquement la densité de PV / km² (forte densité de routes en ville, faible nombre d'accès en forêt). Ce type de géométrie source nécessitera une validation par les équipes de processing afin de confirmer que les algorithmes seront en mesure d'utiliser des positions sources ne respectant pas de facto la géométrie orthogonale.

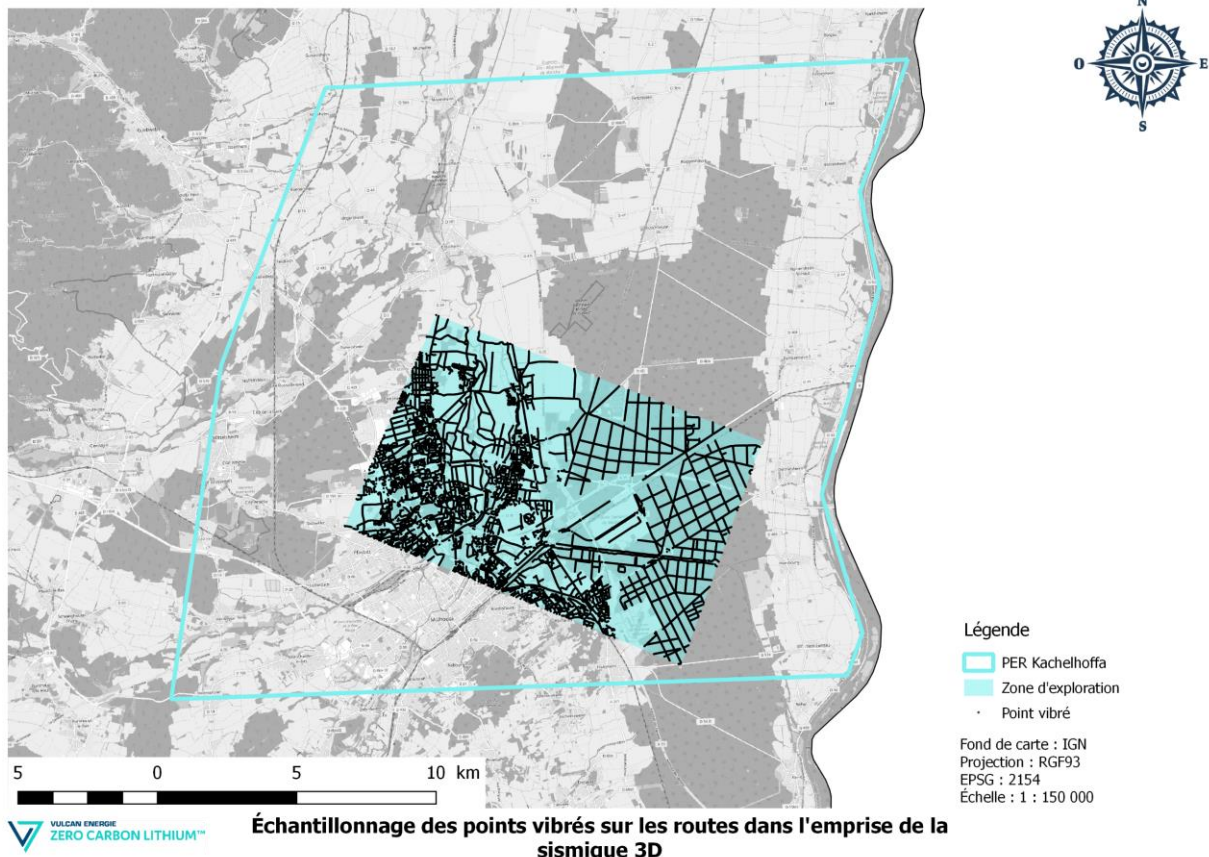


Figure 60 : Carte des points de tirs (24 000) échantillonnés sur les routes et chemins du périmètre d'acquisition.

La comparaison des Figure 59 et Figure 60 montre qu'à nombre égal ou supérieur de PV il sera possible d'envisager plusieurs types de géométrie afin de s'adapter au mieux aux contraintes surfaces.

Ces éléments de design peuvent être mis en regard de la sismique 3D acquise en 2018 en Alsace du Nord. Cette dernière avait mis en œuvre les paramètres présentés dans le

Tableau 5.

Design	Distance entre ligne récepteur	Nombre de lignes	Distance entre récepteur	Type de récepteur	Nombre de traces et densité
Sismique 3D de 2018 (180 km ²)	200 m	90	40 m	String 6xSG-10 WTU / RAU	~23 000 127 traces/km ²
Design Vulcan Énergie France (100 km ²)	200 m	42	20 m	Nodes	~27 000 252 traces/km²

Design	Distance entre ligne source	Distance entre point vibré	Densité de PV	Type de source	Camion actif
Sismique 3D de 2018	320 m	20 m	150 PV/km ²	Camion vibreur M26	4 à 6
Design Vulcan Énergie France	200 m	20 m	168 PV/km²	Camion vibreur M26 / Prakla	9

Tableau 5 : Comparaison de la géométrie d'acquisition proposée avec les paramètres sources et récepteurs de la sismique 3D acquise en Alsace du Nord. (Source : (Richard et al. 2019) et (Salaun et al. 2020))

Les autres zones d'intérêts du périmètre sollicité seront également explorées par sismique réflexion 3D. Il sera possible de produire in fine un modèle géologique plus global en intégrant toutes les sismiques. Cela sera possible en prévoyant d'ores et déjà le recollement des différentes acquisitions (Figure 61).

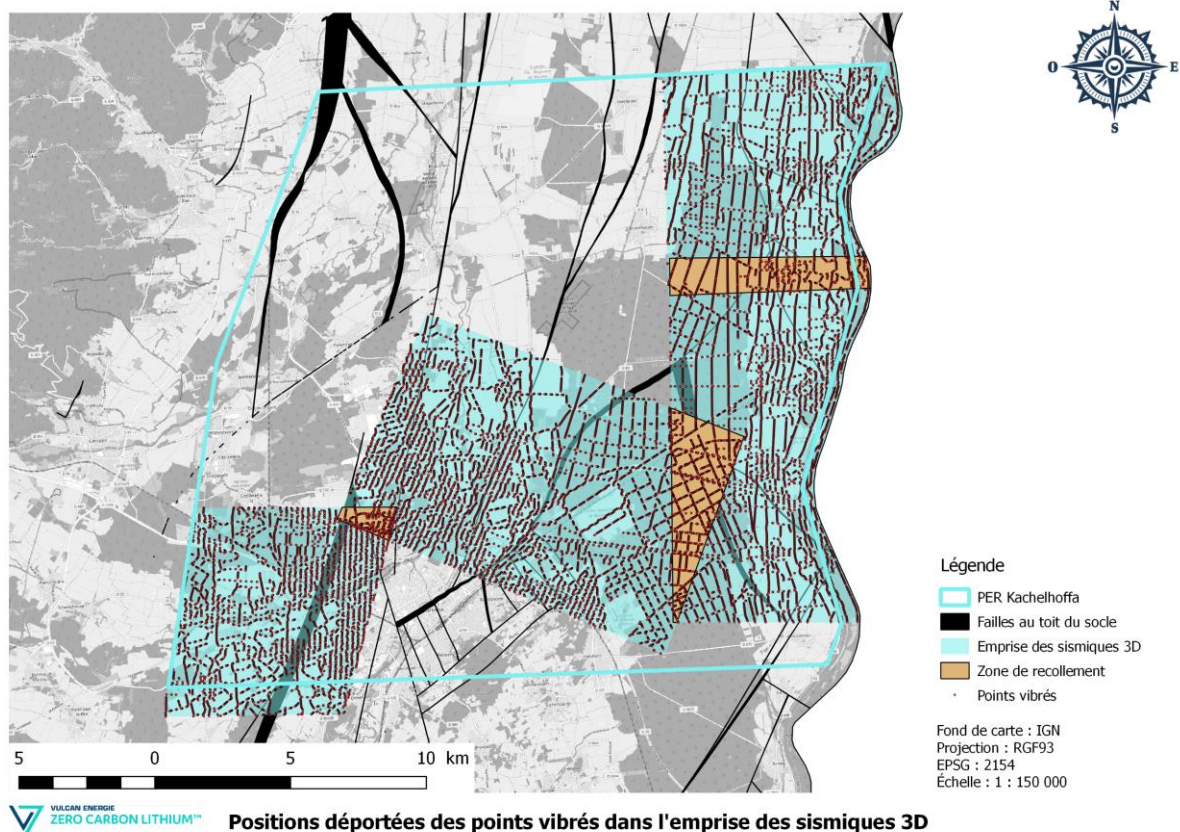


Figure 61 : Ensemble des sismiques 3D prévues sur l'emprise sollicitée.

La zone 2 et 3 demeurent particulière dans le sens où il conviendrait de réaliser une acquisition transfrontalière afin d'assurer une imagerie maximale côté français. Bénéficiant d'une très forte implantation en Allemagne, le groupe Vulcan sera en mesure de permettre ce type d'acquisition à cheval sur 2 pays. Dans le cas contraire, il apparaît que les paramètres sélectionnés permettront tout de même d'assurer une imagerie de très bonne qualité (Tableau 6).

La zone 4 présente la particularité d'avoir déjà été explorée par une sismique 3D dans le cadre de la caractérisation du diapir de sel présent entre Réguisheim et Ensisheim et ayant permis à l'édiction de la concession de stockage souterrain dit « Alsace Sud ». Ainsi, afin de limiter le désagrément pour les populations, ces données seront achetées afin de d'y caractériser cette fois-ci le possible réservoir géothermique. Si ces données venaient à ne pas correspondre au standard attendu ou

n'apportant pas suffisamment d'informations sur le réservoir recherché, une campagne sismique complémentaire serait mise en œuvre.

Zone	Nombre de PV	Nombre de capteurs	Densité de PV	Densité de récepteur
Zone 2* (84 km ²)	17 000	20 000	202 PV/km ²	238 traces/km ²
Zone 3* (60 km ²)	13 000	16 000	216 PV/km ²	260 traces/km ²
Zone 4 (50 km ²)	Données existantes			
Zone 5 (54 km ²)	11 000	13 000	203 PV/km ²	240 traces/km ²

Tableau 6 : Caractéristiques des acquisitions sismiques prévues sur le périmètre sollicité. *Ne prend en compte que les caractéristiques d'une acquisition limitée à la France.

Concernant le traitement et l'interprétation des données, il s'agira de mettre en œuvre un important travail afin d'assurer un rendu final de type PSDM (Pre-Stack-Depth-Migration) (Figure 62). Le paramètre clef permettant la conversion temps/profondeur est le model de vitesse qui plus est dans une géologie structurale engendrant une forte anisotropie.

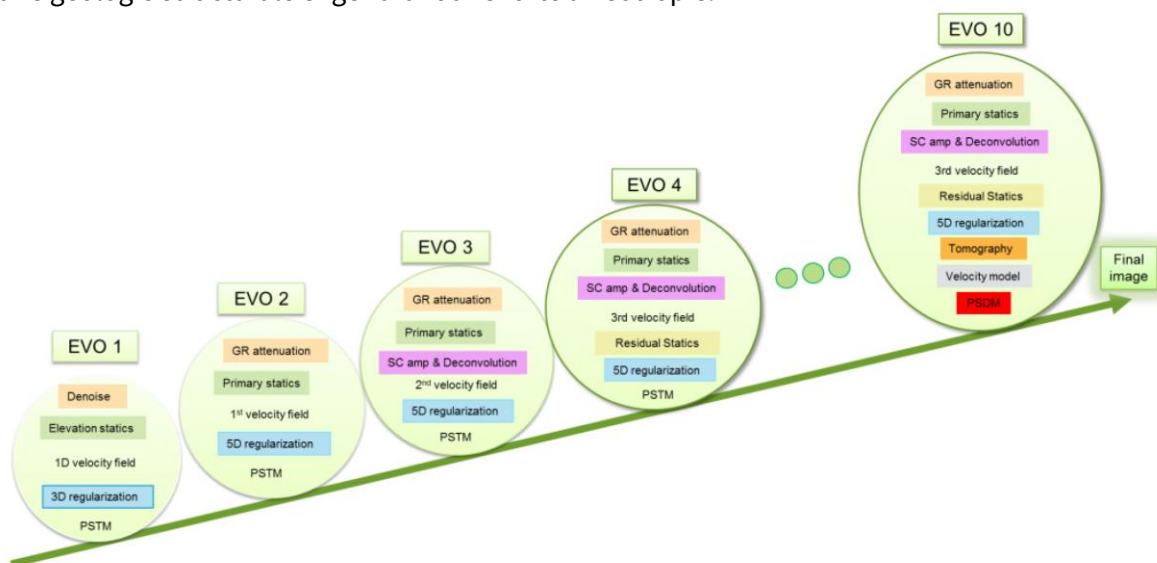


Figure 62 : Description du workflow de traitement de la sismique 3D de 2018 en Alsace du Nord. (Source : (Richard et al. 2020))

Si la capacité d'imagerie des failles profondes ne fait que peu de doute au regard du retour d'expérience des sismiques 3D acquises dans le Fossé Rhénan que ce soit côté Français ou comme actuellement en cours côté Allemand à Südpfalz par Vulcan Energie Ressourcen GmbH, il en va tout autrement en ce qui concerne la capacité d'inférer des zones plus circulantes que d'autres. Cependant, les ondes sismiques possèdent la particularité d'être, soit de pression (ondes dites P), soit de cisaillement (ondes dites S). La propagation de ces ondes se trouvent alors notablement différentes lors de la traversée du sous-sol et en particulier dans les milieux comprenant des fluides. Cette différence de propagation a d'ores et déjà été mise à profit dans la filière O&G afin d'imager des zones d'ombre dans les données sismiques ou afin d'inférer de potentiels réservoirs à hydrocarbures (Figure 63).

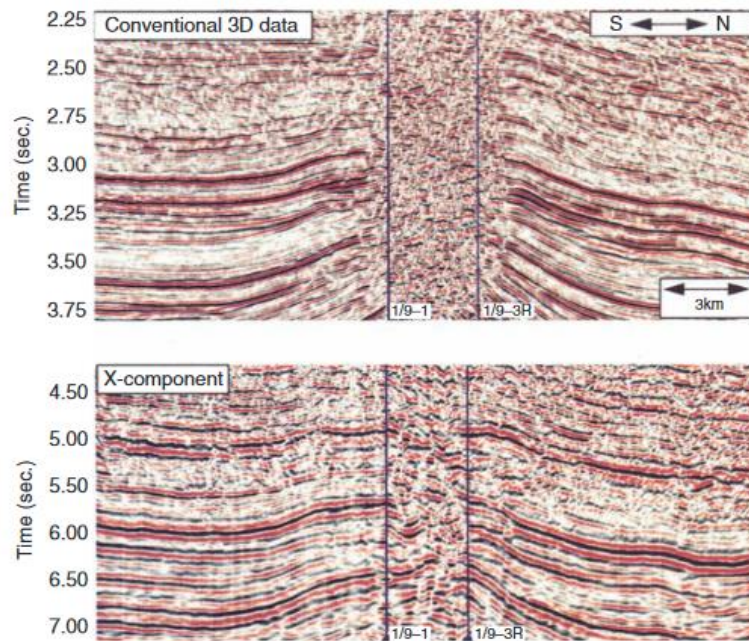


Figure 63 : Imagerie comparative entre une section ne considérant que la contribution verticale du signal sismique (en haut) et une section considérant la composante transverse (en bas). (Source : (Thomas L. Davis, 2019))

Pour ce faire, il est nécessaire d'acquérir des données sismiques grâce à des capteurs enregistrant les 3 composantes du déplacement du sol (Figure 64).



Figure 64 : (à gauche) Schéma explicatif de l'orientation des 3 composantes d'un signal sismique (Source : British Geological Survey). (à droite) Exemple d'un capteur analogique 3 composantes (Source : Constructeur Pasi).

Cependant, les sources sismiques conventionnelles n'émettent de façon contrôlée que des ondes de pression (onde P). Ainsi, les données sismiques acquises ne bénéficieront que d'ondes S provenant de phénomènes de conversion onde P → onde S à l'interface de certains réflecteurs. Afin de pouvoir assurer une imagerie en onde S de façon uniforme sur l'emprise à explorer, il conviendra donc de mettre en œuvre une source sismique émettant des ondes S. Pour ce faire il existe plusieurs possibilités techniques.

La première consiste à utiliser 4 vibrateurs onde P en opposition de phase permettant d'induire une onde S (Figure 65).

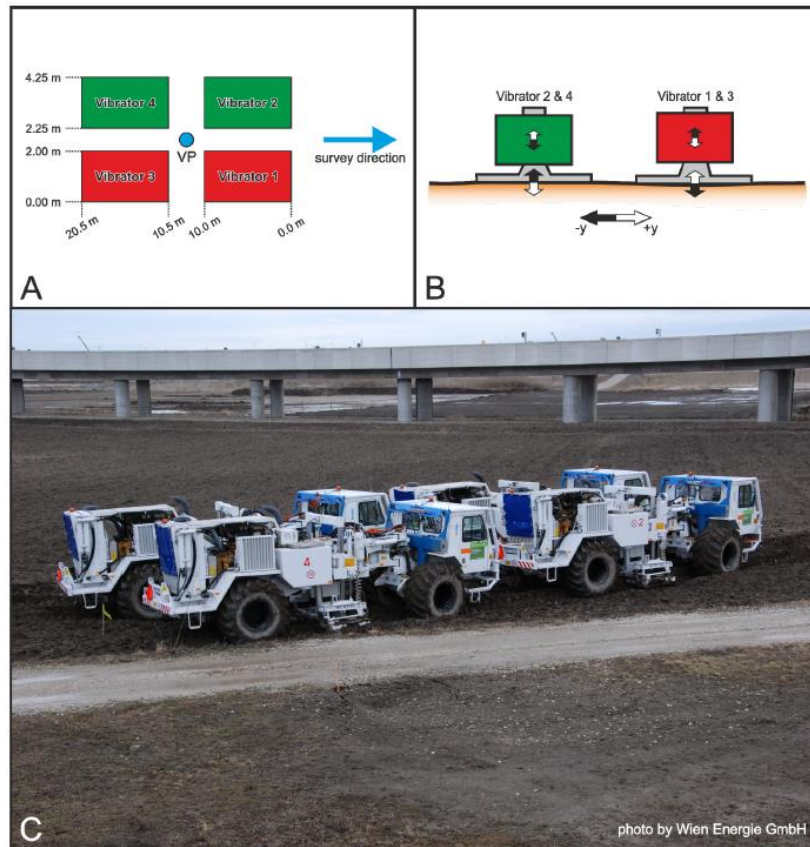


Figure 65 : (A, B) Schéma simplifié de la technique Hoover consistant à utiliser 4 camions vibrateurs en déphasage afin de générer une onde transverse. (C) Mise en œuvre opérationnelle de cette technique lors d'une campagne d'exploration pour la géothermie en Autriche. (Source : (Schreilechner et al., 2017))

La seconde consiste à directement employer des camions vibrateurs dont la plaque mobile a été adaptée afin d'émettre des ondes S (Figure 66). Si la première méthode pose le problème de l'impact en surface du déploiement simultané de 4 camions vibrateurs, la seconde pose le problème de la faible puissance du type de vibrateurs ayant cette plaque.

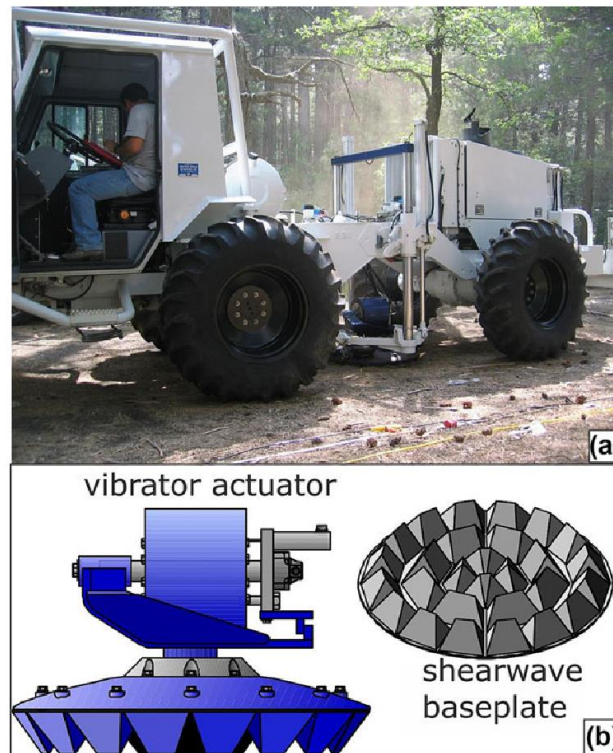


Figure 66 : Camion vibreur de type MiniVib III équipé de la plaque mobile dédiée à l'émission d'ondes S. (Source : (Di Giulio et al., 2019))

Enfin, la dernière méthode consiste à mettre en œuvre des sources sismiques piézoélectriques enterrées initialement dédiées à l'imagerie 4D des champs pétrolifères à huiles lourdes (Figure 67). Ce type d'équipement ne possède qu'une faible puissance d'émission mais peut être compensée en fonctionnant de manière continue.



Figure 67 : Mise en œuvre au Canada et en Hollande, ces sources sismiques enterrées ont permis le suivi de réservoir pétrolier en 4D et se trouve être des sources d'ondes S. (Source : (Cotton, 2019))

L'intérêt de ces méthodes d'acquisition 3D-3C en onde S pour la sécurisation des projets de géothermie profonde a d'ores et déjà été identifié côté Allemand avec la mise en œuvre d'une acquisition de ce type dans le cadre d'une campagne exploratoire au droit de la ville de Munich (Figure 68).

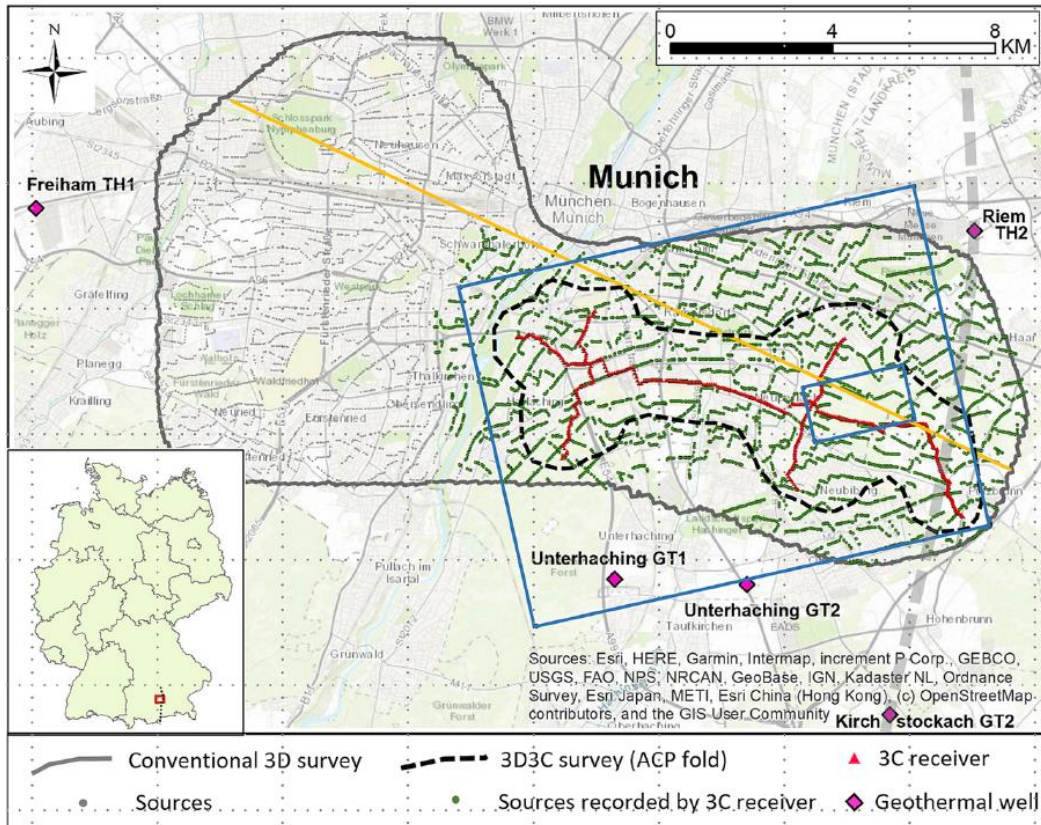


Figure 68 : Mise en œuvre d'une acquisition sismique 3D-3C au droit de la ville de Munich en Allemagne pour la sécurisation du développement de projets de géothermie profonde. (Source : (Wawerzinek et al., 2021))

Ainsi, Vulcan Énergie France mettra en œuvre dans le cadre de son programme exploratoire une campagne d'acquisition sismique 3D-3C, à l'instar de la campagne sismique 3D-3C mise en œuvre sur la ville de Munich, en déployant au sein de l'emprise à explorer une large quantité de capteurs 3 composantes. A cela sera adjoint l'utilisation de camions vibrateurs onde S de type MiniVib ainsi que le déploiement de sources sismiques piézoélectriques enterrées. Ces données feront dès lors l'objet de traitement des plus avancés dans le domaine de la géophysique afin d'identifier des zones de présences de fluides géothermales (Figure 69).

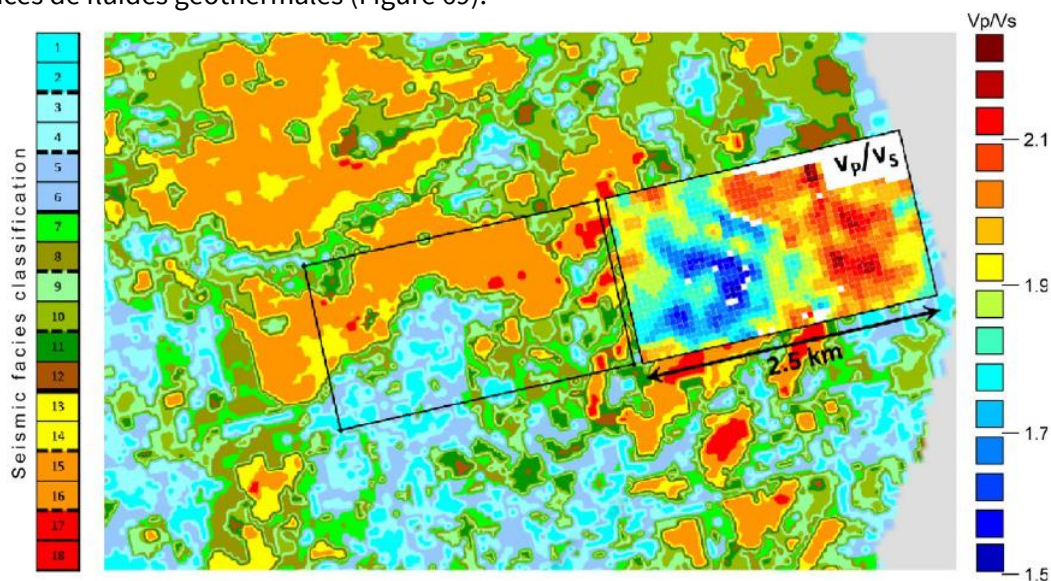


Figure 69 : Traitement des données 3C de la campagne d'exploration de Munich avec la cartographie des variations du rapport de vitesses entre les ondes P et les ondes S. (Source : (Wawerzinek et al., 2021))

5.2 Planning

A la différence de la méthode CSEM qui est préférentiellement mise en œuvre en automne, la sismique réflexion nécessitant l'usage de camion vibreur et de capteurs acoustiques déployés en surface, il conviendra de réaliser cette campagne durant l'été idéalement entre les mois de juillet et septembre (Figure 71).

La mise en œuvre d'une acquisition sismique 3D répond à un management de projet bien défini dans lequel plusieurs étapes seront déclinées (Figure 70) :

1) Élaboration du design avancé

Durant cette phase, un recensement fin des routes sera réalisé avec une validation sur le terrain. Dès lors, le positionnement des PV se fera nettement plus précis afin de préparer les documents de la Demande d'Ouverture de Travaux (DOT).

2) Consultations d'entreprises

Sur la base du design théorique avancé, une consultation sera faite auprès des entreprises de services géophysiques afin de comparer le type de matériel, autant source que récepteur, proposé ainsi que le coût financier de l'opération. Une attention particulière sera accordée aux critères HSE afin de s'assurer que l'entreprise sélectionnée respecte les règles en vigueur au sein de Vulcan Énergie France. Un listing exhaustif des incidents ayant été rencontrés par les entreprises consultées sera demandé et évalué.

3) Procédure administrative

Après la sélection de l'entreprise géophysique, l'intégralité des paramètres techniques pourront être arrêtés et détaillés dans un dossier de Déclaration d'Ouverture de Travaux transmis à la Préfecture du Bas-Rhin qui coordonnera l'instruction du dossier par ses services afin de s'assurer de la conformité, et de la sûreté de l'opération d'exploration. En particulier seront vérifiées les puissances d'émissions des ondes acoustiques (une certification par l'APAVE sera produite), la considération des distances de sécurités (bâtis et réseaux) et le respect des enjeux environnementaux.

4) Information au public

De nombreuses actions de communication seront mises en œuvre afin d'informer les populations sur la teneur du projet, son intégration dans le territoire et les objectifs de cette campagne d'imagerie. Ces actions seront faites par tous types de vecteurs de communication tels que les journaux locaux, les élus du territoire, durant des réunions d'informations, etc. Il est important de noter qu'une campagne exploratoire est bien souvent le premier contact en phase opérationnelle avec les habitants vivant dans le périmètre du PER sollicité. Au-delà de la simple acquisition de données d'imagerie, c'est bien la finalité du projet qui sera à présenter.

5) Permitting

Chaque route, chemin, sentier, parcelle traversée aura au préalable nécessité l'accord du gestionnaire/propriétaire. Ainsi, une équipe dédiée, appelée Permitmen, aura en charge la rencontre, l'information et la validation avec toutes les parties prenantes.

6) Base vie

Une mission d'acquisition peut rassembler durant une période assez courte de nombreux intervenants. Il est ainsi d'usage d'établir une base vie qui accueille personnel et équipement durant toute la mission. Au sein de cette base vie sont gérés le HSE, la logistique et le suivi des opérations.

7) Déploiement des capteurs

Le déploiement des capteurs sismiques s'effectue par de petites équipes de 5 personnes comprenant un chauffeur, un topographe et 3 membres d'équipe. Circulant dans des pick-up (équipés de limiteur de vitesse ainsi que de tracker GPS), ils rejoignent le début d'une ligne avant de poursuivre à pied en déposant et en validant par GPS chaque position de capteur.

8) Début de l'acquisition

Dès lors que suffisamment de capteurs auront été déployés, les camions vibrateurs pourront débuter leur campagne de tirs consistant à respecter un parcours GPS prédéfini les emmenant sur chaque position de l'étude de design. Une fois en place, l'émission acoustique est produite par une plaque vibrant selon toute une gamme de fréquence (qu'on appelle le sweep). Cette vibration est émise pendant environ 1 minute après quoi le camion vibrateur s'avance de 20m et reproduit la même action. Ces camions vibrateurs sont accompagnés par une équipe avant et arrière qui assure la sécurité durant l'acquisition.

9) Fin de mission

A la fin de la mission, l'intégralité des équipements sont récupérés et démobolisés. Les permitmen s'assurent que les impacts sur cultures ont bien été identifiés et sont suivi par une procédure de dédommagement.

10) Traitement et interprétation des données

Les données de sismique terrestre nécessitent un important travail de traitements algorithmiques afin de supprimer tous les différents types de bruits qui viennent noyer les signaux des ondes réfléchies. Dès lors que les données auront été débruitées, débutera le travail d'interprétation des couches géologiques et des failles permettant, *in fine*, d'aboutir un model en trois dimensions du sous-sol.

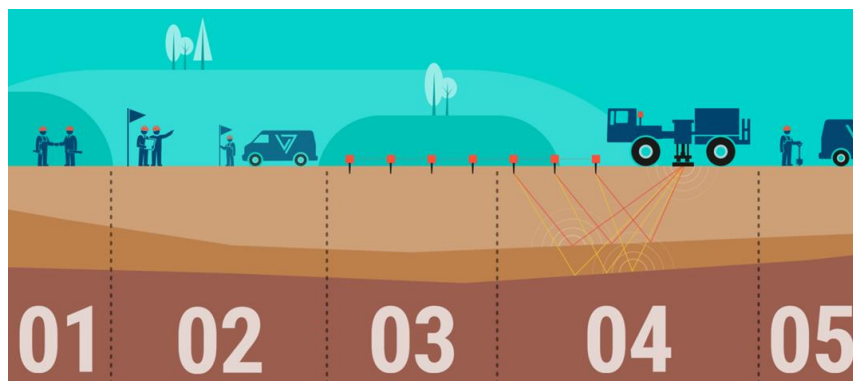


Figure 70 : Schéma simplifié des étapes pour lesquels une présence sur le terrain sera nécessaire. 1) Permuting afin d'obtenir les autorisations de passages. 2 et 3) Marquage des positions des récepteurs et déploiements des capteurs. 4) Arrivée des camions vibrateurs et début de l'acquisition des données. 5) Récupération des capteurs. (Source : Vulcan Énergie France)

Nom	Date de début	Date de fin
▼ Sismique réflexion 3D - Zone 1	19/08/2024	27/03/2026
Design sismique 3D	19/08/2024	08/11/2024
DOT (Déclaration d'Ouverture de Travaux)	11/11/2024	14/03/2025
Déploiement des capteurs	17/03/2025	06/06/2025
Début des PV	09/06/2025	29/08/2025
Démobilisation	01/09/2025	31/10/2025
Traitement	01/09/2025	02/01/2026
Interprétation	05/01/2026	27/03/2026

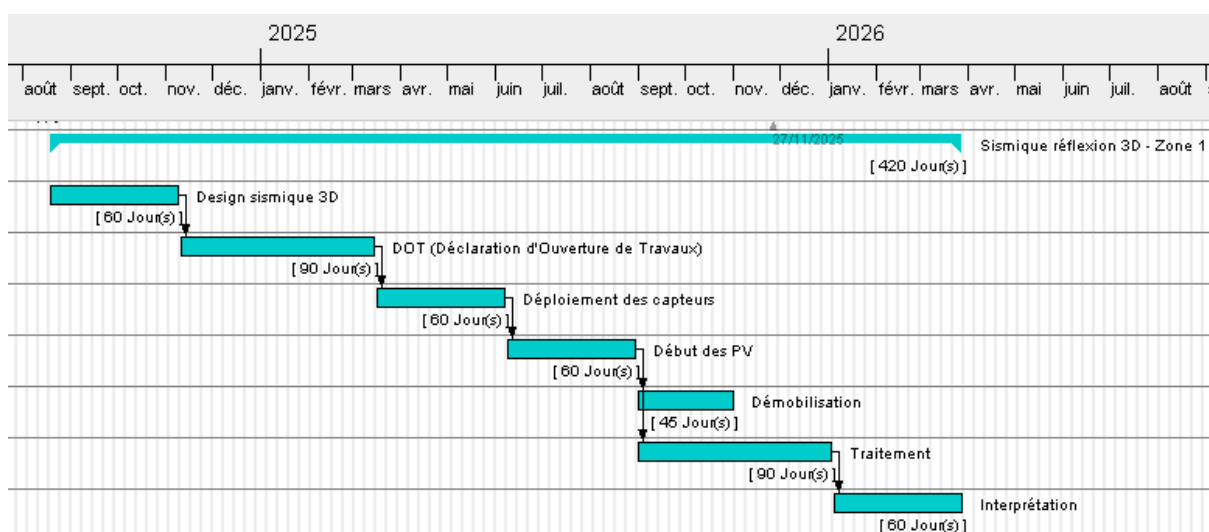


Figure 71 : Planning prévisionnel pour la mise en œuvre de la sismique 3D de la zone 1.

Le planning présenté se répercutera de manière similaire pour toutes les sismiques 3D prévues dans l'emprise sollicitée à raison maximum d'une sismique 3D par an permettant d'aboutir, à la fin de la durée d'exclusivité sollicitée, à l'imagerie de toutes les zones à fort potentiel.

5.3 Coût

L'estimation du coût d'une telle acquisition de sismique réflexion 3D haute résolution (Tableau 7) dépend principalement du nombre de points vibrés et de la quantité de récepteurs nécessaires, raison pour laquelle une évaluation technique poussée a d'ores et déjà été réalisée dans le cadre de ce dossier. Cependant, les tarifs pratiqués dans les services géophysiques fluctuent encore largement en fonction du milieu de l'oil&gaz qui, dès leur reprise d'activité engendre une augmentation très forte des coûts d'exploration.

Certification	Permitting	Acquisition	Traitement / Interprétation	Coût total
30 k€	150 k€	2 300 k€	500 k€	2 980 k€

Tableau 7 : Coût estimatif d'une acquisition sismique de haute définition pour la zone 1.

Dès lors que des débouchés auront été contractualisés les autres zones du périmètre sollicité seront explorés selon des acquisitions ayant une superficie minimale comprise entre 50 et 90 km². L'estimation des coûts ne considère pas l'internalisation au sein du Groupe Vulcan du traitement et de l'interprétation (Tableau 8).

Zone	Certification	Permitting	Acquisition	Traitement / Interprétation	Coût total
2	30 k€	100 k€	2 550 k€	500 k€	3 180 k€
3	30 k€	100 k€	1 950 k€	400 k€	2 480 k€
4	A négocier avec le propriétaire des données				
5	30 k€	100 k€	1 650 k€	300 k€	2 080 k€

Tableau 8 : Coût estimatif des acquisition sismiques de haute définition pour toutes les zones d'intérêts du périmètre sollicité.

6 Mise en œuvre d'un réseau de surveillance sismologique

6.1 Description technique

La mise en œuvre d'un réseau de surveillance sismologique n'est prescrite habituellement que dans le cadre de la phase de forage du puits exploratoire profond. Vulcan Énergie France propose de déployer un réseau dès l'obtention du Permis Exclusif de Recherche et cela pour plusieurs raisons. La première est de pouvoir bénéficier d'un état de référence sur la sismicité naturelle le plus long possible afin de bien identifier les structures actives sur la zone d'exploration. La seconde tient au fait qu'il est maintenant possible de déployer des capteurs de faible emprise et les accompagner de contenus pédagogiques permettant d'effectuer un travail sur la compréhension des phénomènes physiques sous-jacent auprès des habitants du territoire sollicité. Enfin, le déploiement d'un réseau dense permet également d'envisager la mise en œuvre de l'exploration par sismique passive (corrélation de bruit sismique, cf. 1.2.1).

Ces objectifs se proposent donc de répondre à trois problématiques distinctes que sont l'exploration, l'information aux populations et le suivi de l'exploitation. Le déploiement d'un réseau de surveillance agile permettra de répondre aux deux premières problématiques. En ce qui concerne le monitoring temps-réel de la phase forage et du suivi de l'exploitation, un réseau plus conséquent sera mis en œuvre.

Concernant le réseau agile, la solution technologique retenue consiste en l'utilisation de capteurs sismologiques de type Raspberry Shake (

Figure 72 et Figure 73). Il s'agit d'une adaptation d'un mini-ordinateur (Raspberry) avec un capteur sismologique couramment utilisé dans l'industrie des services géophysiques.

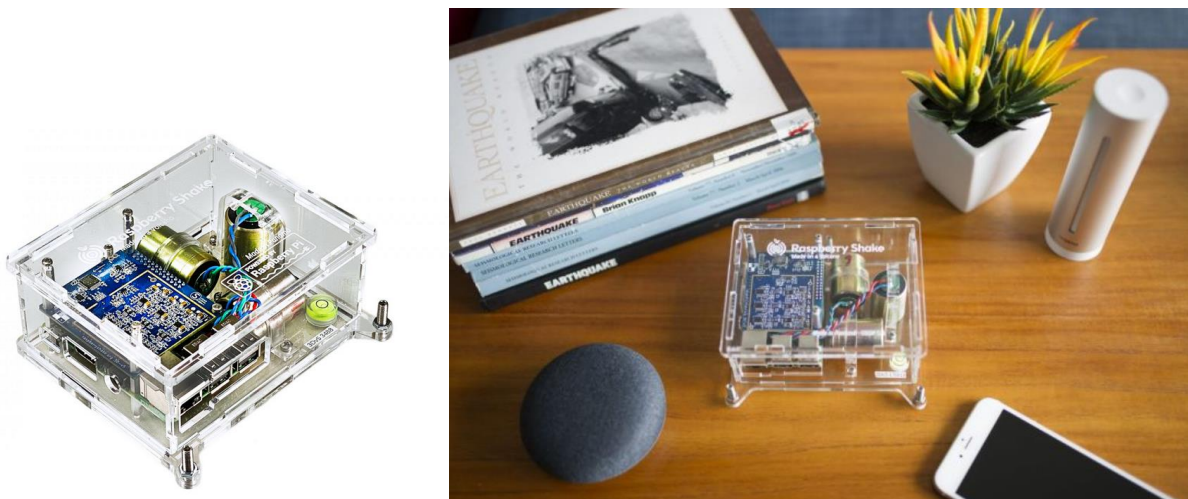


Figure 72 : Capteur sismologique de type Raspberry Shake 3C pour un déploiement en intérieur et à but éducatif. (Source : raspberrysshake.org)



Figure 73 : Capteur sismologique de type Raspberry Shake pour un déploiement en extérieur. (Source : raspberrysake.org)

Pensez également pour fournir un support éducatif ludique et pédagogique, les Raspberry Shake peuvent s'intégrer autour d'un projet scientifique au sein des écoles du territoire (Figure 74). Cela est d'ores et déjà le cas dans de nombreuses villes accueillant ou non des projets de géothermies (United Downs Deep Geothermal Project, Cornwall, UK, (Holmgren & Werner 2021)).

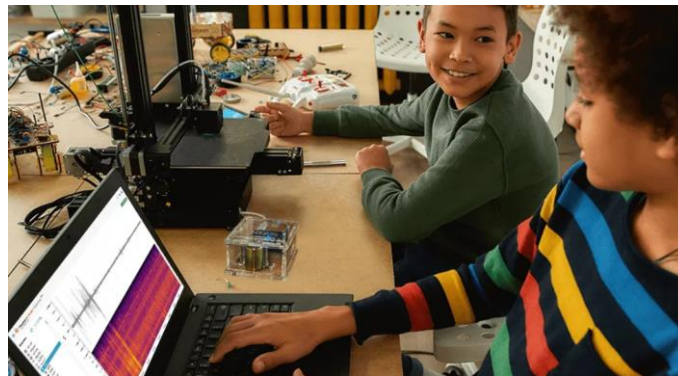


Figure 74 : Exemple de travaux pédagogique autour du monitoring sismologique : construction du capteur, compréhension du phénomène physique, traitement et interprétation des résultats. (Source : raspberrysake.org)

Ce type de technologie peut être aisément déployé dans des habitations ou des bureaux et ne nécessite qu'un accès à une prise électrique 220V et à une connexion internet (wifi ou filaire). Ce type de capteurs représente maintenant une part importante des réseaux de surveillance sismologique (Figure 75).

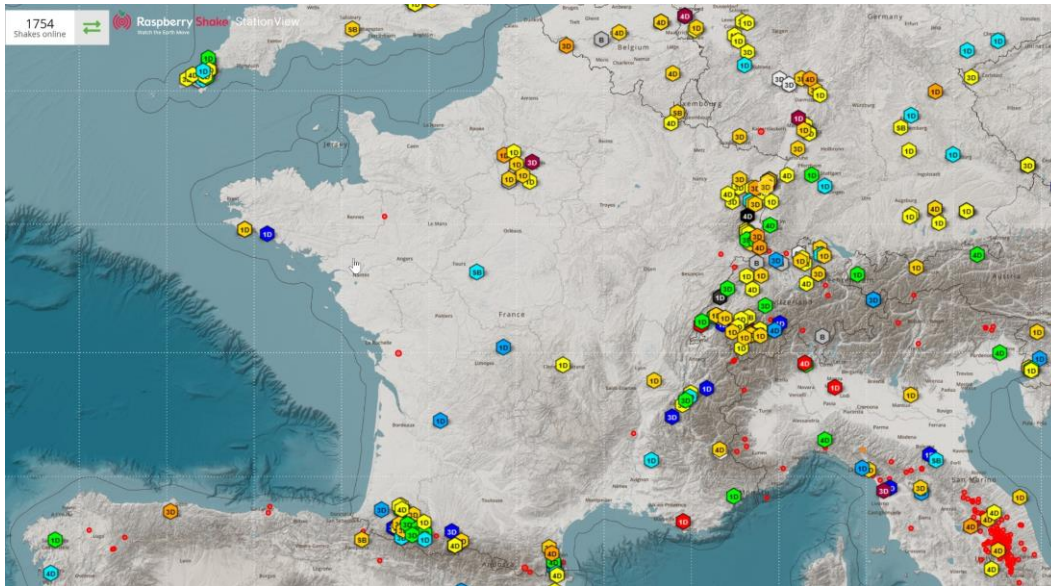


Figure 75 : Carte localisant les capteurs de type Raspberry Shake en activité et publiquement accessible.

En Alsace, des projets intégrant des Raspberry Shake a d'ores et déjà été mis en œuvre dans le cadre d'un projet appelé SeismoCitizen ((Schlupp et al. 2019)).

Ainsi, il sera proposé de déployer des capteurs au sein de chaque Mairies ou Écoles concernées par le périmètre sollicité dans le cadre de cette demande de Permis Exclusif de Recherches. Des sites tels que les maisons forestières seraient également intéressantes à instrumenter afin d'assurer un monitoring non invasif dans la forêt de la Hardt en particulier. Les sites potentiels d'implantations identifiés sont au nombre de 32 (Figure 76). Le choix définitif du nombre et de la localisation se fera avec les parties prenantes dès l'obtention du Permis Exclusif de Recherches.

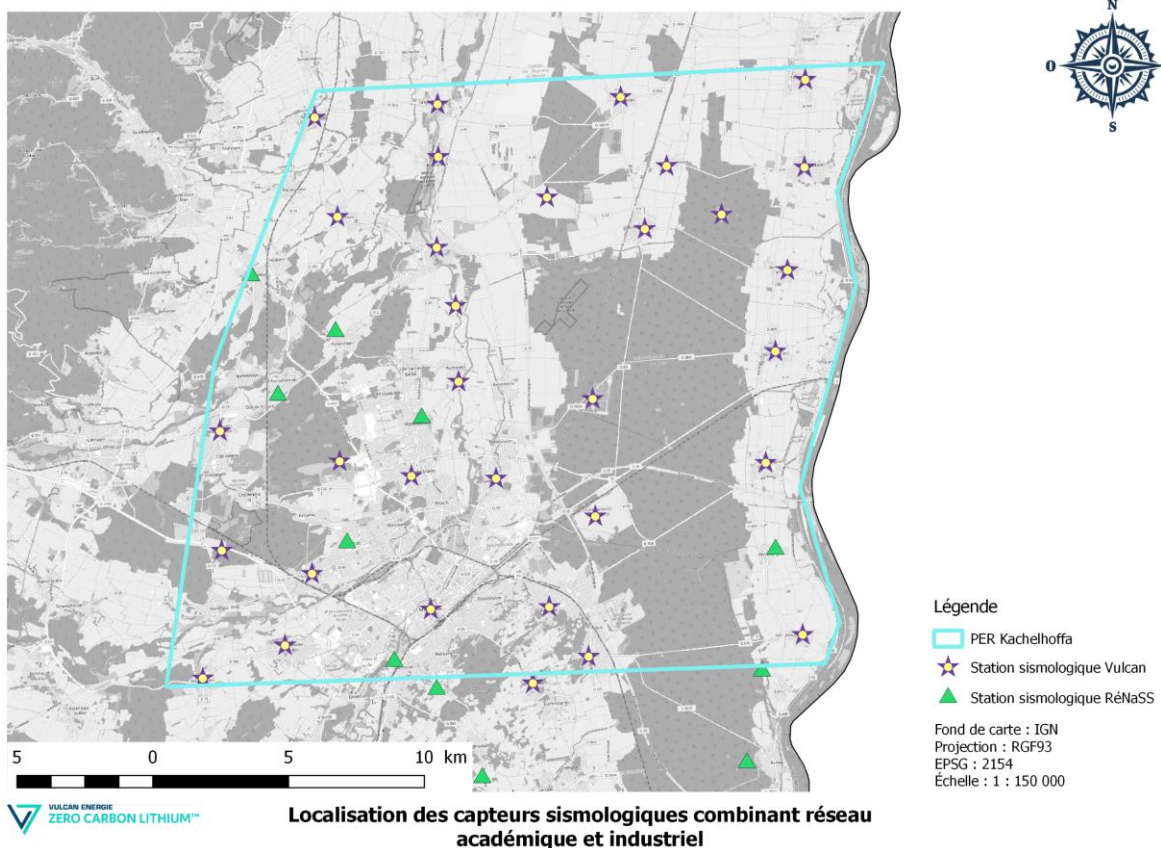


Figure 76 : Localisation des potentiels sites d'implantations des capteurs sismologiques pédagogiques.

Le design proposé assure la réponse à plusieurs problématiques pour l'établissement de l'état de référence de la sismicité naturelle. En effet, le nombre important de capteurs au sein du périmètre assurera une meilleure localisation des évènements sismiques (Figure 77) et une capacité à détecter les séismes les plus faibles. Enfin, la grande distance séparant les stations les plus éloignées (jusqu'à 18 km de distance linéaire), permettra une investigation du sous-sol par la technique de corrélation de bruit sismique mise en œuvre pour la première fois pour de l'exploration géothermique en phase initiale.

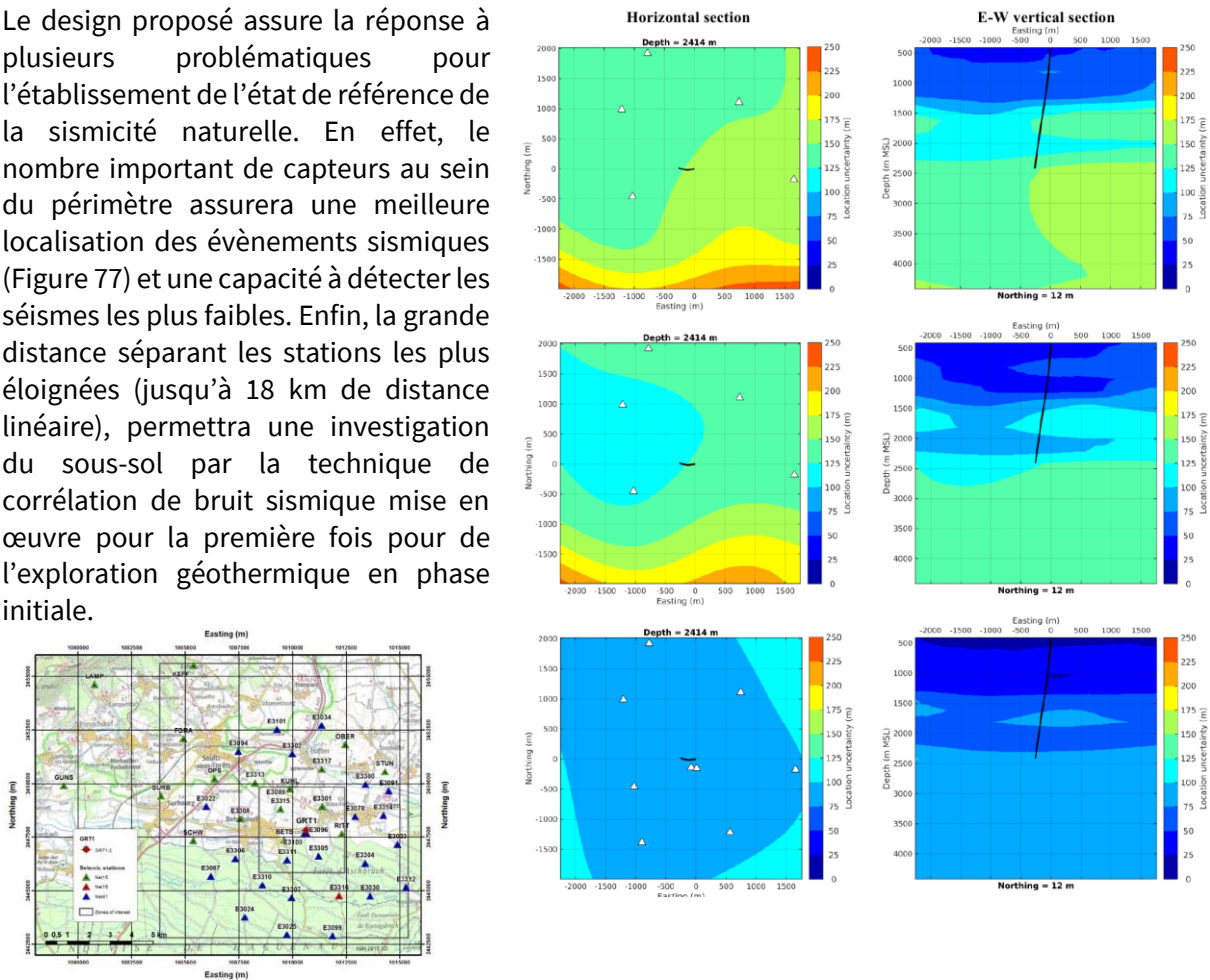


Figure 77 : Impact du design du réseau de surveillance sur les incertitudes de localisation. (en bas à gauche) Localisation de 3 réseaux de monitoring comprenant respectivement 15, 16 et 41 stations. (à droite) Résultats des simulations numériques d'erreurs de localisation en fonction du réseau utilisé, respectivement de haut en bas pour 15, 16 et 41 stations. (Source : (Gaucher et al. 2016))

Cependant, malgré tous les avantages que propose ce type de capteur, il paraît important de prévoir un dispositif plus robuste ((Anthony et al. 2019)) afin d'assurer un suivi temps-réel dès la phase forage ((Ravier et al. 2016)). Ainsi, une étude sera mise en œuvre afin de proposer une géométrie et une association de capteurs permettant une surveillance à la fois des évènements les plus forts (téléséismes) et les évènements de type microséisme. En effet, ces deux types de séismes ne possèdent pas les mêmes particularités physiques et ne peuvent être finement détectés et localisés par un type unique de capteurs. Le réseau de capteurs sismologiques pédagogiques aura d'ores et déjà permis de qualifier le type de sismicité et ses paramètres physiques (en particulier les fréquences) permettant dès lors d'aboutir aux spécifications les plus pertinentes pour le réseau de monitoring temps-réel. L'objectif de l'étude sera également de comparer les technologies mises en œuvre dans les autres pays pour la surveillance sismologique (Figure 78).



Figure 78 : Exemple de stations temps-réel. A gauche pour le monitoring de la centrale de Rittershoffen (Source : (Ravier et al. 2016) et à droite pour le monitoring de la centrale d'Insheim (Source : (Küperkoch et al. 2016)).

Enfin, un point important sur la surveillance sismologique concerne les méthodes de traitement des données. Vulcan Énergie France souhaite mettre en œuvre des traitements avancés afin de permettre une réelle intégration des données dans le suivi de l'exploitation du gisement géothermique et lithiné. Pour ce faire, il sera important de procéder à une calibration du réseau de monitoring. Cette opération consiste à actionner, durant la phase forage, un cordon détonant au plus proche du réservoir et d'enregistrer le signal sur le réseau d'écoute. Le signal enregistré fera dès lors office de référence pour les méthodes de corrélation afin d'aboutir à un seuil de détection très faible et une baisse drastique des erreurs de localisation.

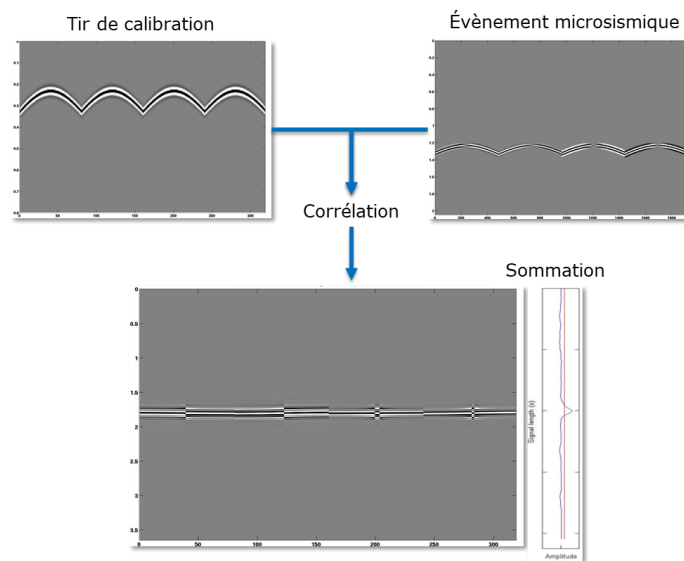


Figure 79 : Principe de la méthode de corrélation entre un signal provoqué (cordon détonant) dont la position et temps d'occurrence sont connus et un signal microsismique. La somme de la corrélation permet d'aboutir à une courbe dite de détection qui permet, au-delà d'un certain seuil, de détecter les événements sismiques. (Source : (Rebel et al. 2011))

En effet, il sera donc mis en place les méthodes de détection et de localisation par corrélation permettant d'aboutir à un niveau de précision bien supérieur aux méthodes communément utilisées en sismologie. Ces techniques de corrélation ont été testées il y a près d'une dizaine d'année dans le milieu de l'O&G ((Rebel et al. 2011)) et récemment mises en œuvre sur les projets géothermiques en Alsace du Nord (Figure 80).

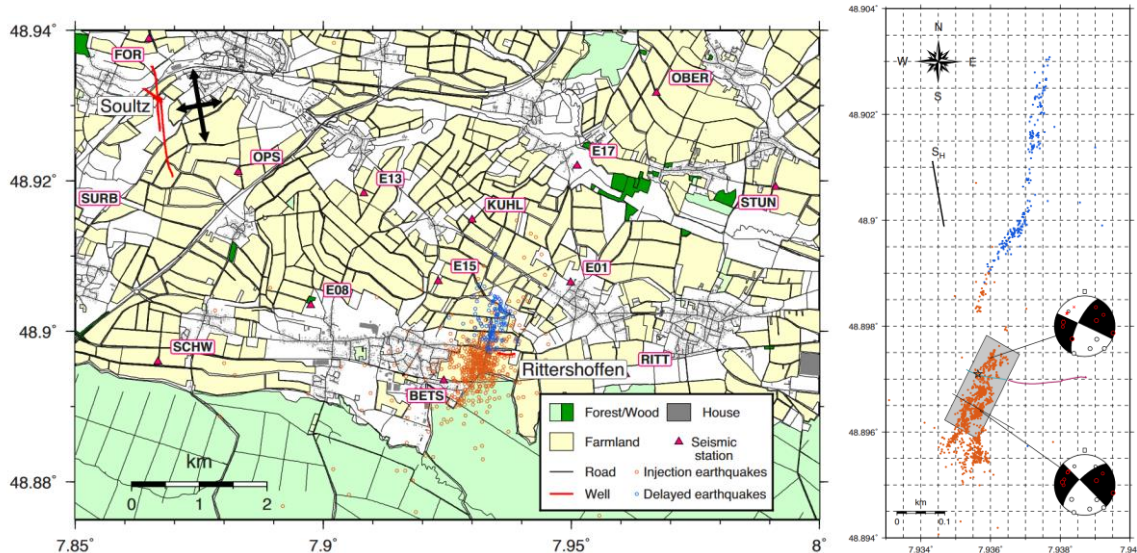


Figure 80 : (à gauche) Carte de localisation absolue des événements induits durant les stimulations des puits de la centrale de Rittershoffen et b) après relocalisation par méthode de corrélation par des « master event ». (Source : (Lengliné et al. 2017))

Par ailleurs, l'utilisation du réseau agile en complément du réseau temps-réel engendrera un apport plus important en données permettant de procéder à l'inversion du tenseur des moments. Il sera dès lors possible d'identifier le type de rupture (dit mécanisme au foyer) ayant généré le séisme. Il sera alors envisageable d'intégrer ces données dans les modèles mécaniques décrivant le réservoir et permettant son suivi en phases de stimulations et d'exploitation (Figure 81).

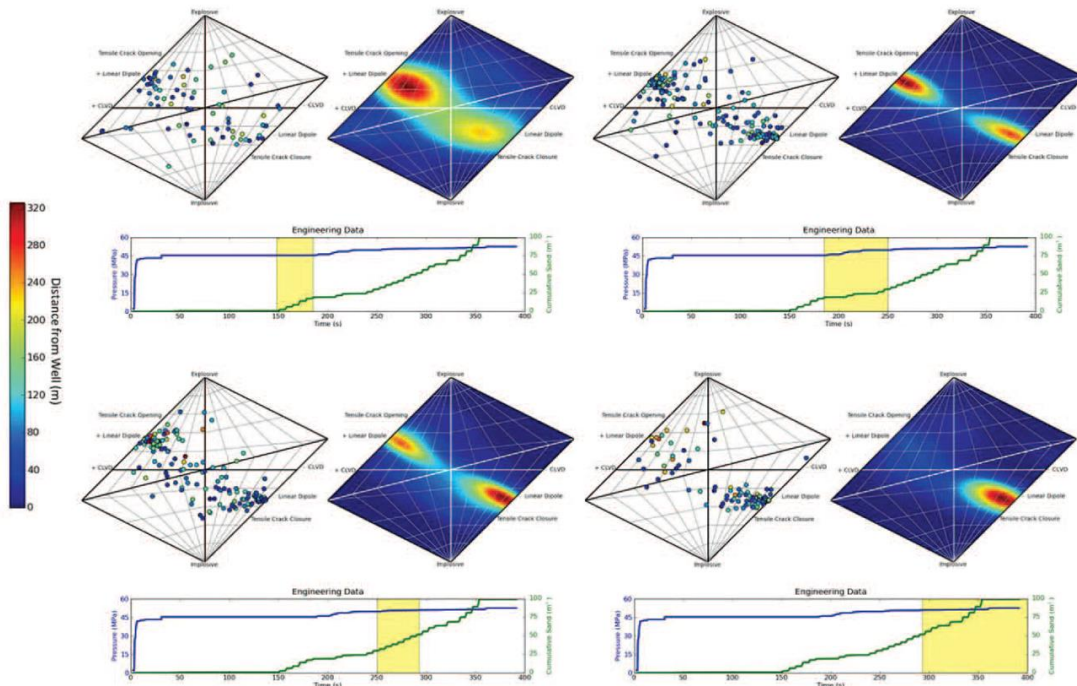


Figure 81 : Exemple d'utilisation de l'inversion du tenseur des moments afin de caractériser les mécanismes aux foyers des événements microsismiques et les corréler aux paramètres de production. Il est en particulier possible de suivre la réponse mécanique du réservoir durant les stimulations. (Source : (Baig & Urbancic 2010))

6.2 Planning

Comme mentionné dans le chapitre 1.2.1, la mise en œuvre de la surveillance sismologique sera rapidement possible sur le périmètre sollicité par cette demande de PER (Figure 82).

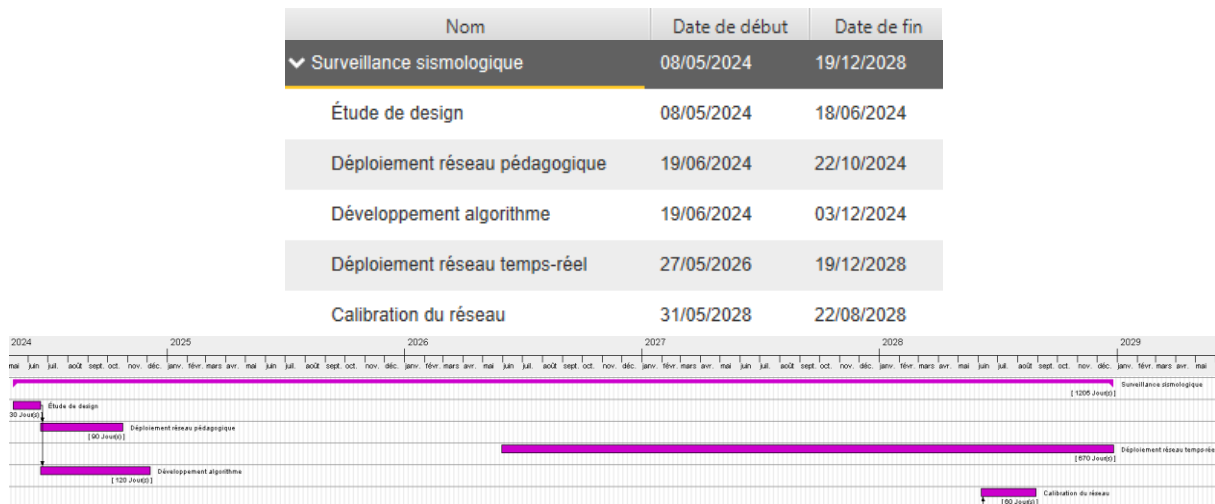


Figure 82 : Planning prévisionnel du déploiement du réseau de surveillance sismologique sur le PER sollicité.

A noter que les forages de gradient, une fois les profils de température réalisés, pourront tout à fait avoir un usage de surveillance sismologique en étant instrumentés. Il conviendra de spécifier le type de capteur sismologique considéré afin de s'assurer que la complétion de l'ouvrage puisse bien accueillir le capteur.

6.3 Coût

Les coûts sont séparés entre le dispositif de monitoring agile et le dispositif de monitoring temps-réel. Il est considéré le déploiement de 32 stations agiles et de 5 stations temps-réel (Tableau 9 et Tableau 10).

Achat des capteurs	Traitement et interprétation	Activités de sensibilisation	Coût total
70 k€	50 k€	10 k€ / an	170 k€

Tableau 9 : Coût estimatif du déploiement du réseau sismologique agile et pédagogique sur la base de 32 stations.

Étude de faisabilité	Permitting	Sites d'implantation	Capteurs + maintenance	Traitement / Interprétation	Corrélation de bruit sismique	Coût total
25 k€	5 k€	100 k€	250 k€	50 k€	20 k€	450 k€

Tableau 10 : Coût estimatif du déploiement du réseau sismologique temps-réel sur la base de 5 stations.

Enfin, le traitement avancé des données sismologiques issues du réseau de surveillance ainsi que les tirs de calibration et le développement d'un algorithme spécifique à de telles données ont également été budgétés.

Étude de faisabilité du tir de calibration	Calibration du réseau	Développement algorithmique	Coût total
10 k€	100 k€	50 k€	160 k€

Tableau 11 : Coût estimatif de la calibration du réseau sismologique par un tir d'un cordon détonant dans le puits et du développement d'un algorithme industriel de traitement des données par corrélation.

7 Mise en œuvre de forages de gradient

7.1 Description technique

Comme détaillé dans le chapitre 1.3, l'objectif de la campagne de forages de gradient de faible profondeur sera d'imager les possibles boucles de convection présentes naturellement au sein du sous-sol Alsacien. Les profils de température des multiples forages de Soultz-sous-Forêts ont montré qu'il avait été possible d'identifier des variations de température de 10% en moins de 2 km de distance. Ces profils de température semblent également en adéquation avec les simulations numériques qui infèrent des extensions latérales de l'ordre de 1.3 km pour ces mêmes boucles de convection. Par conséquent, un déploiement de forages de gradient distants d'environ 2 km les uns des autres devrait permettre d'aboutir à la première cartographie systématique des anomalies thermiques au droit d'un permis exclusif de recherches (Figure 83).

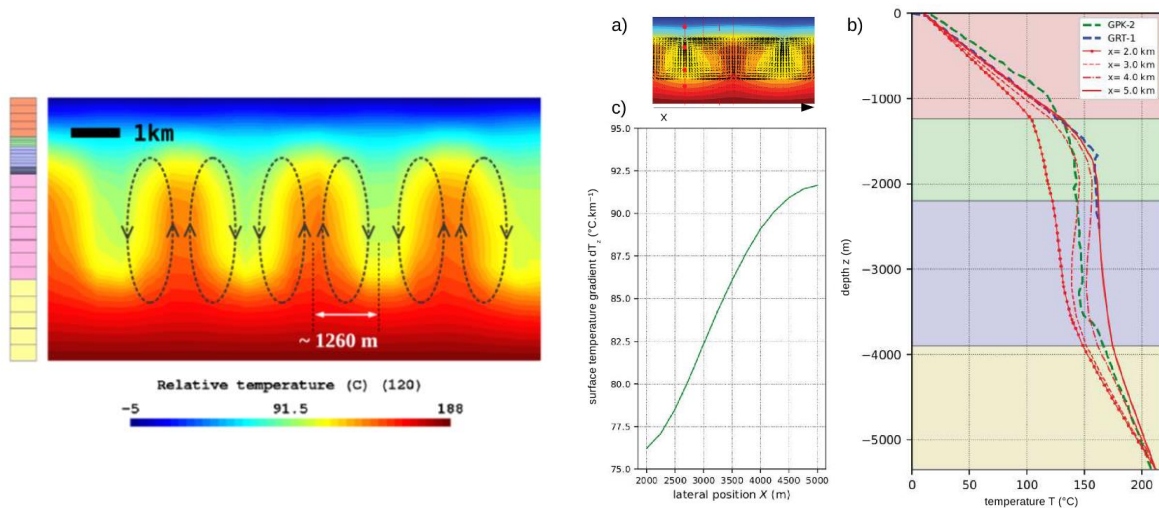


Figure 83 : (à gauche) Calcul du champ de température relatif dans un maillage de 10 x 5 km faisant apparaître des boucles de convection dans un modèle à couches géologiques homogènes (Source : (Magnenet et al. 2014)), (à droite) correspondance entre des profils thermiques provenant des modélisations THM et les profils de températures observées dans les puits profonds de Soultz-sous-Forêts et Rittershoffen (Source : (Vallier et al. 2020)).

La mise en œuvre d'une large campagne de forages de gradient permettra également d'amener des éléments de compréhension du rôle des failles dans la perturbation de ces boucles de convection et de leur influence hydrogéologique dans les circulations profondes. En effet, dans le cadre d'un rôle majeur pour la circulation des saumures, une variation de la valeur du gradient thermique est attendue au droit d'une faille circulante (Figure 84).

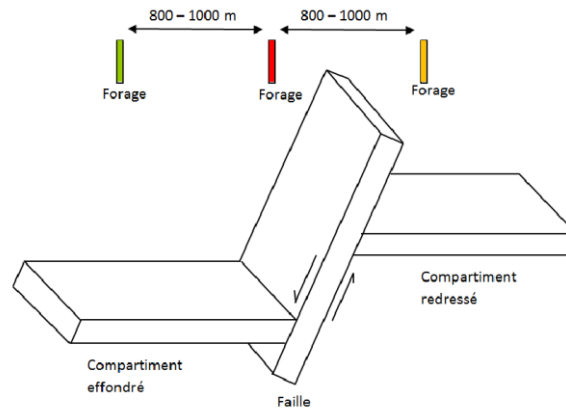


Figure 84 : Schéma présentant l'influence de la circulation préférentielle des saumures au sein des failles au regard des profils de températures, à savoir faible au droit du compartiment effondré, plus élevé au niveau du bloc redressé et enfin le plus fort au droit de la faille. (Source : (Maurer 2019))

Fort du constat que la circulation du fluide géothermique se trouve principalement au droit des zones fracturées, un maillage longitudinal suivant ces structures a été construit (Figure 85).

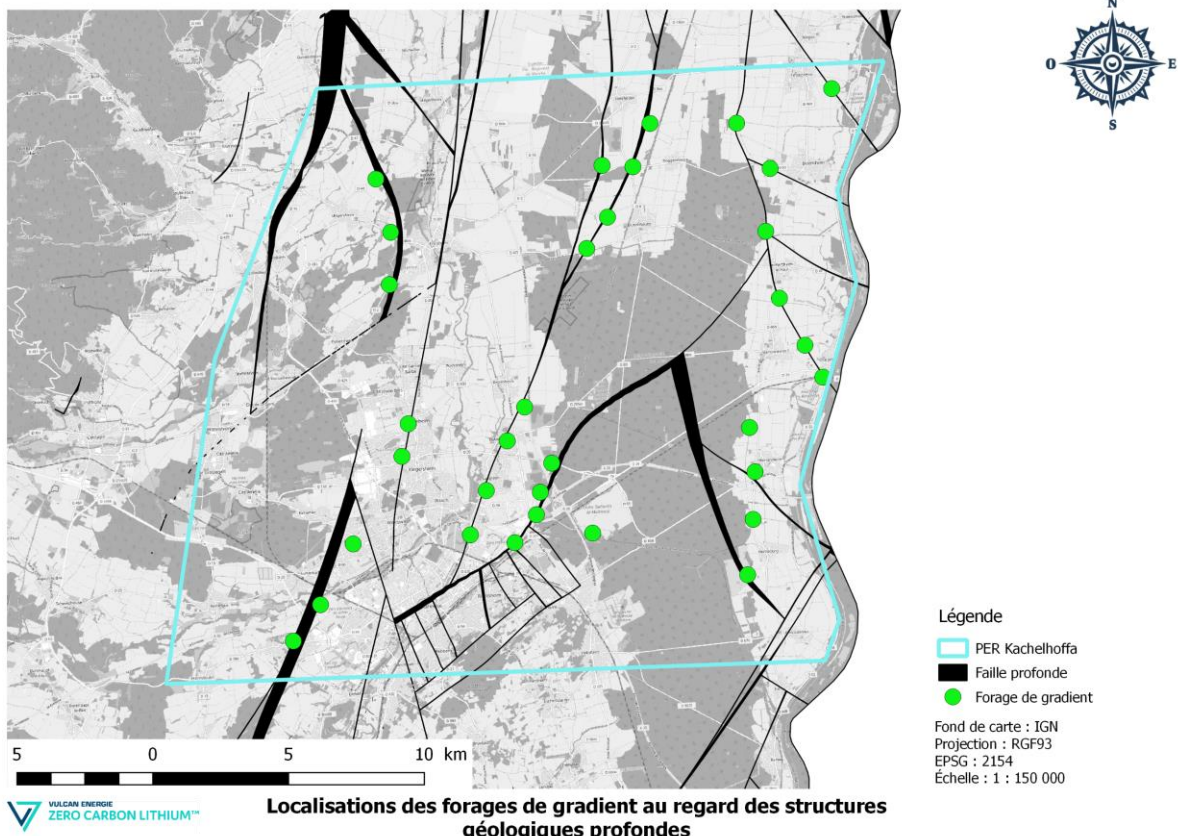


Figure 85 : Maillage longitudinal le long des failles majeures identifiées par la sismique 2D vintage.

Le positionnement de ces forages s'inscrit également dans la zone d'imagerie sismique 3D maximale (Figure 86) afin que les anomalies de température puissent être corrélées aux structures géologiques sous-jacentes.

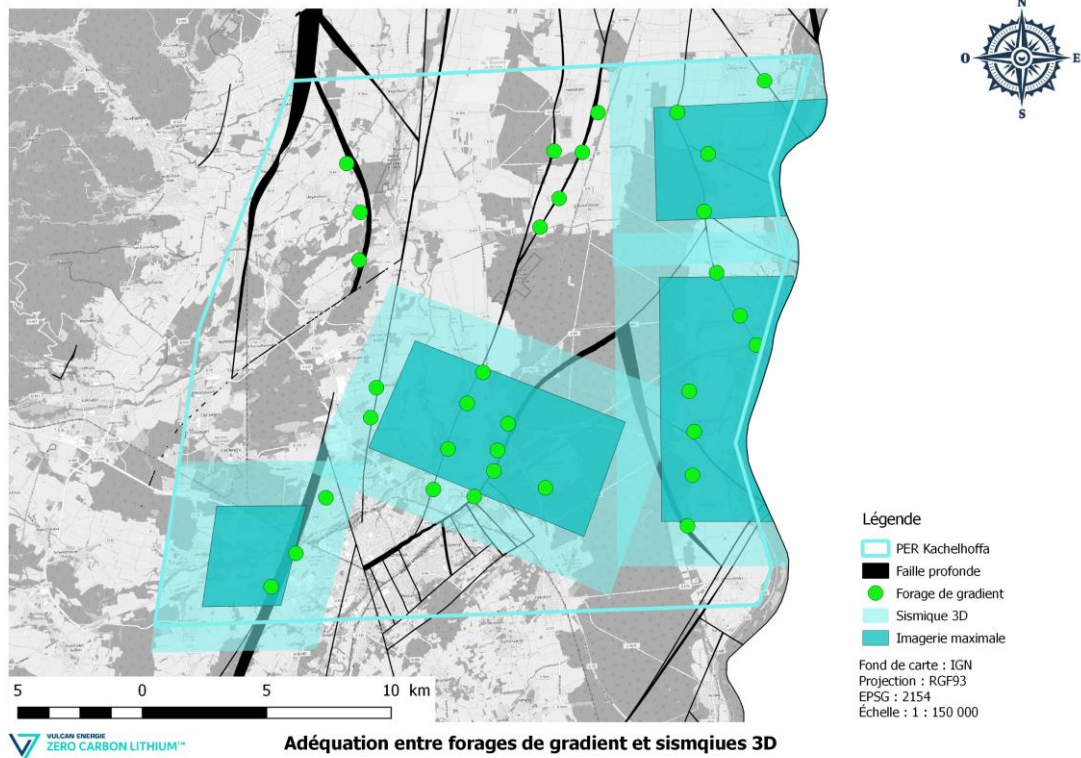


Figure 86 : Positionnement des forages de gradient au regard de la zone d'imagerie maximale obtenue par la sismique réflexion 3D.

Ne s'agissant que d'une étude de design, cette répartition des forages sur le terrain sera bien entendu validée avec les parties prenantes. Dans le cadre du positionnement théorique, des lieux tels que des écoles, des mairies, ou des locaux communaux ont été privilégiés afin d'anticiper une possible reconversion de ces ouvrages. Cette étude donne cependant des indications assez précises de la géométrie et de la répartition à obtenir afin d'avoir la possibilité d'inférer (Figure 87) le champ de température au sein de la zone d'intérêt.

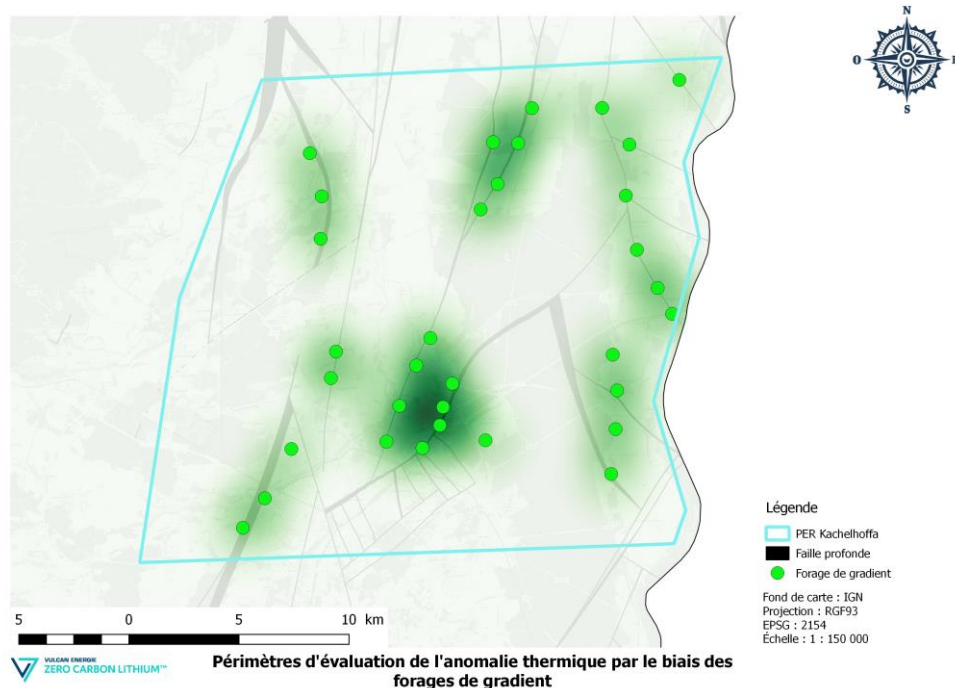


Figure 87 : Krigeage sur la distance entre forages montrant la zone dans laquelle une estimation par interpolation sera la plus pertinente.

Enfin, une fois les ouvrages réalisés et l'équilibre thermique atteint, une mesure du profil de température sera effectuée. Il existe plusieurs techniques afin d'acquérir ce log de températures comme par exemple les thermomètres « sans-fil » mesurant pression et températures (Figure 88) ou bien les méthodes par utilisation des fibres optiques et d'un interrogateur de type DTS (Figure 89).

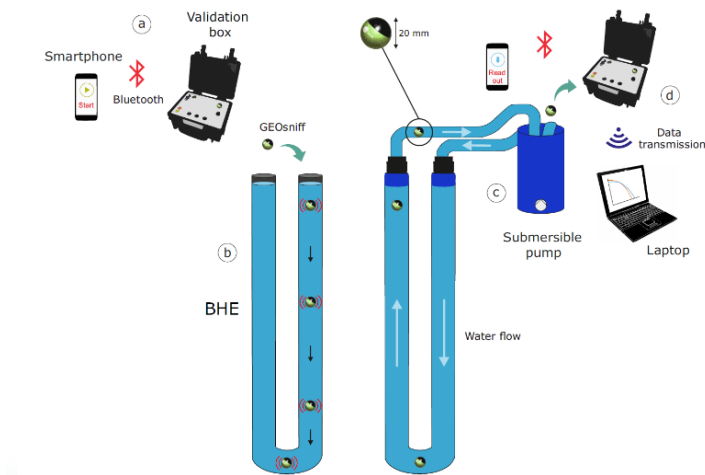


Figure 88 : Schéma de la mise en œuvre d'une mesure de température par le biais des thermomètres sans-fil. (Source : (Schüppler et al. 2021))

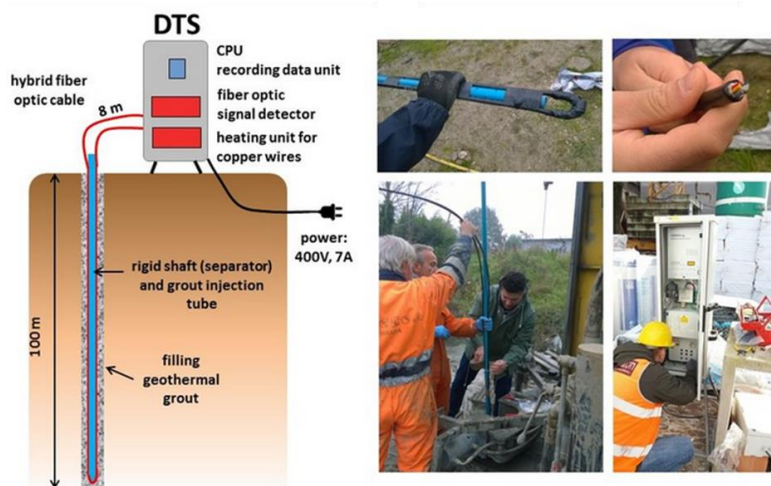


Figure 89 : Schéma de la mise en œuvre d'une mesure de température par le biais du déploiement d'une fibre optique et d'un interrogateur de type DTS. (Source : (Schüppler et al. 2021; Galgaro et al. 2018))

7.2 Planning

Compte tenu de l'intervention d'un RIG de forage, certes de petite taille, il conviendra de réaliser ces forages durant une période relativement sèche afin d'éviter la création d'ornière. Par ailleurs, le design définitif sera réalisé après l'interprétation de la sismique 3D afin de positionner les forages au plus proche des structures potentiellement intéressantes (Figure 90).

Les différentes étapes sont donc :

- 1) Finalisation du design et permitting
 - Utilisation des résultats de l'analyse structurale de la sismique 3D pour repositionner les forages de gradient.
 - Validation avec les parties prenantes des positions des forages

2) Réalisation des forages

- Si le nombre de plus de 20 forages de gradient est confirmé, il conviendra sans doute d'utiliser 2 RIG de forages. En effet, il est habituel que ce type d'ouvrages prennent entre 3 et 4 jours par puits.

3) Attente de l'équilibre thermique

- Une fois le puits foré et mis en eau, il conviendra d'attendre que l'encaissant transmette par conductivité sa température d'équilibre. Le délai est de l'ordre que 3 à 4 semaines.

4) Mesure du profil thermique

- Une fois l'équilibre atteint, une mesure de température pourra être réalisée. Il existe sur le marché plusieurs outils de mesures tels que des thermomètres sans fil mesurant le couple pression/température ou de manière plus précise avec une fibre optique et un interrogateur de type DTS.

5) Interprétation des données

- Les profils de températures seront mis en regard des logs stratigraphiques pour bien s'assurer de l'homogénéité de la lithologie à ces faibles profondeurs.
- Des modélisations issues de ces données permettront de calculer un gradient géothermique au droit de chaque ouvrage ainsi qu'une température au toit du cap rock (Muschelkalk).
- S'agissant de la première large campagne d'exploration par forages de gradient, l'intégration de ces mesures pourra être faite au regard des données structurales de la sismique 3D afin d'inférer la circulation hydrogéologique des saumures profondes dans le périmètre investigué.

6) Vie de l'ouvrage

Plusieurs finalités des ouvrages seront considérées :

- Une procédure d'abandon des puits pourra être mise en œuvre.
- En accord avec la réglementation portant sur la Géothermie de Minime Importance (GMI), les forages pourront éventuellement être reconverti pour un usage de production de chaud ou de froid.
- Une reconversion en station de surveillance sismologique

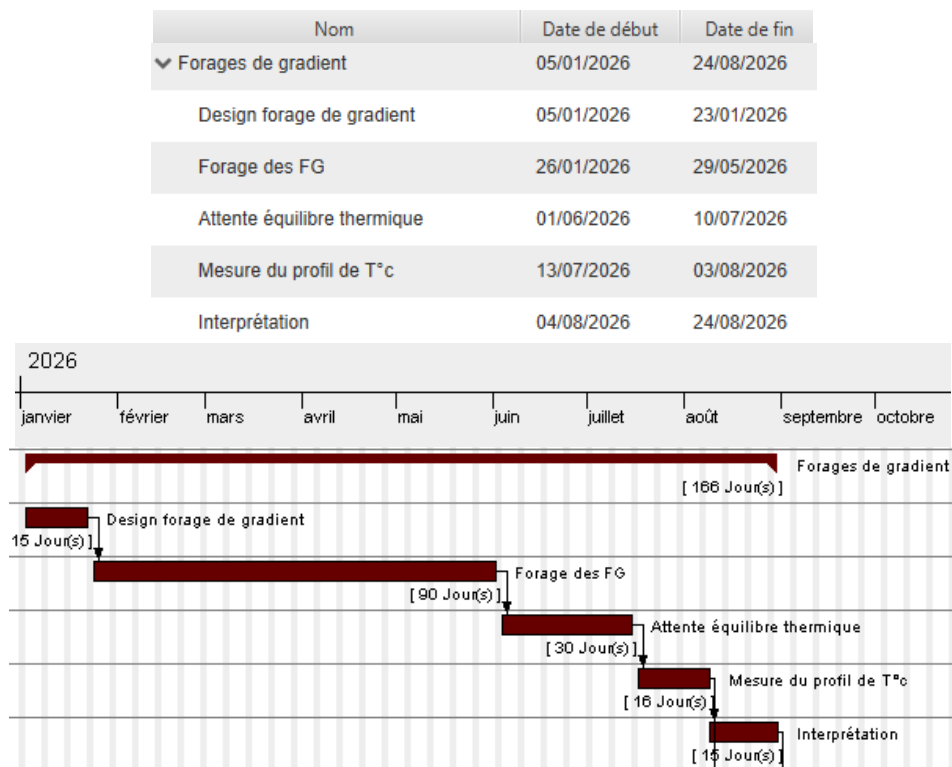


Figure 90 : Planning prévisionnel de la campagne de forages de gradient sur le PER sollicité.

7.3 Coût

Le coût d'un forage de gradient est similaire à celui qui est proposé dans le cadre de la Géothermie de Minime Importance pour particuliers et entreprises à la différence près que les forages de gradient se situent la plupart du temps dans des zones n'ayant pas accès à l'eau courante et au réseau électrique nécessitant donc des apports extérieurs durant la phase du forage. Ainsi, il a été supposé que le coût unitaire d'un forage de gradient serait de l'ordre de 20 k€.

Permiting	Forage (< 200m)	Profil de température	Coût total
20 k€	640 k€	10 k€	670 k€

Tableau 12 : Coût estimatif d'une campagne exploratoire pour 32 forages de gradient.

8 Mise en œuvre d'un forage exploratoire profond

8.1 Description technique

Le forage exploratoire profond correspond à la dernière étape du programme d'exploration du sous-sol et à son aboutissement. En effet, après la mise en œuvre de l'ensemble des méthodes d'imagerie, un important travail d'analyse et d'interprétation permettra de proposer des cibles au droit du réservoir géothermique. L'intégralité des études techniques et environnementales seront jointes au dossier de Demande d'Autorisation d'Ouverture de Travaux Miniers (DAOTM) dont l'instruction dure une année.

Ainsi, à l'heure de la rédaction du dossier de demande d'octroi du Permis Exclusif de Recherches, peu d'éléments techniques peuvent détailler ce que sera l'ouvrage proposé dans la DAOTM. Cependant, le Mémoire Technique joint à ce dossier a permis d'identifier le contexte géologique et structural et en particulier les profondeurs attendues au niveau du réservoir géothermique. Ainsi la cible sera probablement située à une profondeur variant de 600 m à 3 500 m de profondeur. Ces profondeurs sont celles atteintes par de nombreux projets de géothermie actuellement opérationnels et ne générant pas de problèmes d'acceptabilité (thermes de Morsbronn-les-Bains, (544 m de profondeur), projet ECOGI à Rittershoffen (2 700m de profondeur) et « Natürlich Insheim » en Allemagne (3 600m de profondeur)). Les RIG de forages de la filiale du groupe Vulcan, VERCANA, sont tout à fait qualifiés pour la réalisation de forages à ces profondeurs avec des poids au crochet permettant de travailler en toute sécurité (Figure 91).

TWO DRILLING V10 AND V20 UNDER REFURBISHMENT



RIG V20 -> Start in Q2/23

- 2,500 HP, 590 to, Top Drive DDM 650

RIG V10 -> Start in Q3/23

- 2,000 HP, 590 to, Top Drive DDM 500



VERCANA

Figure 91 : Description des 2 RIG de forages de la filiale VERCANA du Groupe Vulcan.

8.2 Planning

Le planning actuel (Figure 92) prévoit la réalisation du forage exploratoire profond pour janvier 2028. La réalisation d'un forage passe par de nombreuses étapes préliminaires et dure dans sa globalité 6 mois ((Baujard et al. 2017)). Les 3 étapes les plus caractéristiques de ces opérations sont :

1) Mise en place de la plateforme de forage

Afin d'accueillir un RIG de forage et ses équipements pesant en tout plusieurs centaines de tonnes, il convient de procéder à la stabilisation du sol et le coulage d'une dalle en béton. Cette dalle en béton sera d'ailleurs équipée de fibre optique permettant de contrôler tout au long des opérations la stabilité de l'ouvrage. Des bassins seront également creusés afin de recueillir les eaux géothermales durant les différentes phases de tests.

2) Phase forage

Prévue pour une durée de 3 mois environ, la phase forage s'effectue en continue avec plusieurs équipes qui se relayent sur le site. Un reporting journalier est effectué auprès des autorités d'inspection des mines afin de suivre le déroulement du forage.

3) Phase de mesures et de tests

Une fois la cible atteinte, une série de mesures et de tests seront effectués. Concernant les mesures, il s'agit principalement de diagraphies ayant pour but de caractériser la géologie de l'encaissant et ses propriétés. Les tests quant à eux auront pour objectifs de décrire les paramètres du réservoir et estimer le potentiel de production ou d'injection du puits. Seules ses mesures et cette détermination des paramètres du réservoir autoriseront le forage du second puits nécessaire à la création du doublet géothermique.

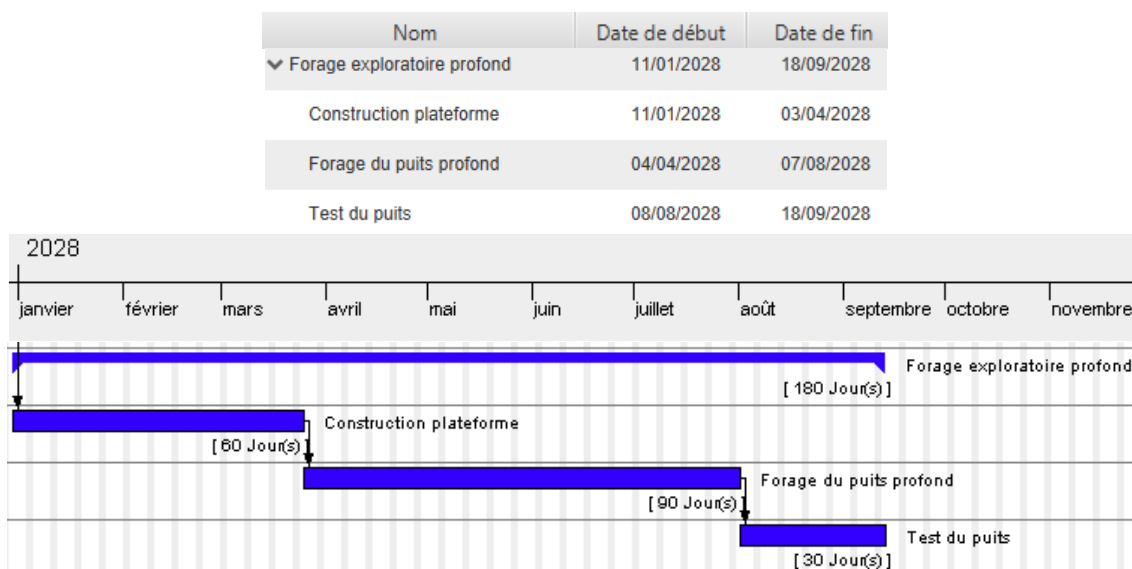


Figure 92 : Planning prévisionnel pour le forage exploratoire profond.

8.3 Coût

Le principal facteur affectant le coût de la phase forage est la durée des opérations. En effet, on estime que la présence d'un RIG de forages sur site représente la somme de 40 k€ / jour.

Achat du terrain	Mise en place de la dalle béton	Bassins et système de sécurité	Système de surveillance de la nappe	Tubes guides de sécurisation de la nappe	Coût total
[500 – 1000] k€	600 k€	150 k€	200 k€	300 k€	1 750 k€

Tableau 13 : Coût estimatif de la mise en place de la plateforme et des éléments de sécurisation de la nappe phréatique.

Équipements de forages	Équipes de forage + RIG	Cimentation des sections	Gestion des déchets + boues de forage	Assurances	Coût total
1 000 k€	3 600 k€	600 k€	800 k€	350 k€	6 350 k€

Tableau 14 : Coût estimatif de la foration du premier puits exploratoire profond.

9 Mise en œuvre des méthodes géologiques, minéralogiques, géochimiques

9.1 Description technique

Un premier travail géologique et minéralogique pourra être réalisé sur les affleurements dans le massif des Vosges ainsi que dans les différentes carrières permettant d'accéder à des roches enfouies au droit du projet à plusieurs kilomètres de profondeur.

Les analyses sur cuttings se fera durant la phase de forage et s'effectuera de manière continue afin d'aboutir à une lithostratigraphie précise du forage. Ces cuttings pourront être étudiés et analysés par des techniques tels que le SWIR (Short-Wave Infrared, Figure 93) et le RXD (X-Ray Diffraction, (Dezayes et al. 2013)) (cf. Mémoire Technique, (Vidal et al. 2018) et (Glaas 2021)).



Figure 93 : (à gauche) Caméra spectrale Specim SWIR 3 et (à droite) schéma du fonctionnement. (Source : (Savitri et al. 2021))

Les zones potentiellement réservoirs seront pour leur part carottées (Figure 94).



Figure 94 : Exemple de carottes du Muschelkalk et du Buntsandstein issues du forage exploratoire EPS-1 (Soulz-sous-Forêts). (Source : (Aichholzer et al. 2019))

Une des étapes importantes mais relativement critique, consiste à déployer au sein du forage des outils de diagrapies permettant d'acquérir des information géophysiques (vitesses de propagation des ondes sismiques), mécaniques (nombre et orientation des fractures) et hydrogéologique (température, pression). Le principe consiste à descendre dans le forage (idéalement en trou ouvert, dit « openhole ») un câble avec à sa fin un assemblage de capteurs et d'outils de mesures (Figure 95).

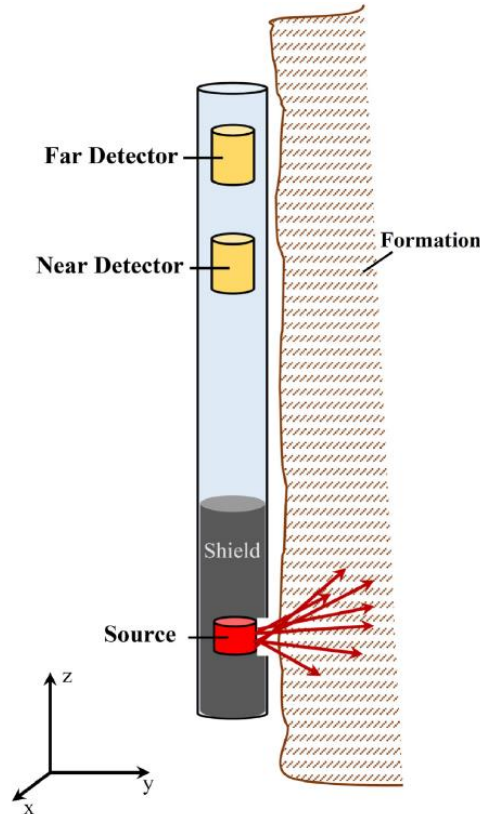


Figure 95 : Schéma simplifié présentant le principe d'une acquisition de diagrapie au sein d'un puits profond. (Source : (Rasouli 2022))

Des mesures géochimiques des saumures géothermales seront réalisées à la fois de manière *in situ* au droit de la formation réservoir ciblée et en surface (Figure 96).

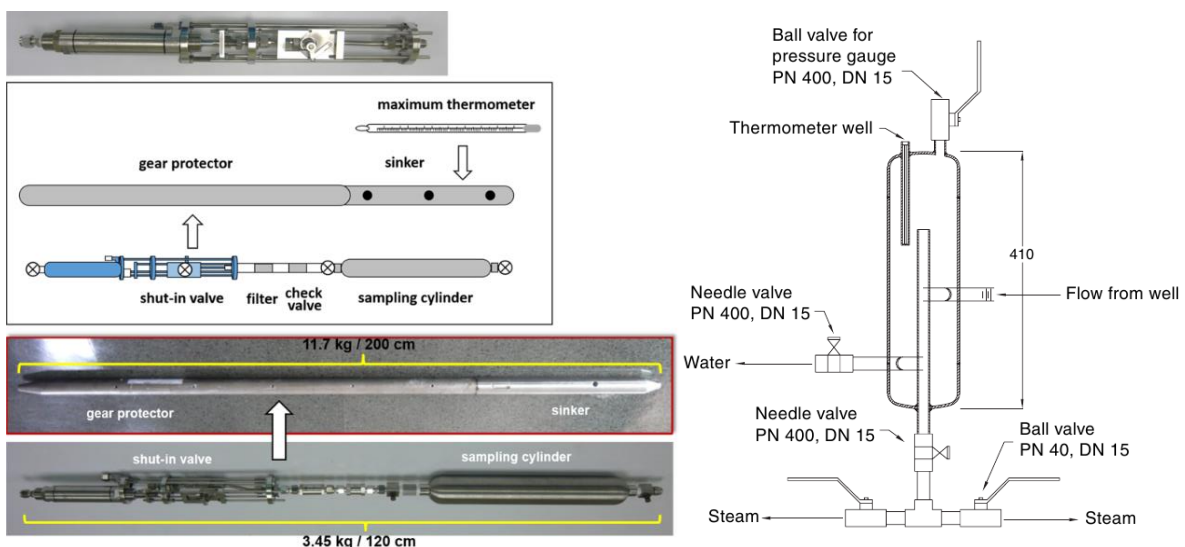


Figure 96 : (à gauche) Dispositif de prélèvement *in situ* de saumure géothermale. (Source : (Hsieh et al. 2021)). (à droite) Dispositif de prélèvement en surface. (Source : (Arnórsson et al. 2006))

Ces saumures pourront rapidement être analysées au sein du laboratoire du Groupe Vulcan (Figure 97).



Figure 97 : Laboratoire de chimie du Groupe Vulcan basée à Karlsruhe

9.2 Planning

Le travail préliminaire sur affleurement et en laboratoire pourra être effectué précocement dans le chronogramme des opérations de recherches. Les autres méthodes (analyse des cuttings, des carottes, prélèvements et dosages géochimique) seront réalisées soit de manière synchrone avec le forage, soit dans la continuité de la phase de test du forage (Figure 98).

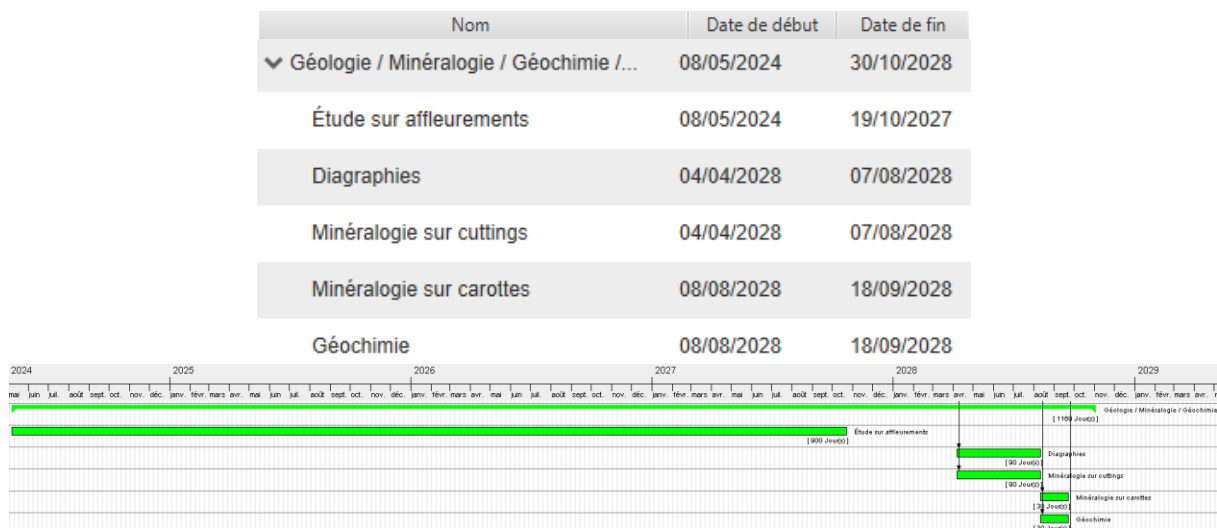


Figure 98 : Planning prévisionnel pour la mise en œuvre des méthodes d'exploration géologiques, minéralogiques et géochimiques.

9.3 Coût

Le coût le plus important sera lié au carottage des parties réservoirs ciblés dans le cadre de ce projet (Tableau 15). Il apparaît cependant important d'acquérir ces données afin de qualifier le type de réservoir rencontré dans la perspective du second puits.

Étude sur affleurement et en laboratoire	Diagraphies	Minéralogie sur cuttings	Minéralogie sur carotte	Géochimie de surface et in situ	Coût total
50 k€	400 k€	100 k€	900 k€	150 k€	1 600 k€

Tableau 15 : Coût estimatif des méthodes permettant la qualification du réservoir géothermique (géologie, minéralogie, géochimie).

10 Synthèse de la chronologie d'acquisition de données

Il est à noter que l'objectif global de cette campagne exploratoire (Figure 99) est de non seulement mettre en œuvre les méthodes ayant classiquement montrées leur pertinence mais également d'acquérir des données de types R&D afin de proposer une réflexion quant aux méthodes géophysiques disponibles et l'apport de chacune d'entre-elles.

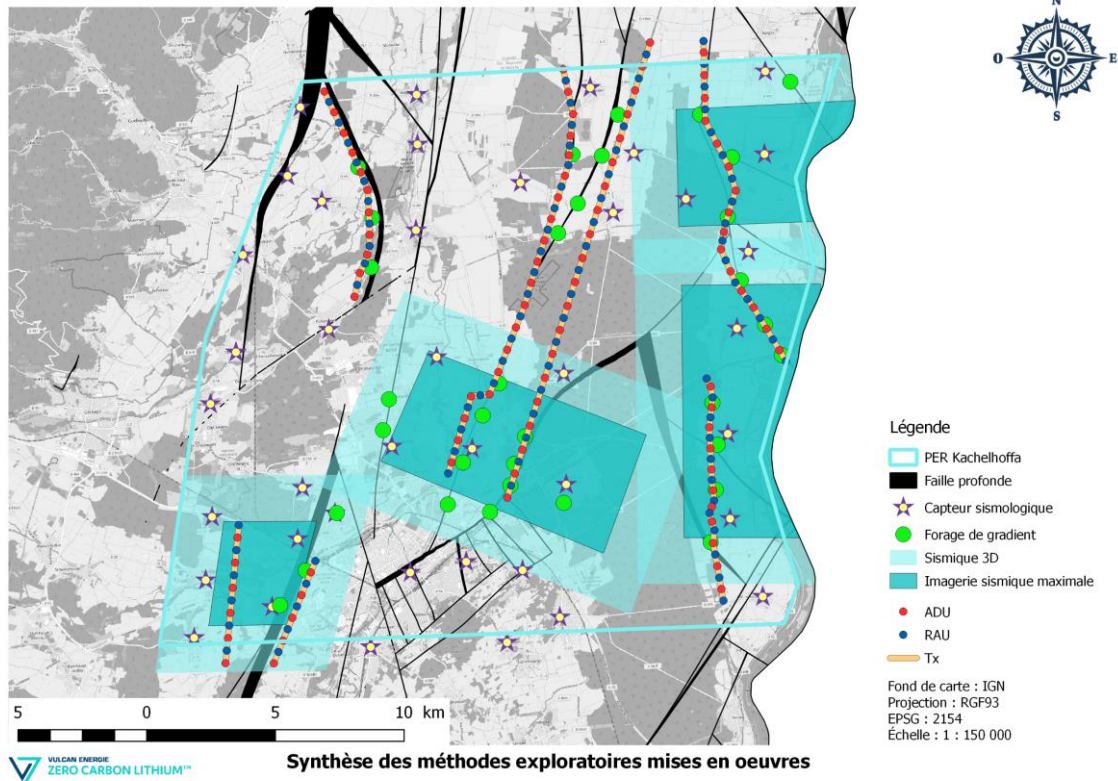


Figure 99 : Synthèse du programme exploratoire qui sera mise en œuvre par Vulcan Énergie France.

De plus, il paraît important de construire un modèle issu de données multidisciplinaires qu'il sera par la suite possible d'alimenter avec les données d'exploitation afin d'avoir un réel suivi du réservoir durant toute la vie du projet (Figure 100).

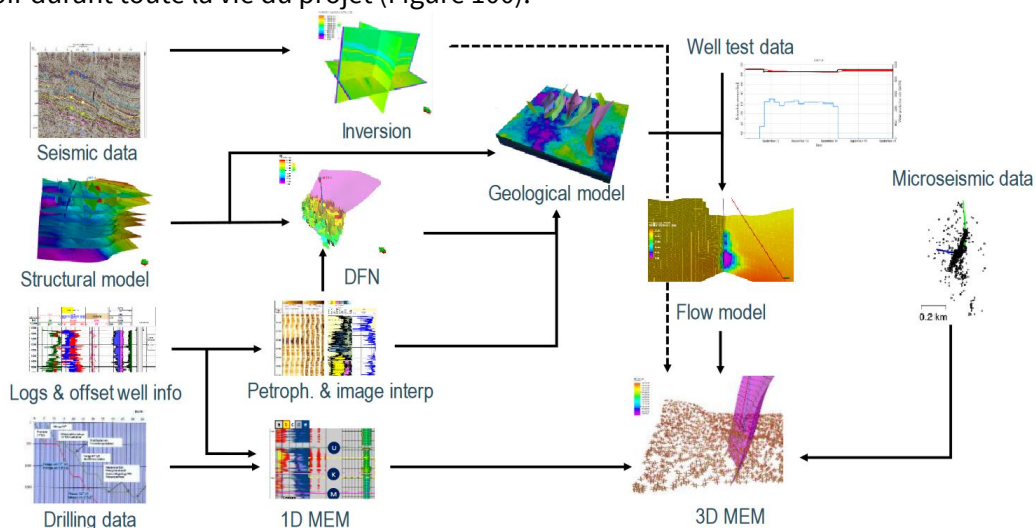


Figure 100 : Schéma d'intégration des données multidisciplinaires et multi échelles composant un projet de géothermie profonde. (Source : (Mandiac et al. 2018))

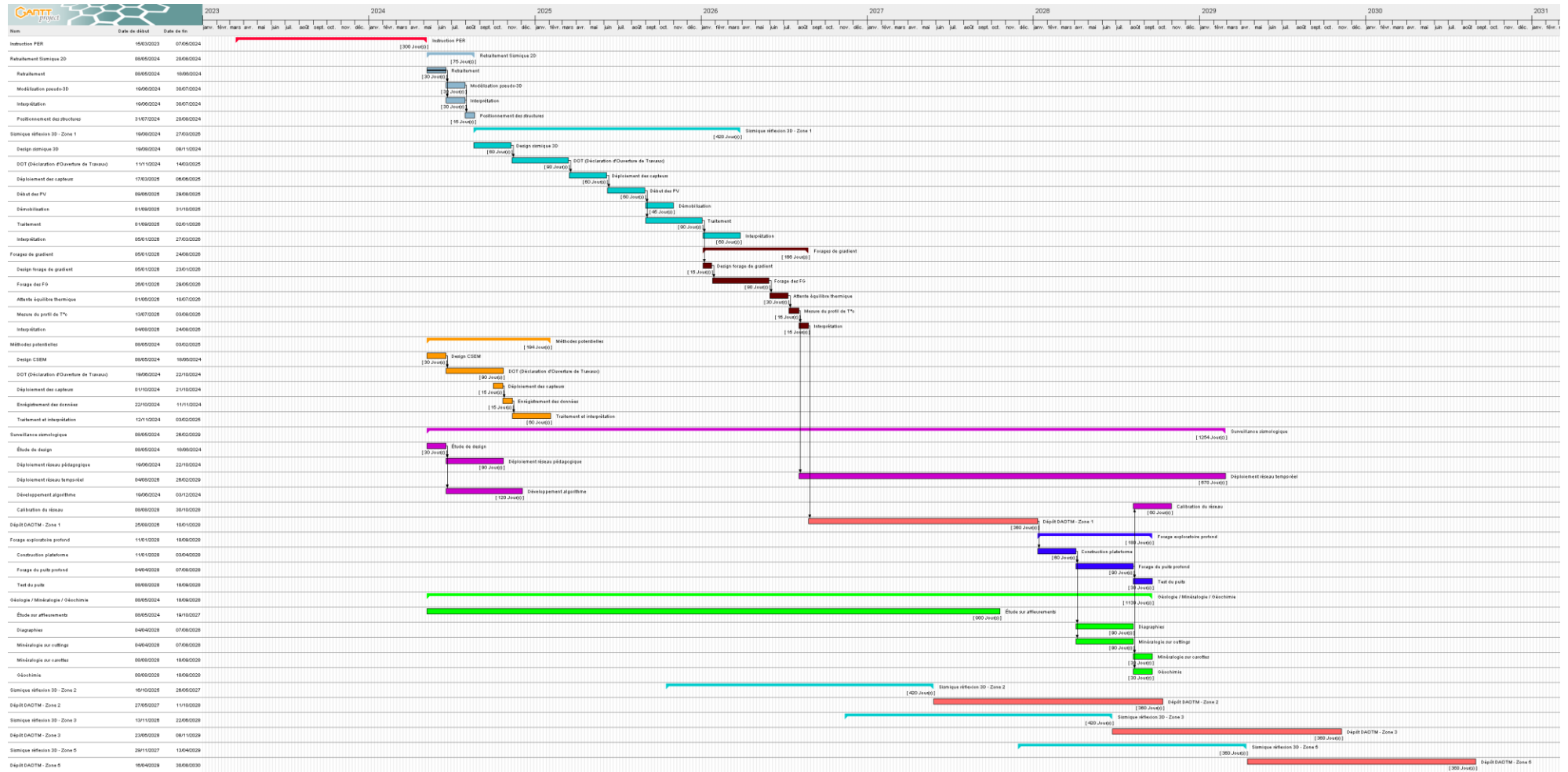


Figure 101 : Chronogramme de la campagne exploratoire de Vulcan Énergie France

11 Synthèse du coût de l'exploration

Le programme exploratoire décrit dans ce document a détaillé les méthodes envisagées ainsi que présenté des designs d'acquisition réalistes permettant d'établir une estimation financière elle aussi la plus réaliste possible (Tableau 16). Les principaux coûts sujets à variation sont ceux de la sismique 3D et du forage profond. Pour le premier, il sera revu à la baisse si des points de vibration venaient à ne pas pouvoir être acquis en raison de contraintes surfaces et enfin pour le second, il sera possiblement revu à la hausse si la durée du forage venait à être accrue.

Classe de méthodes	Type de méthodes	Coût d'exploration	Coût total par méthode
Méthodes potentielles	CSEM	440 k€	490 k€
	Gravimétrie	50 k€	
Méthodes sismiques	Sismique 2D	[40 - 1 580] k€	[3 820 - 13 100] k€
	Sismique 3D – Zone 1	2 980 k€	
	Sismique 3D – Autres zones	7 740 k€	
	Surveillance sismologique	780 k€	
	Corrélation de bruit sismique	20 k€	
Forage de gradient	Profil de température	670 k€	670 k€
Forage profond	Caractérisation du réservoir	8 100 k€	8 100 k€
Hydrogéologique, hydromécanique	Géologie	50 k€	1 600 k€
	Diagraphies	400 k€	
	Minéralogie	1 000 k€	
	Géochimie	150 k€	
			Total
			[14 680 - 23 960] k€

Tableau 16 : Synthèse des coûts du programme exploratoire proposé par Vulcan Énergie France.

L'effort financier et technique qui sera mise en œuvre par Vulcan Énergie France permettra d'identifier rapidement le potentiel géothermique au droit du périmètre sollicité.

La capacité financière est de Vulcan Énergie France se trouve être garantie par le Groupe Vulcan par le biais de la lettre de confort jointe en annexe 1.

12 Engagement de Vulcan Énergie France

Le programme exploratoire décrit autant techniquement que financièrement dans ce document est souscrit en application du Décret n°2006-648 du 2 juin 2006 relatif aux titres miniers.

La société Vulcan Énergie France, société par actions simplifiées à associé unique, ayant son siège social situé au 84 route de Strasbourg, 67500 Haguenau, immatriculée au registre du commerce et des sociétés de Strasbourg sous le n° 919 194 845 ; représentée par Mr Horst KREUTER, prend l'engagement :

1. De transmettre au préfet le programme de travaux du reste de l'année en cours dans le mois qui suit l'octroi du titre et, avant le 31 décembre de chaque année, le programme de travaux de l'année suivante ;
2. De présenter au directeur régional de l'industrie, de la recherche et de l'environnement dans le mois qui suivra l'octroi du permis, le programme de travaux du reste de l'année en cours, avant le 31 décembre de chaque année, le programme de travaux de l'année suivante et, au début de chaque année, le compte rendu des travaux effectués au cours de l'année écoulée ;
3. De demander l'octroi d'un titre d'exploitation ou de renoncer au droit à concession ou au permis d'exploitation prévu par les articles L. 134-2 et L. 134-3 du code minier dès qu'un gîte a été reconnu exploitable ;
4. De respecter l'engagement financier souscrit tel qu'indiqué dans le présent document au chapitre 4 et de tenir à la disposition du ministre chargé des mines une comptabilité spéciale ou un registre des dépenses ainsi que les justificatifs des travaux réalisés permettant de contrôler l'exécution de cet engagement financier.

Pour Vulcan Énergie France SAS,
Mr Horst KREUTER,
Président



13 Bibliographie

- Abdelfettah, Y. et al., 2019. Resistivity image under GRT1-2 geothermal doublet of the rittershoffen EGS project as revealed by magnetotelluric. In *European Geothermal Congress*. Den Haag, The Netherlands.
- Abdelfettah, Y. et al., 2020. Using highly accurate land gravity and 3D geologic modeling to discriminate potential geothermal areas: Application to the Upper Rhine Graben, France. *Geophysics*, 85(2), pp.G35–G56.
- Aichholzer, C., 2019. *Le log complet de la stratigraphie de la zone rhénane ainsi que les modalités stratigraphiques, sédimentaires et structurales de la transition socle-couverture: application à la géothermie profonde*.
- Aichholzer, C. et al., 2016. New stratigraphic interpretation of the Soultz-sous-Forêts 30-year-old geothermal wells calibrated on the recent one from Rittershoffen (Upper Rhine Graben, France). *Geothermal Energy*, 4(1), pp.1–26.
- Aichholzer, C., Düringer, P. & Genter, A., 2019. Detailed descriptions of the lower-middle Triassic and Permian formations using cores and gamma-rays from the EPS-1 exploration geothermal borehole (Soultz-sous-Forêts, Upper Rhine Graben, France). *Geothermal Energy*, 7(1), pp.1–28.
- Amundsen, L. & Landrø, M., 2008. Seismic Imaging Technology: Part II: Lessons from Wide Azimuth Subsalt Imaging in Deepwater Gulf of Mexico.
- Anthony, R.E. et al., 2019. Do low-cost seismographs perform well enough for your network? An overview of laboratory tests and field observations of the OSOP Raspberry Shake 4D. *Seismological Research Letters*, 90(1), pp.219–228.
- Arnórsson, S. et al., 2006. Sampling and analysis of geothermal fluids. *Geofluids*, 6(3), pp.203–216.
- Baig, A. & Urbancic, T., 2010. Microseismic moment tensors: A path to understanding frac growth. *The Leading Edge*, 29(3), pp.320–324.
- Baujard, C. et al., 2017. Hydrothermal characterization of wells GRT-1 and GRT-2 in Rittershoffen, France: Implications on the understanding of natural flow systems in the Rhine Graben. *Geothermics*, 65, pp.255–268.
- Cameselle, A.L., 2010. Mapping of Sedimentary Bodies by 3D Seismic Reflection Data. Application to the pre-Messinian Ebro Margin.
- Cocherie, A. et al., 2004. Datation U-Pb des deux faciès du granite de Soultz (Fossé rhénan, France). *Comptes Rendus Geoscience*, 336(9), pp.775–787.
- Cotton, J., 2019, 4D seismic data analysis and processing for underground monitoring: time-lapse, continuous-time and real-time.

- Darnet, M. et al., 2021. *Characterizing deep hydrothermal fluid circulation in the Upper Rhine Graben (France) with electromagnetic methods*,
- Dezayes, C. et al., 2013. Forage d'exploration géothermique GRT-1. Suivi géochimique des fluides et caractérisation des zones fracturées. *Rapport final BRGM/RP-62546-FR*.
- Di Giulio, G., M. Punzo, P. P. Bruno, F. Cara, and A. Rovelli, 2019, Using a vibratory source at Mt. Etna (Italy) to investigate the wavefield polarization at Pernicana Fault: Near Surface Geophysics, v. 17, no. 4, p. 313–329.
- Duringer, P. et al., 2019. The complete lithostratigraphic section of the geothermal wells in Rittershoffen (Upper Rhine Graben, eastern France): a key for future geothermal wells La colonne lithostratigraphique complète du doublet géothermique de Rittershoffen (Fossé Rhénan Supérieur, Est de la France): les clés pour de futurs puits géothermiques. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 190(1).
- Duringer, P. & Vecsei, A., 1998. Middle Triassic shallow-water limestones from the Upper Muschelkalk of eastern France: the origin and depositional environment of some early Mesozoic fine-grained limestones. *Sedimentary Geology*, 121(1-2), pp.57–70.
- Galgaro, A. et al., 2018. Soil thermal conductivity from early TRT logs using an active hybrid optic fibre system.
- GAUCHER, E. et al., 2016. Propagation of Velocity Model Errors in Earthquake Absolute Locations: Application to the Rittershoffen Geothermal Field. In *FourtyFirst Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, February 22T24*.
- Gillot, E., Game changing technology in seismic imaging applied to geothermal industry.
- Glaas, C. et al., 2019. How Do Secondary Minerals in Granite Help Distinguish Paleo-from Present-Day Permeable Fracture Zones? Joint Interpretation of SWIR Spectroscopy and Geophysical Logs in the Geothermal Wells of Northern Alsace. *Geofluids*, 2019.
- Glaas, C., 2021. *Mineralogical and structural controls on permeability of deep naturally fractured crystalline reservoirs*.
- Holmgren, J.M. & Werner, M.J., 2021. Raspberry Shake Instruments Provide Initial Ground-Motion Assessment of the Induced Seismicity at the United Downs Deep Geothermal Power Project in Cornwall, United Kingdom. *The Seismic Record*, 1(1), pp.27–34.
- Hsieh, P.-S. et al., 2021. The GTF Sampler: A new downhole equipment for geothermal fluid sampling and its testing results in the Chingshiu geothermal field, Ilan, Taiwan. *Geothermics*, 94, p.102077.
- Küperkoch, L. et al., 2016. EP3: Entwicklung eines Verfahrens zur hochauflösenden, manuellen und automatischen Ortung und Charakterisierung induzierter, seismischer Ereignisse in Tiefengeothermieprojekte.

- Lehuteur, M., 2015. *Étude d'un réservoir géothermique profond par corrélation de bruit sismique ambiant.*
- Lehuteur, M. et al., 2018. Reservoir imaging using ambient noise correlation from a dense seismic network. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(8), pp.6671–6686.
- Lengliné, O., Boubacar, M. & Schmittbuhl, J., 2017. Seismicity related to the hydraulic stimulation of GRT1, Rittershoffen, France. *Geophysical Journal International*, 208(3), pp.1704–1715.
- M. Darnet, C.M.C.D.S.M.L.C., 2020. *Etude technico-économique des méthodes d'exploration pouvant être mises en œuvre pour réduire l'aléa géologique des opérations de géothermie profonde en métropole,*
- Magnenet, V. et al., 2014. Two-dimensional THM modelling of the large scale natural hydrothermal circulation at Soultz-sous-Forêts. *Geothermal Energy*, 2(1), pp.1–21.
- Mandiuc, A. et al., 2018. Integrated Modeling of a Geothermal Fractured Reservoir- Understanding Risk and Performance. In *80th EAGE Conference and Exhibition 2018*. pp. 1–5.
- Maurer, V., 2019. *Demande de PER dit « Permis lithium d'Outre-Forêt » - Mémoire technique,*
- Maurer, V. et al., 2018. Geothermal reservoir temperature estimation derived from gradient wells in a continental rift context (Upper Rhine Graben). In *43rd Stanford geothermal workshop, Stanford, California, USA*. pp. 12–14.
- Maurer, V. et al., 2020. Seismicity induced during the development of the Rittershoffen geothermal field, France. *Geothermal Energy*, 8(1), pp.1–31.
- Mouchot, J. et al., 2019. Deep Geothermal Plants Operation in Upper Rhine Graben: Lessons Learned. In *European Geothermal Congress*.
- Neeb, S. et al., 2020. Characterisation of deep hydrothermal fluids circulation in the Upper Rhine Graben (France) with electromagnetic methods. In *GET2020*.
- Portier, N. et al., 2018. New results on the gravity monitoring (2014-2017) of Soultz-sous-Forêts and Rittershoffen geothermal sites (France). *Geothermal Energy*, 6(1), pp.1–20.
- Rasouli, F.S., 2022. Does mudcake change the results of modeling gamma-gamma well-logging? *Nuclear Engineering and Technology*.
- Ravier, G., 2021. Rittershoffen heat plant for industry and Rittershoffen heat plant for industry and Soultz-sous-Forêts power plant (Rhine Soultz-sous-Forêts power plant (Rhine Graben, France). In *MEET*.
- Ravier, G. et al., 2016. Towards a comprehensive environmental monitoring of a geothermal power plant in the Rhine graben. In *Proceedings of the European Geothermal Congress*,

Strasbourg, France. pp. 19–23.

Rawlinson, N., Pozgay, S. & Fishwick, S., 2010. Seismic tomography: a window into deep Earth. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 178(3-4), pp.101–135.

Rebel, E. et al., 2011. Real-time detection of microseismic events using surface array. In *Third EAGE Passive Seismic Workshop-Actively Passive 2011*. p. cp–225.

Richard, A. et al., 2020. How to upscale geothermal energy from deep fractured basement in the Upper Rhine Graben? The impact of a new 3D seismic dataset. In *Proceedings World Geothermal Congress 2020*.

Richard, A. et al., 2019. *Presentation - Upper Rhine Graben: the largest exploration by 3D seismic reflection*,

Saemundsson, K., 2008. Geology and gradient wells. *Georgsson, LS, Holm, DH, Simiyu, SM, Mariita, N., Short course III on exploration for geothermal resources. UNU-GTP \& KenGen, Naivasha, Kenya, UNU-GTP CD SC-07*.

Salaun, N. et al., 2020. High-resolution 3D seismic imaging and refined velocity model building improve the image of a deep geothermal reservoir in the Upper Rhine Graben. *The Leading Edge*, 39(12), pp.857–863.

Savitri, K.P. et al., 2021. VNIR-SWIR infrared (imaging) spectroscopy for geothermal exploration: Current status and future directions. *Geothermics*, 96, p.102178.

Schlupp, A. et al., 2019. SeismoCitizen: A project combining seismology and human science approaches based on a deployment of a dense low cost seismic network hosted by citizens. In *Geophysical Research Abstracts*.

Schreilechner, M., P. Keglovic, M. Jud, C. Eichkitz, and E. Lüschen, 2017, Three Component Seismic Acquisition Implemented for Deep Geothermal Exploration in Vienna, in Fourth Sustainable Earth Sciences Conference: p. 1–5.

Schüppler, S. et al., 2021. Uncertainty analysis of wireless temperature measurement (WTM) in borehole heat exchangers. *Geothermics*, 90, p.102019.

Snieder, R. & Wapenaar, K., 2010. Imaging with ambient noise. *Physics Today*, 63(9), pp.44–49.

Stussi, J.-M. et al., 2002. The hidden monzogranite of Soultz-sous-Forêts (Rhine Graben, France). Mineralogy, petrology and genesis. *Géologie de la France*, (1), pp.45–64.

Thomas L. Davis, M. L., 2019, Multicomponent Seismic Monitoring.

Vallier, B. et al., 2020. THM modeling of gravity anomalies related to deep hydrothermal circulation at Soultz-sous-Forêts (France). *Geothermal Energy*, 8(1), pp.1–21.

- Vidal, J., 2017. La géothermie profonde dans le Fossé Rhéna / Module Géothermie - Master M2.
- Vidal, J. et al., 2018. Use of SWIR spectroscopy for the exploration of permeable fracture zones in geothermal wells at Rittershoffen (Alsace, France). *Geothermal Resources Council, Reno, USA*, p.10.
- 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). *Geothermal Energy*, 3(1), pp.1–28.
- Wawerzinek, B., H. Bunn, H. von Hartmann, and D. C. Tanner, 2021, S-wave experiments for the exploration of a deep geothermal carbonate reservoir in the German Molasse Basin: *Geothermal Energy*, v. 9, no. 1, p. 1–21.
- Xiao, F. et al., 2014. High-density 3D point receiver seismic acquisition and processing-a case study from the Sichuan Basin, China. *first break*, 32(1).
- Zhu, S. et al., 2019. Fault Identification Based on Wide-Azimuth Seismic Data: A Case Study in the Bohai Bay. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 7(5), pp.294–299.

14 Annexe 1 : lettre de confort