



arverne
GROUP

Membre d'Arverne Group
entreprise à mission

2gré



Mise à jour des informations relatives aux Permis Exclusif de Recherche de Géothermie de Strasbourg de 2gré (Anciennement Georhin)

4.

Mémoire technique

Rédaction du document

Référence interne	Date	Rédacteur	Vérificateur	Approbateur
4_PER de Strasbourg	18/08/2023	Romain DUHAMEL	Damien BEVILLON	Pierre BROSSOLLET

Diffusion du document

Date	Destinataire	Organisme	Version numérique	Version papier
14/08/2023		DGEC / BRESS	1	0
14/08/2023		DREAL	1	0

2gré - 49 Route d'Agen 47310 Estillac
Adresse de correspondance : 2gré chez Arverne Group, 2 avenue Pierre Angot 64000 Pau
SAS au capital de 3 210 000 € | RCS AGEN 529 770 646 | Siret : 529 770 646 00030 | Code APE 7112B

www.2gre.fr

Table des matières

1	Préambule	7
2	Etat des lieux des engagements réalisés sur le PER de Strasbourg.....	12
2.1	Réalisation des forages VDH-GT1 et VDH-GT2	13
2.2	Choix initiaux des zones sollicitées	13
2.3	Synthèse de la ressource minière découverte sur Vendenheim	15
3	Etat des lieux des travaux engagés sur la première période de prolongation du PER de « Strasbourg » .	15
3.1	Retour d'expérience du projet de Vendenheim	15
3.1.1	Préambule rappel du contexte	15
3.1.2	Mauvaise connexion entre les puits.....	16
3.1.3	Limites des études avant forage dans l'analyse de l'aléa sismique	16
3.1.4	Renforcement des études exploratoires	17
3.1.5	Limite des outils scientifiques prévisionnels sur la gestion du risque sismique durant la conduite des tests.....	17
3.2	Détail des réalisations et connaissances du Projet de Vendenheim.....	17
3.2.1	Finalisation du forage VDH-GT1	17
3.2.2	Finalisation du forage VDH-GT2.....	20
3.2.3	Test Hydrauliques sur Vendenheim.....	22
3.2.4	Suivis et analyses Géochimiques.....	24
3.2.5	Surveillance microsismique.....	24
3.2.6	Evolution de la modélisation structurale	28
3.2.7	Evolution de la modélisation réservoir.....	28
3.2.8	Analyse du risque sismique associé au projet	29
3.2.9	Analyse de Georhin sur la séquence sismique du cluster de Strasbourg Relation entre la sismicité de Strasbourg Nord et Vendenheim	30
3.3	Réalisation Secteur ouest de l'Eurométropole de Strasbourg : Projets d'Eckbolsheim et d'Hurtigheim	34
3.3.1	Modèle géologique.....	34
3.3.2	Modèle réservoir	35
3.3.3	Programme des travaux relatifs au forage géothermique	36
3.3.4	Surveillance microsismique.....	44
3.3.5	Activité de forage.....	47
3.3.6	Etude de l'aléa sismique sur le secteur ouest du PER.....	48
3.3.7	Surveillance de la nappe	49
3.4	Réalisation sur la Partie Nord du PER de Strasbourg	50
3.4.1	Projet de faisabilité et d'implantation à proximité de Haguenau	50
3.4.2	Secteur de Bischwiller/Herrlisheim	51
4	Récapitulatif des dépenses	55

4.1	Récapitulatif des dépenses engagées	55
ANNEXES.....		57

Table des figures

Figure 1: synthèse des démarches administratives et des engagements effectués et envisagés sur le PER par 2 ^{gré} .	9
Figure 2: Localisation du périmètre du PER de Strasbourg.	11
Figure 3: Contexte Structural du Fossé Rhénan	14
Figure 4: Chronogramme des points clés post événements sismiques de Strasbourg Nord	16
Figure 5: Architecture finale du forage VDH-GT1 double jambes.	18
Figure 6: Points vibrés lors de l'acquisition VSP.	19
Figure 7: Ligne sismique 2D complémentaire	20
Figure 8: Schéma de l'architecture finale du puits VDH-GT2.	21
Figure 9 : Schéma simplifié utilisé sur VDH.	22
Figure 10: Carte du réseau de surveillance pour le site de Vendenheim.	26
Figure 11 : Traffic Light System basé sur la magnitude (en haut) et sur le PGV (en bas).	27
Figure 12: Workflow de la création du modèle structural et de son évolution.	28
Figure 13: Coupe verticale de la trajectoire des puits des deux doublets géothermiques sur le site d'Eckbolsheim.	35
Figure 14 : a) Exemple du profile hydraulique. b) Exemple du run flowmeter	38
Figure 15 : Exemple du test de production.	38
Figure 16 : Exemple de Stimulation hydraulique et suivi microsismique.	39
Figure 17 : Exemple d'Acidification (injection d'acide en trait vert).	41
Figure 18 : Exemple de stimulation thermique et suivi microsismique.	42
Figure 19 : Courbe de restitution du traceur (BTC) (Bernard Sanjuan et al., 2016).	43
Figure 20: Schéma simplifié utilisé sur VDH.	43
Figure 21 : Exemple d'Amélioration de l'indice d'injectivité (trait rouge).	44
Figure 22 : Traffic Light System basé sur la magnitude (en haut) et sur le PGV (en bas).	46
Figure 23: Schéma d'explication du déploiement de l'outil wireline pipe conveyed de Schlumberger.	47
Figure 24: L'aléa sismique	48
Figure 25: Schéma de synthèse de la zone de failles sur le site de Vendenheim issu du rapport du comité d'experts du 28 mars 2022.	49
Figure 26: Vue générale des implantations piézométrique (d'après vue aérienne Google Earth).	50
Figure 27: Potentiel de consommation de chaleur et postes sources à proximité d'Haguenau	51
Figure 28: : Localisation de la faille ciblée pour le doublet géothermique de Vendenheim et zone d'implantation possible pour de futurs clusters géothermiques.	52
Figure 29: Localisation et mise en évidence des lignes sismiques utilisées dans la création du modèle structural GeORG.	52
Figure 30: a) Carte structurale au toit du socle d'après GeORG, localisations des 2 coupes (AB) et (CD). b) Coupe géologique verticale AB. c) Coupé géologique verticale CD.	53
Figure 31: a) Coupe géologique NW-SE allant de Haguenau jusque Herrlisheim. b) Coupe géologique verticale AB	55

Table des tableaux

Tableau 1: Tableau de synthèse des engagements réalisés dans le cadre de la première période de prolongation du PER de Strasbourg au regard des objectifs initiaux.	12
Tableau 2 : Liste des réactifs et remarques associées.	39
Tableau 3: Récapitulatif des dépenses engagées au cours de la première durée du Permis Exclusif de Recherche Strasbourg.	55

1 Préambule

La société 2gré (dont le nom précédant était Georhin et précédemment Fonroche Géothermie) a déposé, le 6 juillet 2011, une demande de permis minier d'autorisation de recherche au titre de la géothermie haute température sur le bassin Rhénan, pour une durée de 5 ans renouvelable, conformément au code minier titre I, article L122-3. Le permis a été octroyé par Arrêté Ministériel du 10 juin 2013. (DEV1310015A)

Une première prolongation a été déposée le 25 décembre 2017 puis complétée le 19 avril 2018. La prolongation a été octroyée par Arrêté ministériel du 29 avril 2019 (NOR : TRER1912740A). Elle expire le 23 Juin 2023.

Une demande de deuxième prolongation a été déposée le 23/01/2023 pour une prolongation de 5 ans soit jusqu'au 23 Juin 2028.

Le présent document porte sur la mise à jour de la deuxième demande de prolongation du PER de Strasbourg suite à l'intégration de la société Georhin, devenue 2gré, au sein d'Arverne Group.

Le PER de « Strasbourg » est situé en Région Grand-Est dans le département du Bas-Rhin. La superficie totale du permis couvre 572 km². Au total, 84 communes sont concernées, partiellement ou en totalité par le PER.

La superficie du territoire proposé dans le cadre de cette deuxième prolongation reste inchangée avec 572 km².

La deuxième période du PER a été consacrée :

- Sur le secteur de Vendenheim :
 - A la réalisation du 1er puits du doublet géothermique VDH-GT1 en mode double jambes
 - A la réalisation du 2 -ème puits du doublet géothermique VDH-GT2
 - La mise à jour du modèle géologique et de la compréhension de la zone de faille
 - La réalisation des tests hydrauliques sur chacun des 2 puits
 - L'installation de la pompe de production dans le puits producteur VDH-GT1
 - A la construction de la centrale de cogénération de Vendenheim
 - A la mise en place d'un réseau de surveillance microsismique complémentaire (réseau de 40 géophones non permanents)
 - A la mise en œuvre d'un programme de test scientifique demandé par la Préfecture du Bas Rhin pour vérifier une éventuelle relation entre le doublet de Vendenheim et un essaim sismique situé au Nord de Strasbourg
 - A la surveillance des puits du doublet de Vendenheim suite à de la sismicité ressentie dans le cadre des tests scientifiques
 - A la consolidation du REX géosciences suite à la sismicité ressentie
- Sur les secteurs d'Eckbolsheim et Hurligheim :
 - A la synthèse bibliographique des bases de données géologiques et de forages qui ont permis d'identifier la parcelle qui accueillera le doublet géothermique
 - A la mise en place d'un réseau de surveillance microsismique complémentaire
 - A la mise en place d'un réseau de surveillance de la nappe alluviale
 - A la détermination des différentes trajectoires des doublets géothermiques ECK et HRT
 - A la négociation de livraison chaleur et finalisation de contrat de vente de chaleur sur des réseaux chaleur du territoire
 - A la réalisation d'un programme de forage détaillé opérationnel
 - A l'analyse géomécanique de l'état de stabilité des failles cibles à l'état initial
- Sur le secteur Nord du PER (Haguenau/Herrlisheim) :

- A la synthèse bibliographique des bases de données géologiques et de forages qui ont permis d'identifier plusieurs zones d'intérêt pour accueillir un doublet géothermique.
- A l'étude d'un futur projet d'exploration géophysique pseudo 3D
- A la négociation d'un contrat de vente de chaleur

L'engagement de dépenses cumulé sur le PER de Strasbourg sur 10 ans est de 35.9M€, financé sur fonds propres. Il a été dépassé largement à hauteur de 87.72M€ soit un investissement supplémentaire réalisé de 51.82 M€. Cet effort inédit en géothermie en France montre l'engagement majeur de 2gré sur ce PER et sur la filière française.

Le programme du renouvellement du PER comporte un engagement financier plus fort porté à 24.15 M€. La demande s'inscrit donc parfaitement dans l'esprit de l'article 142-1 du Code Minier lequel rappelle la nécessité d'un engagement financier au moins égal à la période précédente pour pouvoir prétendre au renouvellement de droit d'un permis de recherche existant.

Dès que les résultats d'exploitation d'un doublet seront validés, 2gré fera une demande de concession pour la zone concernée.

Une synthèse des démarches administratives et des engagements effectués et planifiés par 2gré à ce jour est illustrée par la Figure 1.

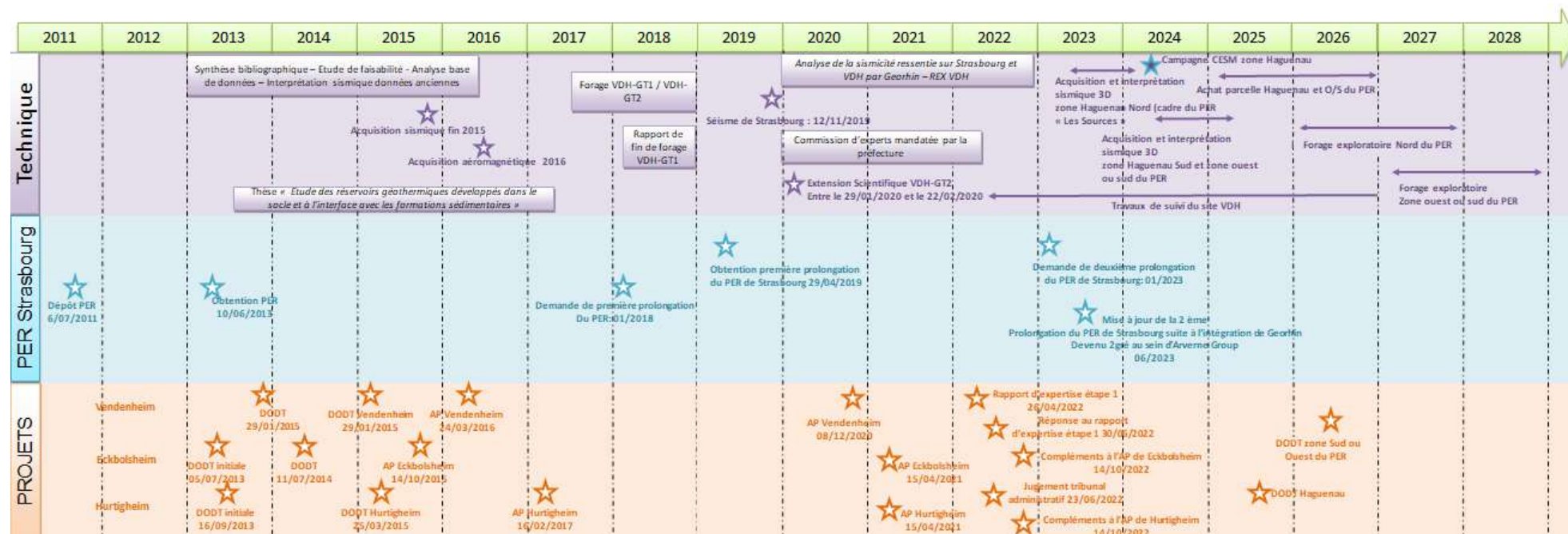


Figure 1: synthèse des démarches administratives et des engagements effectués et envisagés sur le PER par 2^{gré}.

Carte du Permis Exclusif de Recherche de Géothermie Haute Température dit de Strasbourg au 1/100 000

2gré



Figure 2: Localisation du périmètre du PER de Strasbourg.

2 Etat des lieux des engagements réalisés sur le PER de Strasbourg

Tableau 1: Tableau de synthèse des engagements réalisés dans le cadre de la première période de prolongation du PER de Strasbourg au regard des objectifs initiaux.

Objectifs demande 1 ^o prolongation (issu de la demande de 1 ^o prolongation)	Réalisation 1 ^o prolongation	Évaluation de l'atteinte des objectifs
La fin de la réalisation du 2^{ème} puits du doublet du projet de Vendenheim et les tests longue durée associés ; Le développement de la valorisation thermique très basse température sur la totalité du PER	Sur le secteur de Vendenheim : réalisation du 1^{er} puits du doublet géothermique VDH-GT1 en mode double jambes réalisation du 2^{-ème} puits du doublet géothermique VDH-GT2 mise à jour du modèle géologique et de la compréhension de la zone de faille réalisation des tests hydrauliques sur chacun des 2 puits installation de la pompe de production dans le puits producteur VDH-GT1 construction de la centrale de cogénération de Vendenheim mise en place d'un réseau de surveillance microsismique complémentaire (réseau de 40 géophones non permanents) mise en œuvre d'un programme de test scientifique demandé par la Préfecture du Bas Rhin pour vérifier une éventuelle relation entre le doublet de Vendenheim et un essaim sismique situé au Nord de Strasbourg surveillance des puits du doublet de Vendenheim suite à de la sismicité ressentie dans le cadre des tests scientifiques consolidation du REX géosciences suite à la sismicité ressentie	Les forages ont été réalisés avec un retour d'expérience très important pour le derisquage technique de la construction des futurs puits de captage de la ressource géothermale dans le fossé rhénan et la mise au point de l'appareil de forage et de technologies et méthodes adaptées à la construction des puits dans ce contexte. Les programmes de tests longues durées ont été modifiés pour prendre en compte les demande du comité d'expert et ont conduit à la sismicité ressentie entre Octobre et Décembre 2020. Les méthodes géosciences ont été adaptées aux contraintes du fossé rhénan et de la zone spécifique du bassin de Strasbourg. Une déclaration de levé géophysique pseudo 3D a été déposée en vue de recalculer cette méthode avec les datas existantes et pouvoir la déployer ensuite sur les autres cibles. Le REX sur la sismicité a été partagé avec l'association professionnelle AFPG en vue de l'établissement du guide national de bonnes pratiques. Plusieurs projets de valorisation thermique basse température ont été préparés avec des acteurs du territoire (agricole, pisciculture, éco quartier...).
La réalisation du forage exploratoire des doublets des projets de Eckbolsheim (ECK) et/ou de Hurtigheim (HRT) ;	Sur les secteurs d'Eckbolsheim et Hurtigheim : synthèse bibliographique des bases de données géologiques et de forages qui ont permis d'identifier la parcelle qui accueillera le doublet géothermique mise en place d'un réseau de surveillance microsismique complémentaire mise en place d'un réseau de surveillance de la nappe alluviale détermination des différentes trajectoires des doublets géothermiques ECK et HRT	Les problématiques de sismicité sur le site de Vendenheim ont amené une suspension momentanée des arrêtés de travaux qui n'ont donc pas pu être réalisés dans le temps de la 1^o prolongation. Le REX géoscience de Vendenheim a été appliqué aux deux projets. Une déclaration de levé géophysique pseudo 3D, préalablement à recalculer sur le site de Vendenheim, a été déposée afin d'affiner la connaissance structurale et les études géomécaniques. Les pré contrats de fournitures de chaleur ont été négociés et la réservation du

	négociation de livraison chaleur et finalisation de contrat de vente de chaleur sur des réseaux chaleur du territoire réalisation d'un programme de forage détaillé opérationnel analyse géomécanique de l'état de stabilité des failles cibles à l'état initial	passage des canalisations sous le GCO ont été réalisés. Les piézomètres et géophones prévus par les arrêtés préfectoraux de travaux sont en place sur les deux sites. Un pré programme de forage a été établi pour le site d'Hurtigheim avec pré calage des trajectoires.
L'acquisition de données géophysiques nouvelles sur la zone de Haguenau La finalisation des études de valorisation chaleur sur la zone de Haguenau La maîtrise foncière pour la parcelle de forage sur la zone de Haguenau. La demande d'autorisation d'ouverture de travaux miniers sur la zone de Haguenau	Sur le secteur Nord du PER (Haguenau/Herrlisheim) : Synthèse bibliographique des bases de données géologiques et de forages qui ont permis d'identifier plusieurs zones d'intérêt pour accueillir un doublet géothermique. étude d'un futur projet d'exploration géophysique pseudo 3D négociation d'un contrat de vente de chaleur	Un site de forage a été pré sélectionné sur la zone industrielle de Herrlisheim . Un pré contrat de fourniture chaleur a été discuté avec un partenaire local en charge de la réalisation des réseaux. Plusieurs projets d'acquisition pseudo 3D ont été préparés, en attente des recalages méthodologiques indiqué précédemment.

2.1 Réalisation des forages VDH-GT1 et VDH-GT2

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

Un second objectif a été réalisé par la construction de la centrale de cogénération et l'installation de la pompe de production dans le puits producteur VDH-GT1 vers 800m de profondeur.
A la date de clôture de la présente mise à jour, 2gré continuer le suivi microsismique et la surveillance des puits et installations du site de Vendenheim.

De plus, pour tirer l'ensemble des leçons des événements passés, le groupe Arverne a proposé la mise en place d'un comité compétent pour analyser les données du site et les contenus et résultats des futures études complémentaires afin de déterminer l'avenir du site. Selon les recommandations de ce comité, et infine, des autorités compétentes, des travaux de remédiation ou au contraire l'abandon définitif des deux puits VDH-GT1&2 pourra être décidé au cours de cette phase du PER. Le programme inclut ainsi le budget nécessaire aux études permettant de décider sur une solution de remédiation ou d'abandon (P&A) des deux puits.

2.2 Choix initiaux des zones sollicitées

Le Fossé Rhénan est un bassin d'effondrement Tertiaire qui s'étend sur plus de 300 km de longueur de Bâle au Sud et à Mayence et Francfort au Nord. Il a une orientation NNE-SSW et présente une largeur moyenne de 40 km. Il est bordé à l'Ouest par les Vosges, et à l'Est par la forêt Noire (Figure 3).

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

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

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

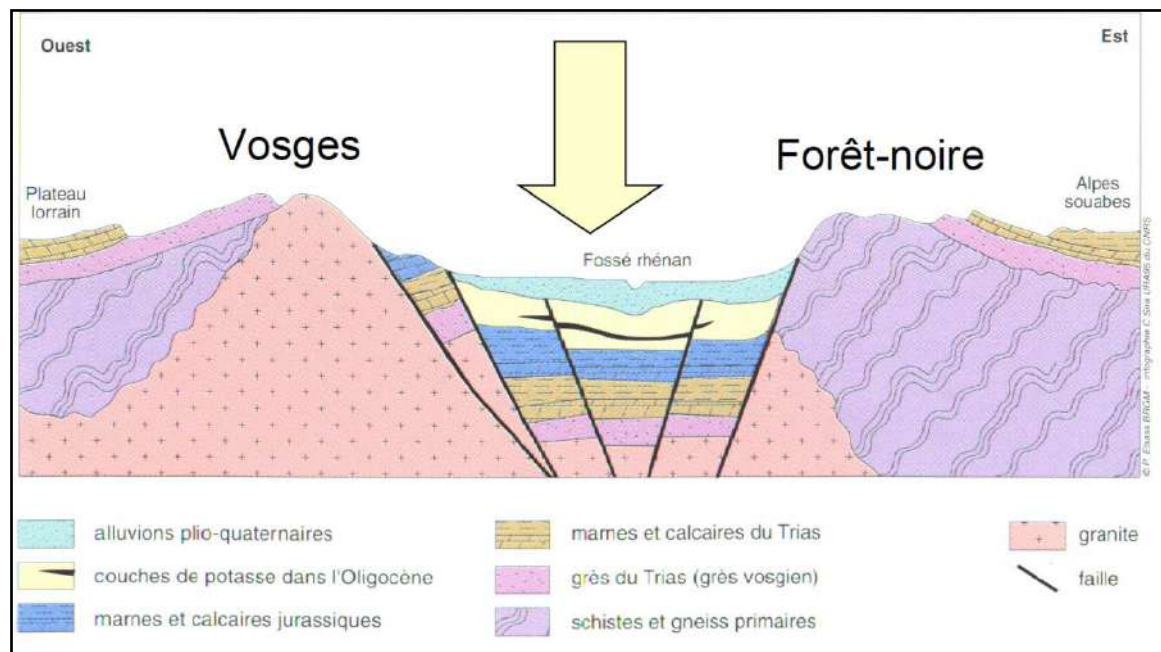


Figure 3: Contexte Structural du Fossé Rhénan

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

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

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

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

Ce travail a permis de définir :

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

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

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

- Pechelbronn
- Permis géothermiques accordés

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

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

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

Les conclusions apportées par ces différents travaux ont orienté 2^{gré} à viser les gites géothermiques situés autour de l'agglomération de Strasbourg : Vendenheim, Eckbolsheim et Hurligheim et ceux vers Haguenau.

L'objectif initial de Georhin sur ces secteurs est de réaliser des clusters de 2 doublets géothermiques. Chacun des doublets géothermiques a pour objectif de produire 350 m³/h à une température en tête de puits supérieure à 180°C. Cet objectif est réajusté dans le cadre de la reprise par Arverne Group sur des cibles principalement de chaleur haute température et accessoirement de cogénération électrique.

2.3 Synthèse de la ressource minière découverte sur Vendenheim

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

3 Etat des lieux des travaux engagés sur la première période de prolongation du PER de « Strasbourg »

3.1 Retour d'expérience du projet de Vendenheim

3.1.1 Préambule rappel du contexte

Les problématiques sismiques du doublet de Vendenheim sont apparues en Octobre 2022 lors des tests à vocation scientifique demandés par la Préfecture du Bas Rhin suite à l'apparition de l'essaim sismique du Nord de Strasbourg du 12/11/2019. Le chronogramme ci-dessous (Figure 4) résume les étapes de cette séquence qui a provoqué la suspension depuis le 04/12/2020 des opérations de circulation en mode doublet sur le doublet de Vendenheim et par conséquent, au vu de l'incertitude juridique créée par les actions de la Préfecture du Bas Rhin, la suspension aussi de tous les investissements de Georhin sur l'ensemble de ses PER en France, dans l'attente de la clarification juridique sur la lecture du Code Minier, toujours en cours au moment de rédiger cette demande de prolongation.

The timeline illustrates the progression of the Puits 2 extension project, starting in 2019 and continuing through 2021. Key events include the start of scientific drilling extension in January 2020, the completion of scientific drilling in February 2020, and the start of the final test protocol in May 2020. The timeline also shows the progression of seismicity monitoring, with sismicité levels of 3.3 in Strasbourg, 2.7, 3.3, and 2.5 recorded at various points. The project is currently in the final stages of the test protocol, with the final test protocol being completed in May 2020. The timeline also shows the progression of seismicity monitoring, with sismicité levels of 3.3 in Strasbourg, 2.7, 3.3, and 2.5 recorded at various points. The project is currently in the final stages of the test protocol, with the final test protocol being completed in May 2020.

Date	Event
09/12/2019	Poursuite forage Puits 2 selon programme de forage de mai 2018 (jusqu'à 5900 m)
10/12/2019	Information DREAL et experts sur forage extension scient, janvier 2020
12/11/2019	Com sismicité
12/11/2019	Suspension de toute injection dans le doute
12/11/2019	Sismicité 3.3 Strasbourg
12/11/2019	Com RENASS sismicité induite
29/01/2020	Début forage extension de 5860 à 6300 m
22/02/2020	Fin forage extension scientifique
26/11/2019	Confirmation par DREAL de faisabilité du forage de l'extension du Puits 2
30/11/2019	Commission d'experts
29/09/2020	Courrier préfectoral validant le test de traçage et la lecture de l'AP sur la pression limite lue sur le réservoir
15/05/2020	Protocole final test de traçage
11/10/2020	Démarrage des tests
27/10/2020	Proposition nouveau protocole à la DREAL
27/10/2020	Analyses causalité
27/10/2020	Com sismicité
27/10/2020	Procédure d'arrêt des tests engagée
27/10/2020	Sismicité 2.7
08/11/2020	Com sismicité
08/11/2020	Proposition nouveau protocole à la DREAL
08/11/2020	Sismicité 2.2
23/11/2020	Proposition nouveau protocole à la DREAL
04/12/2020	Conf de presse et com sismicité
04/12/2020	Information du CSS
04/12/2020	Enclenchement procédure d'arrêt technique
04/12/2020	Sismicité 3.3
25/12/2020	Com sismicité
25/12/2020	Sismicité 2.5
30/12/2020	Com conformité
30/12/2020	Com CSS
30/12/2020	Conf presse Préfecture Non conformités
29/12/2020	Le puits producteur est à l'arrêt
02/01/2021	La circulation du doublet est arrêtée
02/01/2021	Le puits injecteur de Vendenheim a été arrêté à 12h30
30/12/2020	Les puits sont en observation jusqu'à stabilisation à la pression naturelle

3.1.2 Mauvaise connexion entre les puits

Le modèle géologique réalisé par Georhin possède un degré de détail supplémentaire par rapport au modèle GeORG d'échelle régionale de par les données locales supplémentaires utilisées pour l'interprétation sismique. Pour autant, la structuration du socle se révèle beaucoup plus complexe.

3.1.3 Limites des études avant forage dans l'analyse de l'aléa sismique

Les failles cibles cartographiées à partir des données géophysiques ne présentent pas de caractère instable que ce soit en amont du projet via les études géomécaniques, mais également confirmé par l'absence d'événements ressentis associés à ces structures. Les essais sismiques ressentis survenus sur le site de Vendenheim sont associés à des structures d'ordre secondaire localisées dans le socle et non identifiables à partir de levés sismiques 2D.

3.1.4 Renforcement des études exploratoires

Les études exploratoires doivent être renforcées avec des technologies nouvelles de géophysique ou de mesures dans les zones d'intérêt à l'intérieur des puits. En effet, les éléments survenus sur le site de Vendenheim ont mis en évidence les limites de connaissances associées aux outils d'exploration traditionnels et des mesures de puits dans le cadre de projets de géothermie profonde de haute température (>180 °C).

Il est nécessaire d'entreprendre une cartographie la plus fine et précise possible du réseau de failles au droit de l'implantation du doublet géothermique afin de limiter au maximum l'aléa sismique. La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** présente l'évolution du modèle local de Vendenheim entre avant forage et après forage grâce à l'analyse de l'ensemble des données.

Une des techniques largement utilisées, notamment dans le milieu pétrolier, est la sismique réflexion 3D. Les résultats permettent d'obtenir un cube 3D précis du sous-sol. Cette technique n'était pas applicable en 2016 vu le caractère urbanisé des secteurs visés mais les derniers développements technologiques en acquisition géophysique et notamment en acquisition et traitement du signal ouvre actuellement de nouvelles possibilités.

Ce retour d'expérience sur l'intérêt d'un levé de mesures géophysiques 3D se traduit par un dépôt de déclaration de levé suite aux présentes études complémentaires. Il permettra d'approfondir l'état des connaissances du réservoir et de l'aléa sismique. Sa mise en œuvre relève d'une méthode novatrice de sismique réflexion dite « pseudo 3D », développée depuis 2020 par les entreprises en charge du levé.

Une autre limite a été identifiée dans le cadre du projet de Vendenheim, celles des mesures de puits. Des diagraphies ont été entreprises sur le forage VDH-GT1 jusque dans le Permien afin de caractériser au mieux les propriétés pétrographiques et la fracturation. Les températures mesurées au droit du réservoir, à plus de de 200°C, se sont révélées au-dessus des limites de températures des outils de logging disponibles (autour de 170/180 °C) et ce même en utilisant des phases de circulation de boue visant à refroidir les sondes.

Il semble donc nécessaire d'intégrer ces technologies dans les programmes d'acquisitions de données de puits pour les projets visant des températures supérieures à 180°C.

3.1.5 Limite des outils scientifiques prévisionnels sur la gestion du risque sismique durant la conduite des tests

Les outils scientifiques prévisionnels comme par exemple la loi de McGarr ou le TLS (Traffic Light System) doivent être améliorés pour mieux appréhender le risque sismique pendant la conduite des tests.

3.2 Détail des réalisations et connaissances du Projet de Vendenheim

3.2.1 Finalisation du forage VDH-GT1

Le forage VDH-GT1 est construit sur un principe multidrain avec deux jambes dénommées VDH-GT1-ST4 et VDH-GT1-ST9 (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) relié par le conducteur principal sur la partie cuvelée n

on productrice, comme présenté dans la Figure 5. Le forage a commencé le 13 juin 2017 et s'est terminé le 05 août 2020.

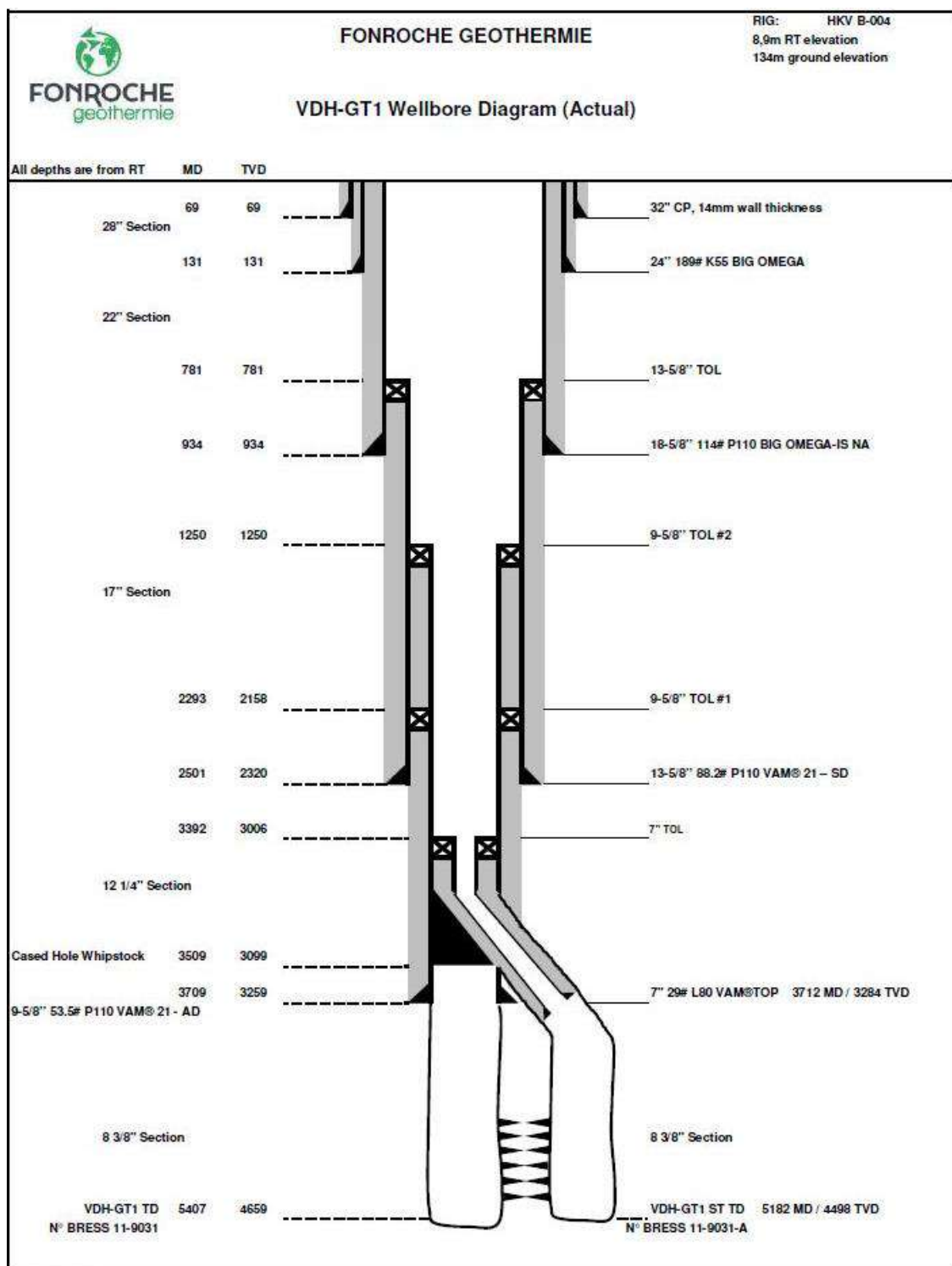


Figure 5: Architecture finale du forage VDH-GT1 double jambes.

3.2.1.1 Données acquises

Données de puits

Des diagraphies ont été acquises au cours de VDH-GT1 sur la partie sédimentaire. Un log de sismique de puits (VSP) a été acquis. Cette sismique de puits précise le modèle de vitesse associée aux profondeurs des formations rencontrées (Figure 25).

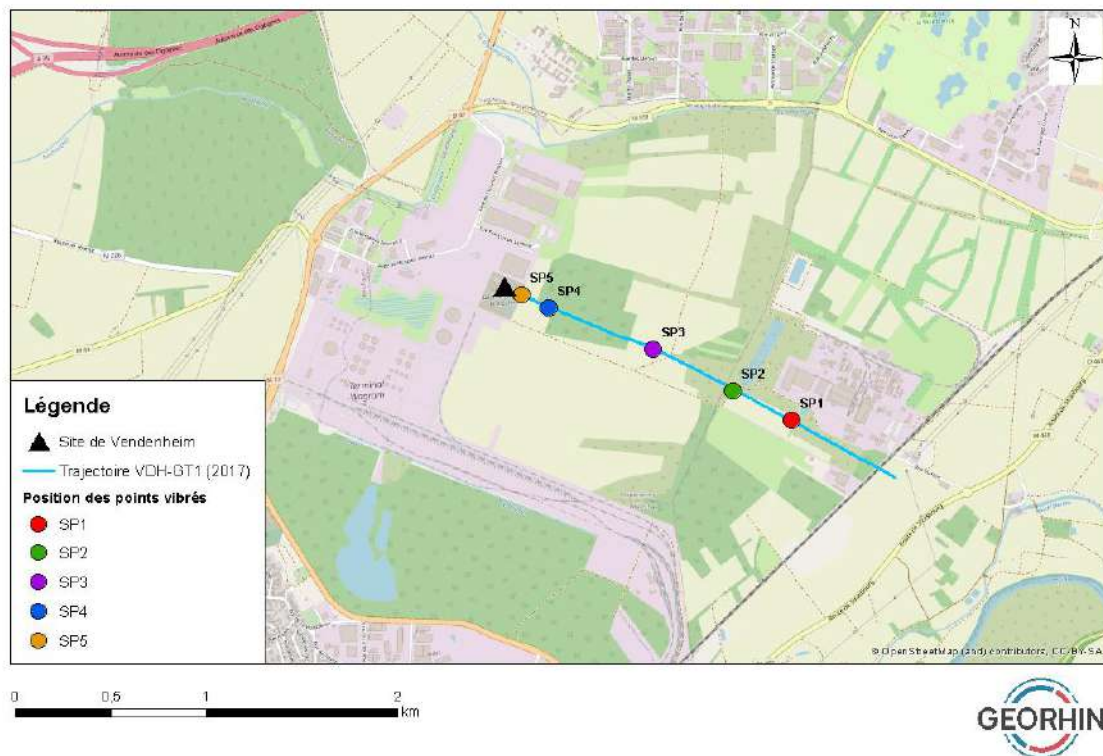


Figure 6: Points vibrés lors de l'acquisition VSP.

Acquisition sismique complémentaire

Une ligne sismique complémentaire sur la trajectoire prévisionnelle du VDH-GT2 a été acquise en novembre 2017, sur 12 km (Figure 7). Cette ligne apporte une précision élevée sur la structuration et la localisation de la zone de faille ciblée (réservoir).

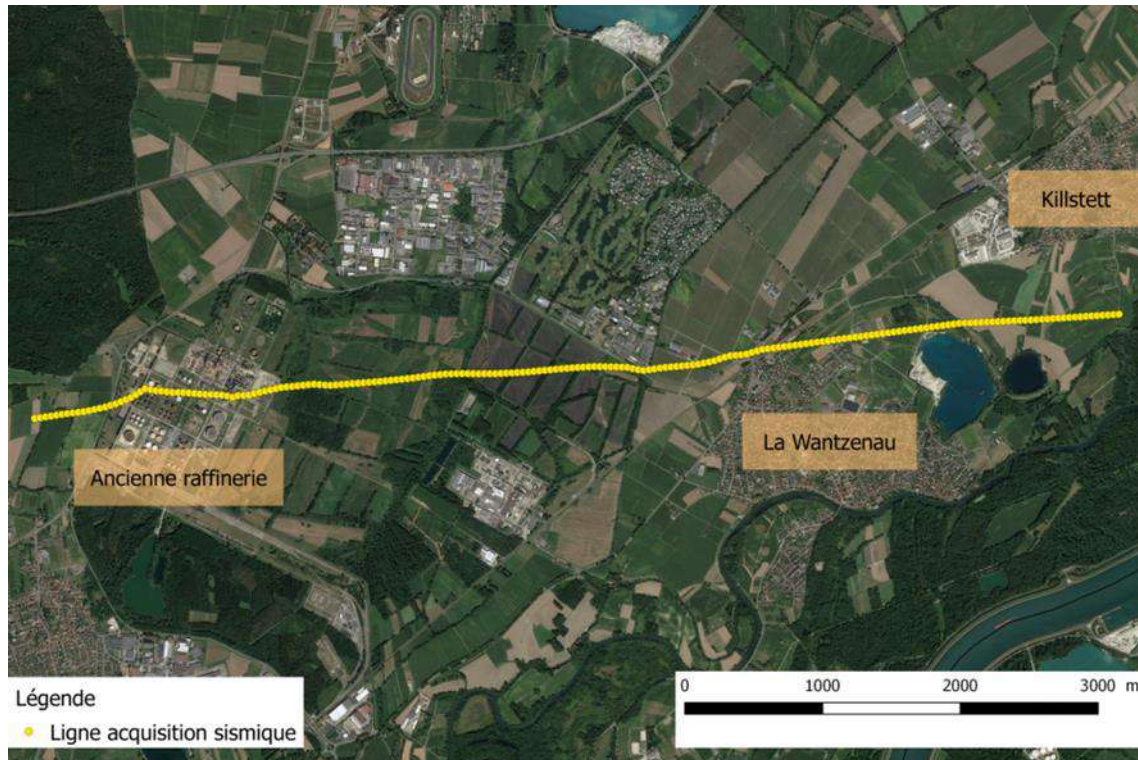


Figure 7: Ligne sismique 2D complémentaire

3.2.2 Finalisation du forage VDH-GT2

Le forage VDH-GT2 a commencé le 18 août 2018 et s'est terminé le 22 février 2020, le schéma de l'architecture finale du puits est présenté sur la Figure 8 . L'objectif est une ressource en eau géothermale à 200 °c et de 450 m³/h dans un réservoir de faille régionale dans le socle.

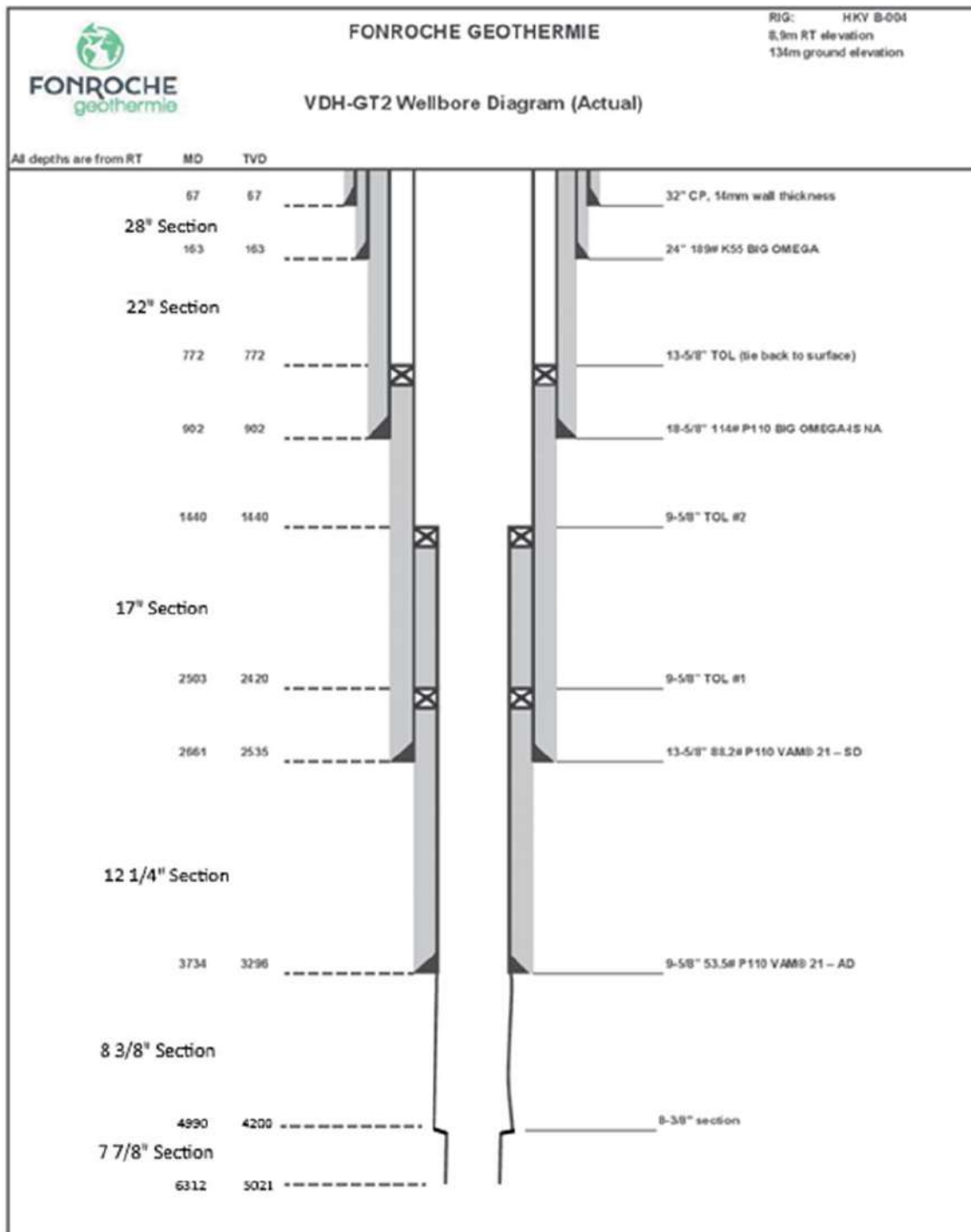


Figure 8: Schéma de l'architecture finale du puits VDH-GT2.

3.2.3 Test Hydrauliques sur Vendenheim

Les puits VDH-GT1 et VDH-GT2 ont montré une température mesurée en régime transitoire supérieure à 200 °C.

Plusieurs opérations ont été réalisées pour vérifier les caractéristiques du réservoir, comme la stimulation de puits (hydraulique, chimique ou thermique), complémentés par des techniques d'acquisition de données dans le puits ou réservoir (mesures indirectes et directes).

Tous ces tests fournissent des informations sur la pression, température et débit d'exploitation, ainsi que sur les paramètres du réservoir tels que la perméabilité, porosité, zones de fracturation entre autres. Les tests de stimulation permettent d'améliorer la perméabilité à proximité des puits géothermiques, dont l'objectif principal est d'incrémenter l'indice d'injectivité, en ciblant le débit et température d'exploitation et en limitant le risque sismique associé. Les techniques utilisées durant la période 2018 et 2020 sont détaillées ci-dessous :

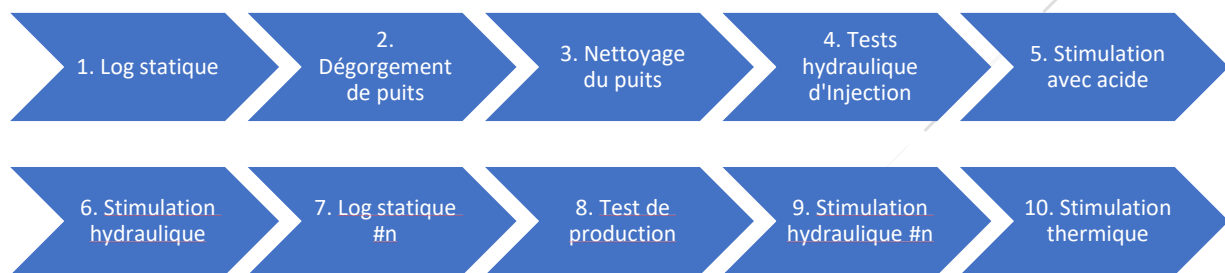


Figure 9 : Schéma simplifié utilisé sur VDH.

3.2.3.1 Première campagne : VDH GT1 – 2018

Georhin, dans le but d'évaluer les caractéristiques hydrauliques et thermiques du réservoir de VDH, développe un protocole de stimulation avec quelques acquisitions de données complémentaires.

3.2.3.2 Deuxième campagne : VDH GT2 – 2019

Toujours dans l'objectif d'évaluer les caractéristiques hydrauliques et thermiques du réservoir, un protocole de stimulation a été réalisé pour confirmer la ressource exploratoire de la première faille du système de VDH-GT2 (bi faille). Les mêmes conditions de débit et température d'exploitation ainsi que d'IP/II de la première campagne ont été visées. La période couverte d'environ 6 mois (fin avril jusqu'au début novembre 2019) consacrée à l'évaluation et au développement du réservoir.

3.2.3.3 Troisième campagne : VDH GT1

Ayant finalisé la deuxième jambe de VDH-GT1 et en raison des tests avortés lors de la campagne 2018, la réalisation d'un nouveau protocole complet est prévue pour vérifier si la 2^e jambe de VDH GT1 se comporte de manière similaire à la précédente.

La période d'environ 1 mois (début octobre jusqu'au début novembre 2019) est consacrée à l'évaluation et au développement du réservoir.

Malheureusement, un colmatage au fond de puits VDH GT1 s'est produit lors des tests de Novembre, suite au dernier test de production en air lift qui semble avoir fragilisé la partie Permien. Les tentatives de débouchage hydraulique du 6 au 7 Novembre 2019 n'ont pas permis de résoudre ce problème.

3.2.3.4 Quatrième campagne : VDH GT1 – 2020

Après avoir terminé la deuxième jambe du GT1, forée pour remplacer celle perdue lors du colmatage de Novembre 2019 et suite aux retards provoqués par le COVID, un protocole partiel de test est réalisé pour vérifier que la jambe #2 est bien connectée à la #1 et que l'IP est au minimum équivalent, avant d'engager la procédure de test en doublet selon protocole d'expertise.

3.2.3.5 Cinquième campagne : VDH GT2 – 2020 (nettoyage préalable au test en doublet)

Après avoir reconnecté la deuxième jambe sur GT1 et suite à accord de la préfecture du bas Rhin, le protocole de nettoyage du deuxième puits a commencé. Ce protocole partiel est réalisé pour établir au moins une première connexion du puits n°2 avec la 2^e faille et le puits VDH-GT1. Le programme normal du développement de puits n'est pas autorisé dans le contexte de l'expertise et du protocole de test de traçage. Il faudra vérifier que les données de connectivités montrent une tendance permettant d'envisager une amélioration pendant les tests de traçage et le fonctionnement en doublet.

3.2.3.6 Test en doublet

Dans le cadre de la demande d'expertise scientifique de la Préfecture du Bas Rhin, le fonctionnement en doublet est engagé début Octobre 2020. La ligne de test était équipée de capteurs de pression et température, un séparateur qui relâchait la vapeur d'eau géothermale, pour ensuite être versée dans un bac déversoir où l'on réalisait des mesures de débit, conductivité, dépôts radioactifs et température à l'extérieur. L'eau géothermale était postérieurement déposée vers le bassin de stockage des eaux géothermales produites (bassin géothermale). Les pompes du RIG prélevaient de l'eau sur ce bassin, et ensuite l'eau était renvoyée vers le puits injecteur. Afin d'assurer le bon fonctionnement pendant les opérations de montée en charge du doublet (descente de la pompe à arbre long -Long shaft pump ou LSP, ...), l'eau de nappe a été utilisée pour ne pas arrêter brusquement l'injection.

L'injection se fait en surface, il n'y a pas de tiges dans le puits et il y a des tuyaux et coudes dans le parcours de l'eau en surface, du point de prélèvement des pompes du RIG (bassin géothermale) au point d'injection (tête de puits ou Wellhead). Le test d'interférence réalisé dans le cadre de l'expertise scientifique déclenche un premier événement sismique ressentie fin Octobre 2020. L'application d'un régime de sécurité en débit artésien après observation ne permet pas d'éviter l'événement sismique du 4/12/2020, après lequel Georhin a décidé d'arrêter progressivement la circulation du doublet.

3.2.3.7 Suivi post test en doublet

Après l'arrêt de la circulation du 02/01/2021, les puits ont commencé progressivement leur stabilisation hydraulique avec le réservoir. Quant au puits producteur GT1, sa colonne d'eau s'est refroidie lors de l'arrêt de la circulation du test en doublet, et un effet de densité limite le retour à la pression artésienne du puits avec une remontée très lente. La pression en tête de puits remonte lentement depuis sa fermeture.

Concernant le puits injecteur GT2 : depuis fin mai 2021 le puits est passé en dessous de la pression artésienne et depuis fin septembre 2022 la lecture en surface est négative, en lien avec le refroidissement induit par l'injection de 2020 et par le phénomène de refroidissement en tête par la nappe phréatique. Le suivi sismique est assuré en continu au travers des stations temporaires et des stations permanentes.

3.2.3.8 Compilation des suivis de Température et LSP

Comme il a été évoqué dans la section 3.2.3, le suivi de température au fond du puits et en surface, ainsi que la mesure du rabattement pendant le test avec la LSP ont été réalisés.

Sur le puits GT2, pendant la deuxième campagne, la pression et température ont été déterminées avec une sonde P&T démontrant une température maximale supérieure à 210 °C

3.2.4 Suivis et analyses Géochimiques

Comme il a aussi été évoqué dans la section 3.2.3 Test Hydrauliques sur Vendenheim, plusieurs analyses géochimiques ont été réalisés à plusieurs reprises pendant les campagnes de stimulation des puits sur Vendenheim. Ces analyses permettent de caractériser le réservoir géothermique, la circulation des fluides et leur origine et sont nécessaires afin de définir les bonnes pratiques d'exploitation industrielle du site, permettant d'anticiper les phénomènes de colmatage et de corrosion.

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

Les échantillons montrent un mélange entre une saumure géothermique et des eaux externes, probablement liées aux fluides injectés dans le puits lors de différentes opérations. L'eau géothermale produite par les puits est salée (NaCl), chaude (d'environ 200°C), acide, et similaire aux eaux géothermales déjà exploitées dans le Fossé rhénan.

La découverte la plus importante est la forte concentration en Lithium en solution.

3.2.5 Surveillance microsismique

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

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

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

3.2.5.1 Le réseau de surveillance

Réseau permanent

Un premier réseau dit permanent a été installé 6 mois avant le début des opérations, conformément à l'arrêté préfectoral (AP) et dans le cas d'Eckbolsheim/Hurtigheim depuis 2017. Les stations sismologiques sont

disposées de part et d'autre du réservoir visé, de façon à enregistrer convenablement tous les signaux. Les 4 types de capteur utilisés sont les suivants : sismomètre courte période (CP) fond de trou (DH) ou de sub-surface, sismomètre large bande (BBS) et accéléromètre.

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

Ce réseau permanent de surveillance microsismique est complété par une surveillance géodésique. Elle est équipée d'une antenne géodésique GNSS et d'un « corner cube » pour le suivi InSAR. Dans le détail, le réseau sismologique étendu s'organise de la façon suivante :

- Réseau sismologique et géodésique permanent de Vendenheim :
 - 3 stations profondes (VDH3, VDH5 et VDH6) : 4 géophones CP/DH de -100 à -80m
 - 1 station de surface (VDH2) : 1 géophone CP
 - 1 station de surface multi-capteur (VDH4) : 1 géophone CP, 1 géophone LP, 1 accéléromètre
 - 1 station géodésique (VHD1) : GNSS + InSAR
- Réseau sismologique et géodésique permanent d'Hurtigheim et d'Eckbolsheim :
 - 1 station profonde (ECK2) : 4 géophones CP/DH de -100 à -80m
 - 4 stations de surface (HURT2, HURT3, ECK3 et ECK5) : 1 géophone CP
 - 1 station de surface multi-capteur (ECK4) : 1 géophone CP, 1 géophone LP, 1 accéléromètre
 - 2 stations géodésiques (HURT1 et ECK1) : GNSS + InSAR

A noter que pour ce dernier réseau, depuis 2019, seules 3 stations (HURT2, ECK2 et ECK4) ont été sélectionnées pour rester actives. La Figure 10 présente donc les 8 stations sismologiques et géodésique permanentes, actives pour la surveillance de la microsismicité sur Vendenheim.

Réseau complémentaire

Un réseau complémentaire et mobile a été installé à partir de février 2020 sur Vendenheim (Figure 10), dans l'intention d'affiner le suivi des essaims de Strasbourg et de Vendenheim. Il se compose de SmartSolo, capteurs sismiques autonomes à 1 ou 3 composantes (1C ou 3C), sensibles aux fréquences à partir de 5 Hz. Les caractéristiques du réseau sismologique complémentaire de Vendenheim sont les suivantes :

- Nombre de stations : environ 46 (35x1C et 11x3C)
- Surface : environ 50 km²
- Résolution : environ 1 km²

Réseau citoyen

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

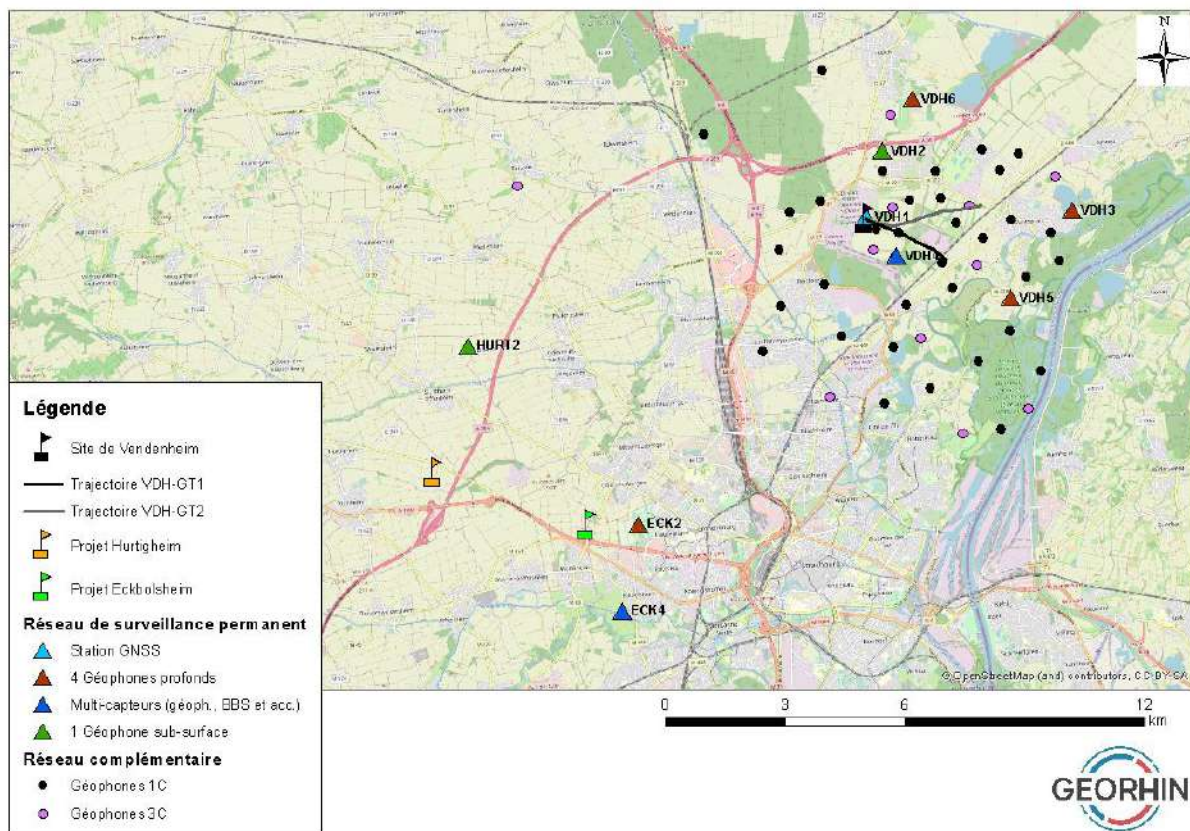


Figure 10: Carte du réseau de surveillance pour le site de Vendenheim.

3.2.5.2 Gestion du risque

Protocole de surveillance

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

La gestion de la sismicité est réalisée en fonction du TLS (traffic light system) dont les seuils de magnitude ont été réduits par rapport à l'AP. En fonction du statut de la variable, les décisions à prendre et les démarches à suivre sur les opérations sont définies selon : le signalement interne, la communication externe et la mise en œuvre des actions sur les opérations. Le protocole (Figure 11) est basé sur un système d'alerte TLS mixte utilisant les critères (variables) suivants :

- Seuils selon : la magnitude locale verticale (MLv) et le peak ground velocity (PGV).
- Prise en compte de la distance aux puits, de l'évolution d'essaims naturels et de l'apparition d'un nouvel essaim.
- Règle prudentielle : définition du taux de sismicité induite et naturelle acceptable.

La gestion de la sismicité induite se base également sur plusieurs analyses complémentaires basées sur des lois scientifiques.

Réseau de mesure des vibrations par rapport à l'habitat

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

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

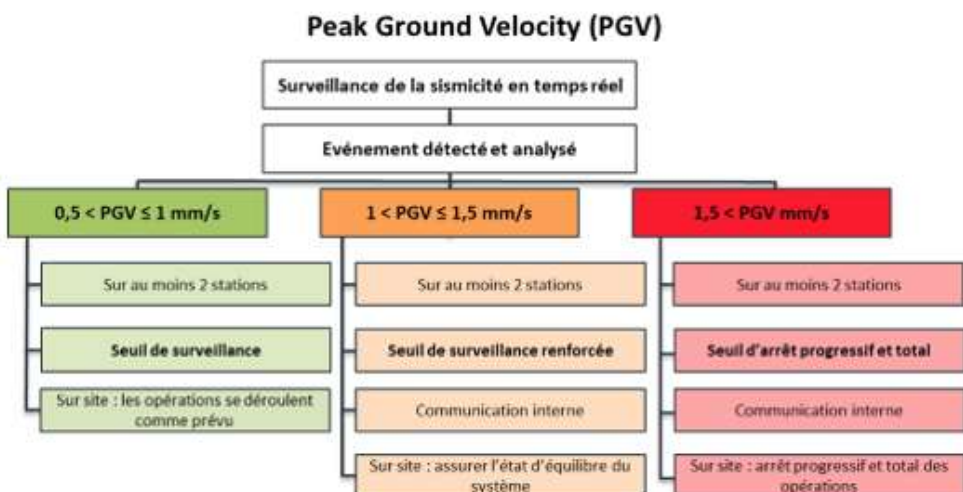
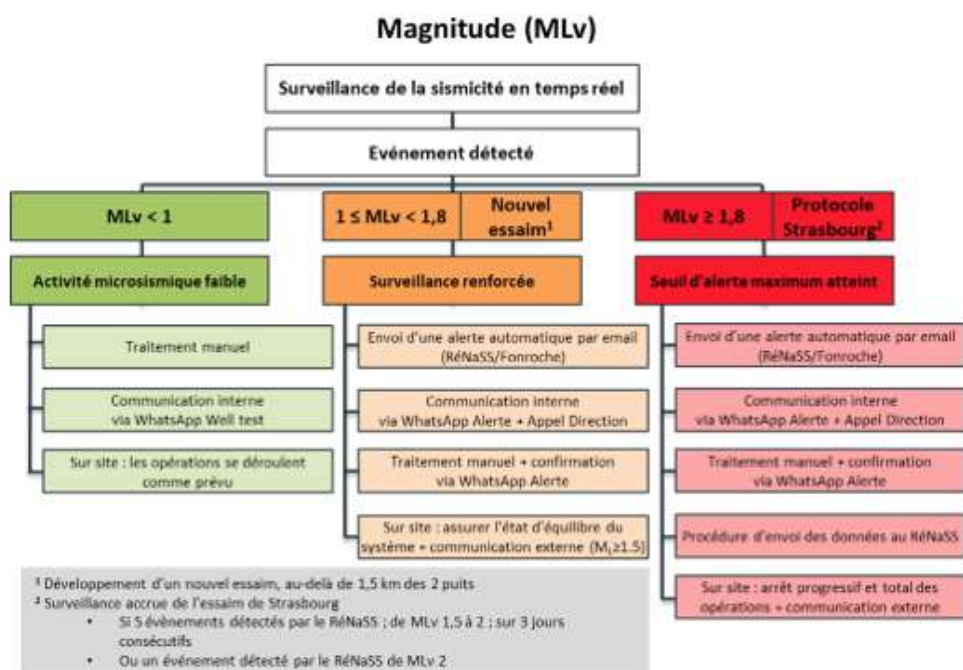


Figure 11 : Traffic Light System basé sur la magnitude (en haut) et sur le PGV (en bas).

3.2.6 Evolution de la modélisation structurale

L'équipe de Georhin a travaillé au fil du temps à la mise à jour et l'amélioration du modèle géologique. Le workflow tel qu'il a été employé est présenté dans la Figure 12. Dans un premier temps, les données utilisées ont concerné la synthèse de toutes les données disponibles dans le secteur d'études : données de puits (température, géologie, profondeur, diagraphies...), lignes sismiques disponibles, gravimétrie, aéromagnétique, données d'analogues à l'affleurement, etc.

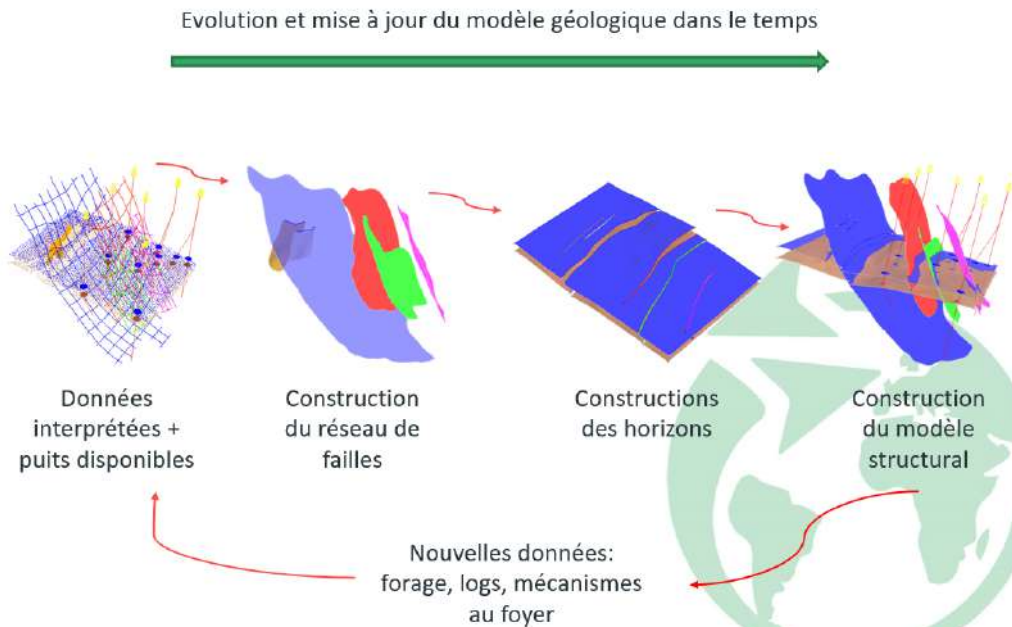


Figure 12: Workflow de la création du modèle structural et de son évolution.

3.2.7 Evolution de la modélisation réservoir

L'exploitation de la chaleur de l'eau géothermale entraînera des différentiels de pression au sein du réservoir, qui sont eux en lien direct avec les propriétés de l'eau géothermale et les caractéristiques hydrauliques et thermique du réservoir géothermique exploité.

Depuis plusieurs années une importante base de données a été mise en place pour caractériser la source géothermale, d'abord focalisée avec le thèse de Morgan Le Lous en collaboration avec l'ENSEGID : « *Pressure, mass and energy transfer in deep water aquifer systems: application to deep geothermal energy* ». Ce travail a été réalisé aussi avec des apports du BRGM (Bureau de Recherche Géologique et Minière), ARMINES (Ecole des Mines de Paris), et le LATEP (Laboratoire de Thermique, Energétique et Procédés de Pau). Plusieurs articles sont disponibles :

- 2014 : Le Lous, M.; Larroque, F. ; Dupuy, A. & Moignard, A. Étude de sensibilité des paramètres systèmes, hydrogéologiques et thermiques d'une sonde géothermique grande profondeur, 24^e Réunion des Sciences de la Terre, Pau, France, 2014, oral presentation.
- 2015: Le Lous, M.; Larroque, F. ; Dupuy, A. & Moignard, A. Thermal performance of a deep open- loop doublet scheme : insights from a synthetic and heterogeneous coupled heat and flow model, 1st Workshop on Numerical Geothermal Simulation, Munich, Germany, 2015, oral presentation.
- 2015: Le Lous, M.; Larroque, F. ; Dupuy, A. & Damy, P.-C. Thermal performance of a deep open- loop doublet scheme : stochastic approach of a synthetic and heterogeneous coupled heat and flow model, FEFLOW 2015 Conference - DHI Worldwide, Berlin, Germany, 2015, oral presentation.

- 2015: Le Lous, M.; Larroque, F. ; Dupuy, A. & Moignard, A. Thermal performance of a deep borehole heat exchanger : Insights from a synthetic coupled heat and flow model, Geothermics (IF of 2;55 in 2016), 2015, 57, 157 - 172.
- 2015: Le Lous, M.; Larroque, F. ; Dupuy, A. & Moignard, A. Thermal performance of a deviated deep borehole heat exchanger : insights from a synthetic coupled heat and flow model, COMSOL Conference 2015 , Grenoble, France, 2015, poster presentation.
- 2017: Le Lous, M.; Larroque, F. ; Dupuy, A. & Damy, P.C. Performance of an open-loop well-doublet scheme located in a deep aquitard-aquifer system : insights from a synthetic coupled heat and flow model, Minor revision, submitted to Geothermics in may 2017.
- 2018: Le Lous, M.; Pryet, A. ; Larroque, F. ; Damy, P.-C. & Dupuy, A. Pre-operational risk study in deep geothermal modeling : insights from a dual medium synthetic model, Uncertainty Quantification in Computational Geosciences, Orléans, ,France, 2018.

De la même façon une thèse CIFRE en collaboration avec l'Université de Lorraine et l'ENSG a été réalisé par Lionel Bertrand, « *Study of geothermal reservoirs developed in the basement and at the interface with sedimentary formations.* ». Ce travail a permis le développement d'une méthodologie de caractérisation du socle réservoir. Plusieurs articles ont également été publiés :

- 2016 : Bertrand L., Géraud Y., Diraison M., Damy PC. A model of permeability and porosity in the different type of basement of the Upper Rhine Graben inferred from outcropping analogues rocks. European Geothermal Congress, Strasbourg, France, 19-24 Septembre, poster.
- 2017: Bertrand L., Géraud Y., Diraison M., Damy PC. Structural and petrophysical characterization: from outcro rock analogue to reservoir model of deep geothermal prospect in South Eastern France. European Geosciences Union General Assembly, 08-13 avril, poster.
- 2018: Bertrand L., Géraud Y., Diraison M. Prediction of matrix reservoir properties in fault zones and weathered layers for deep EGS in basement rocks using outcropping analogs. European Geosciences Union General Assembly, 07-12 avril, poster.

Entre 2011 et 2016, Georhin a utilisé le logiciel de modélisation hydrogéologique FEFLOW de DHI pour répondre aux modèles numériques. Bien qu'il ait permis de modéliser le comportement en pression et en température du réservoir, il a montré certaines limites liées notamment aux calculs de milieux poreux équivalents.

Depuis 2017, des simulations d'écoulement de transferts thermiques et de masse sont réalisées à l'aide d'outils numériques issus de l'industrie O&G. Une collaboration avec L'IFPEN et Beicip Franlab a été menée pour adapter PumaFlow (suite d'OpenFlow) et permettre la construction de structures complexes, notamment avec des milieux à double porosité ou double perméabilité, dont les propriétés hydrauliques et thermiques sont associées aux régions discrétisées dans une maille. Le transfert de masse peut être soumis aux phénomènes d'advection, de dispersion cinématique ou de diffusion moléculaire, et le transfert de chaleur peut être soumis aux phénomènes de conduction, de dispersion ou d'advection. La suite OpenFlow permet l'inclusion de l'analyse du comportement de phases PVT (pression, volume et température) pour des calculs compositionnels et supporte des trajectoires de puits complexes, et est utilisée pour reproduire des tests hydrauliques de moyenne durée, ainsi pour effectuer études de sensibilité et de prévision ou forecasting (CougarFlow).

3.2.8 Analyse du risque sismique associé au projet

Une étude géomécanique a été mandaté par Georhin auprès d'un prestataire externe. Cette étude a pour objectif de déterminer, sur la base d'hypothèses simples et des données bibliographiques disponibles à l'échelle du bassin Rhénan, le slip tendency et les surpressions de fluide nécessaires pour engendrer une rupture sur les plans de failles modélisés. Les premiers éléments de modélisation ne permettent pas d'expliquer les magnitudes obtenues sur le site de Vendenheim.

Les incertitudes liées au modèle géologique devront être levées suite à la réalisation d'une acquisition géophysique de sismique réflexion Pseudo 3D et devraient permettre de mieux contraindre les résultats de la modélisation géomécanique.

3.2.9 Analyse de Georhin sur la séquence sismique du cluster de Strasbourg Relation entre la sismicité de Strasbourg Nord et Vendenheim

L'argument de la profondeur est utilisé par le rapport du comité d'experts (page 6 du rapport) pour établir un lien entre les événements du site de Vendenheim et la zone Strasbourg Nord. Ce point a été discuté dans le document « Analyse de Georhin sur le rapport phase 1 du comité d'experts sur le doublet géothermique de Vendenheim du 28 Mars 2022 » et détaille que dans un rayon de 55 km autour du site de Vendenheim, 58% des événements (type « Earthquake ») sont localisés par le RéNaSS entre 0 et 7 km de profondeur (période d'analyse : 13/02/1980 au 30/01/2022).

L'utilisation de la profondeur comme argument différenciant entre séisme naturel et induit ne permet pas de conclure à un événement induit par l'activité géothermique du doublet de Vendenheim.

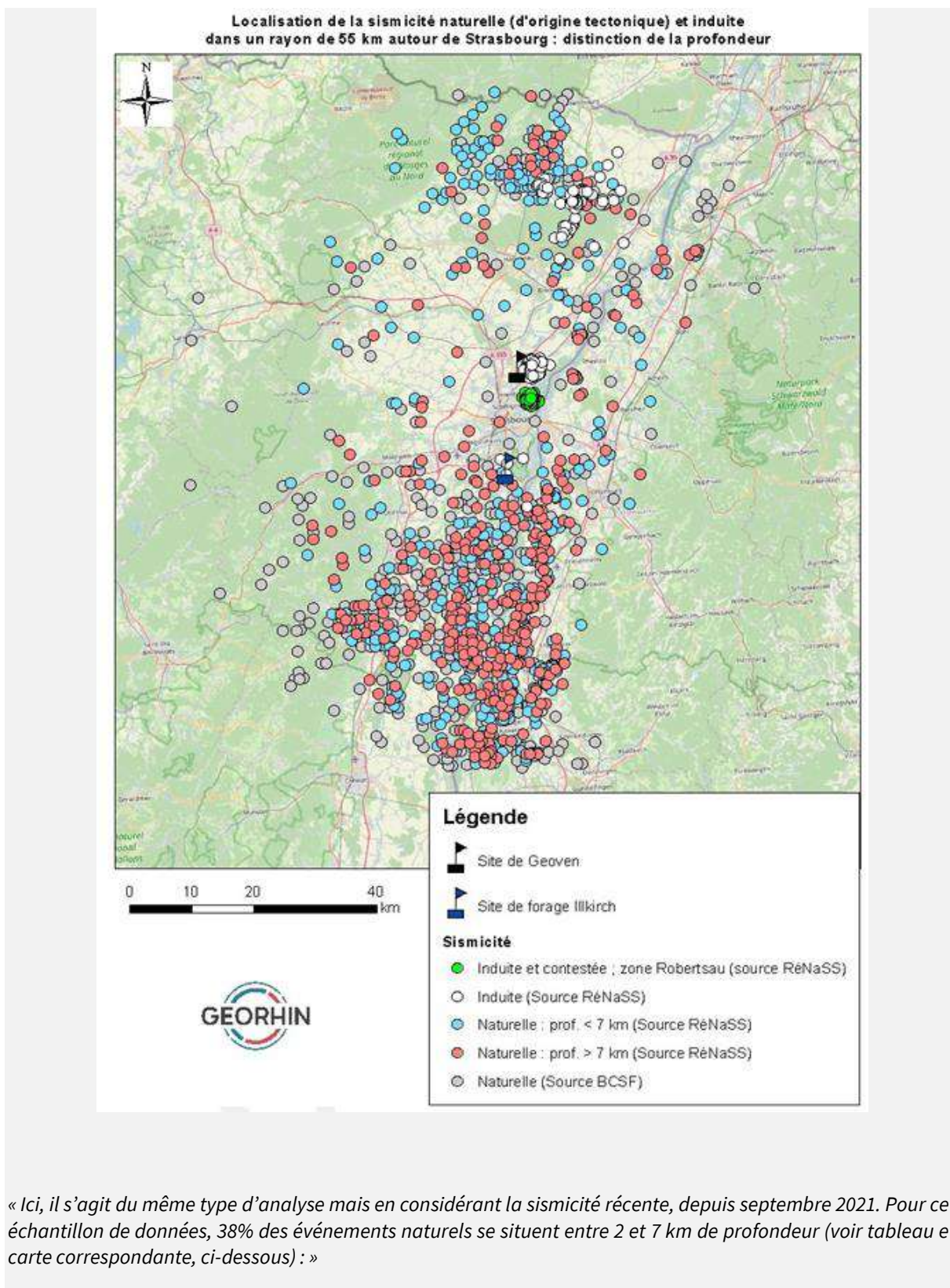
Extrait du document « Contribution de Georhin sur la présentation du comité d'expertise (CE) au CSS Vendenheim du 17/01/2022 », pages 6 à 8, en italique les extraits du rapport du CE :

« De plus, en se basant sur le catalogue disponible depuis le site du RéNaSS, le critère de profondeur des événements naturels peut être lu comme étant similaire et non différent avec la profondeur de l'essai de Vendenheim :

En effet, selon l'échantillonnage considéré, on constate que 41 à 58 % des événements naturels analysés par le RéNaSS se situent entre 0 et 7 km de profondeur (voir tableau et carte correspondante, ci-dessous) : »

Catalogue des événements sur la période 1980 - 03/02/2022, dans un rayon de 55 km autour de Strasbourg
 (source RéNaSS)

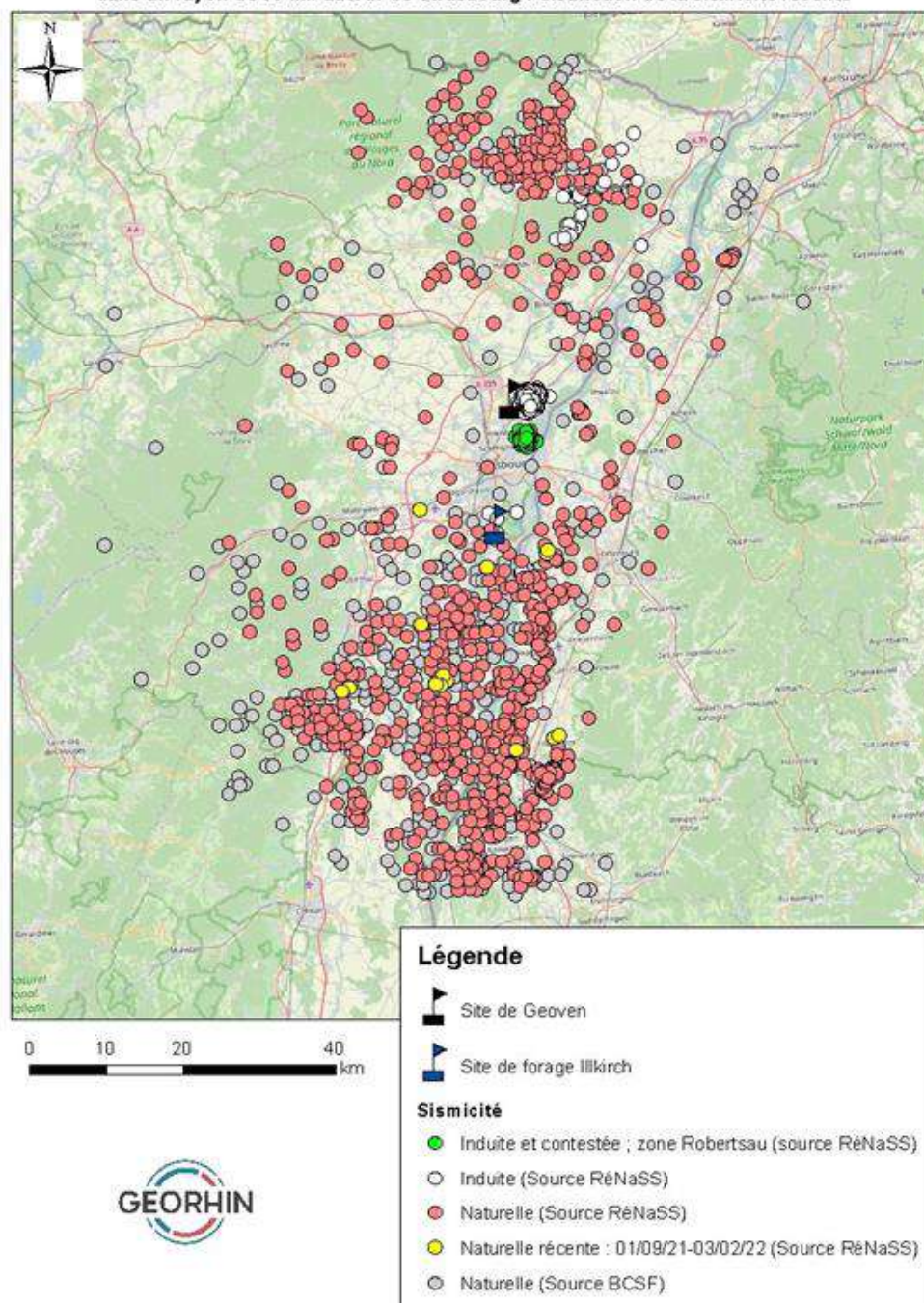
Critères	1er et dernier événement	Nombre total d'événements	Profondeurs moyennes (km)	% des événements entre 0 et 7 km de profondeur
Pour tout "Earthquake"	13/02/80 16:21 30/01/22 14:43	937	6,7 km	58%
Pour tout "Earthquake" En ignorant les prof. à 0 km	13/02/80 16:21 30/01/22 14:43	871	7,2 km	54%
Pour tout "Earthquake" En ignorant les prof. à 0 km Depuis 2012	03/01/12 04:46 30/01/22 14:43	263	8,2 km	41%



Catalogue des événements sur la période 01/09/21 - 03/02/2022, dans un rayon de 55 km autour de Strasbourg
 (source RéNaSS)

Critère	1er et dernier événement	Nombre total d'événements	Profondeurs moyennes (km)	% des événements entre 0 et 7 km de profondeur
Pour tout "Earthquake"	14/11/21 01:26 30/01/22 14:43	16	8,6 km	38%

Localisation de la sismicité naturelle (d'origine tectonique) et induite dans un rayon de 55 km autour de Strasbourg : distinction de la sismicité récente



Discussion sur l'absence d'observation d'événements sismiques entre l'amas sismique du nord (Vendenheim) et celui du sud (Robertsau/Strasbourg) :

Nous avons deux écarts de compréhension majeurs :

a/ Profondeur de la sismicité du nuage de Strasbourg Nord : Équivalente à 58% des séismes naturels, localisés par le RéNaSS, dans un rayon de 55km, depuis 1980 (voir tableaux et cartes ci-dessus, pages 48 à 50).

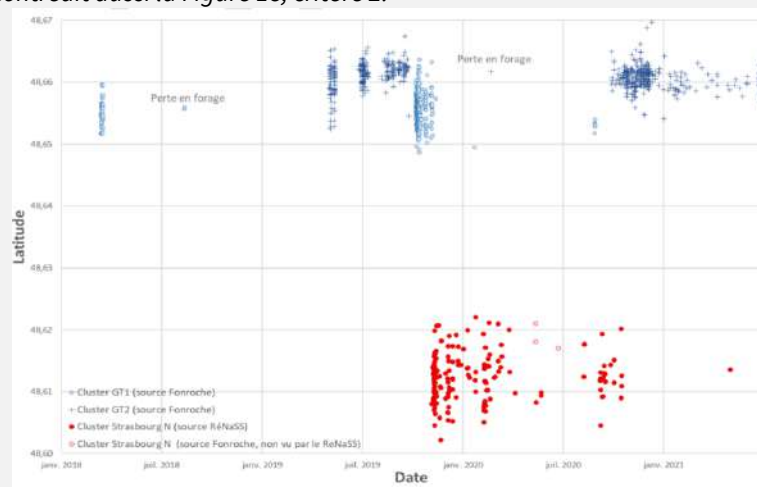
b/ Temporalité de la sismicité du nuage de Strasbourg Nord :

- Pourquoi ne pas analyser la remontée de sismicité du mois d'avril 2020 sur Strasbourg, alors qu'il n'y a pas de test en cours sur VDH ?
- Pourquoi ne pas faire apparaître et analyser l'évènement du mois de mai 2021 sur Strasbourg, alors qu'il n'y a aucune activité sur VDH ?

Cette analyse sur la temporalité avait également été traitée dans le document intitulé « Note en réponse à la publication du 05 Août 2021 : Induced and triggered seismicity below the city of Strasbourg, France from November 2019 to January 2021 (Jean Schmittbuhl et al., 2021) » (F17. CRGEOS - Réponse Georhin- 010921), pages 2 et 3, dont voici l'extrait :

« Georhin :

- La sismicité des clusters Strasbourg N et Vendenheim GT2 continue après janvier 2021.
 - La sismicité du cluster Vendenheim GT1 s'est arrêtée le 31/08/2020 et la sismicité du cluster Strasbourg N continue son activité.
 - La détection des événements du cluster Strasbourg N est incomplète (pas de « template matching » sur ce secteur). En particulier la période d'avril à juin 2020 voit une recrudescence de sismicité, sans activité d'injection sur le site de Geoven.
- Cette non prise en compte de ces derniers événements, qui montre une continuité d'activité sur l'essaim de Strasbourg, modifie considérablement la conclusion de la publication sur une éventuelle reprise concomitante à une injection. Cela contredit aussi la Figure 18, critère 2. »



2/ « Pour cela, FG considère implicitement l'hypothèse forte qui est que la zone de faille serait homogène dans sa structure et sa rhéologie. Ainsi elle répondrait de la même façon sur l'ensemble de la zone de faille à une perturbation de contrainte ou de pression allant des puits vers la zone de Strasbourg/Robertsau, à savoir produisant systématiquement des séismes de même nature tout au long de la zone de faille au passage d'une perturbation mécanique. La sismicité serait alors un traceur univoque de l'effet mécanique lié aux injections dans les puits. Cette hypothèse simplifie grandement la géométrie de la zone de faille, ses propriétés mécaniques et celles du champ de contraintes. En effet, dans la zone des puits où le modèle géologique est le mieux résolu en particulier par les données de forage, on constate que la zone de faille est loin d'être assimilable à un simple plan de faille uniforme. La relocalisation de la sismicité faite par l'EOST (figure 36 - Schmittbuhl et al, 2021) montre clairement que la zone de faille F1B est une structure complexe en réseau de failles sur une échelle pluri-hectométrique. Or, les événements sismiques de magnitude 2-3 correspondent à des glissements sur des zones de rupture de quelques dizaines, voire centaines de mètres, [...] »

Le raisonnement de Georhin exposé au CE est exactement le contraire ; la faille étant complexe ne peut pas avoir un comportement sans interférence de réseaux secondaires en particulier, ce qui fait que seul un plan parfait théorique pourrait reproduire un transfert de pression sans sismicité.

Ce raisonnement a d'ailleurs été traité dans le document « Contribution de Georhin sur la présentation du comité d'expertise (CE) au CSS Vendenheim du 17/01/2022 », page 6, dont voici l'extrait :

« Liaison entre les essais de Vendenheim et de Strasbourg Nord : ce tableau est construit à posteriori. Il suffit de rajouter un critère comme « l'absence de cheminement sismique entre les deux essais » pour modifier « le faisceau d'indices ». Nous rappelons que ce point a été mis en avant par le comité scientifique version début 2020 et a fait l'objet d'une recommandation d'installation d'un réseau de géophones complémentaires, afin de lever un doute lié à l'absence de mesures entre les deux essais lors de l'apparition de l'essai de Strasbourg en Novembre 2019. Les mesures 2020 de ce réseau confirme l'absence de cheminement. Le rédacteur a d'ailleurs repris ce point indirectement dans « la difficulté de compréhension du mécanisme ».

D'autres projets de recherche (Temperer L17.1) mis à disposition du CE montre que l'hypothèse développée ne fonctionnerait que dans le cadre d'un plan de faille théorique parfait (voir « Discussion et conclusion » page 31). »

Ci-dessous un extrait du livrable L17.1 du projet TEMPERER, intitulé « Apport d'une rhéologie évoluée pour le modèle géomécanique du réservoir et simulation des zones potentiellement sismogènes sous l'effet de la mise en circulation d'un fluide », page 31 et 32 :

« 3 Discussion et conclusion

[...] Notre simulation n'est pas capable dans cette zone sud d'aller dans le sens d'un enchainement instable qui aboutirait à un évènement induit de magnitude de 3 avec une cascade d'évènements à la suite [...]. »

Au vu de ces multiples éléments contribuant à créer un faisceau de présomptions divergentes et non convergentes, la conclusion scientifique équilibrée avec la connaissance d'aujourd'hui devrait donc plutôt être : « il n'existe toujours pas de compréhension claire sur cette éventuelle liaison ou absence de liaison ».

3.3 Réalisation Secteur ouest de l'Eurométropole de Strasbourg : Projets d'Eckbolsheim et d'Hurtigheim

3.3.1 Modèle géologique

Le modèle géologique a été construit à partir des données de sismique réflexions acquises par Georhin en 2015, ainsi que des données disponibles sur l'ensemble du PER de Strasbourg (puits offset, anciennes lignes sismiques). Les failles ciblées pour le premier doublet (GT1 et GT2) et le second doublet (GT3 et GT4), telles que modélisées, sont orientées NNE-SSW (N20°E) et présentent un pendage subvertical, à vergence ouest. Elles signent également le caractère extensif de la zone d'étude.

Les profondeurs finales atteintes sont susceptibles d'être modifiées, car dépendantes de la géologie rencontrée. La profondeur finale pourra varier de 4200 m à 4700 m vertical.

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

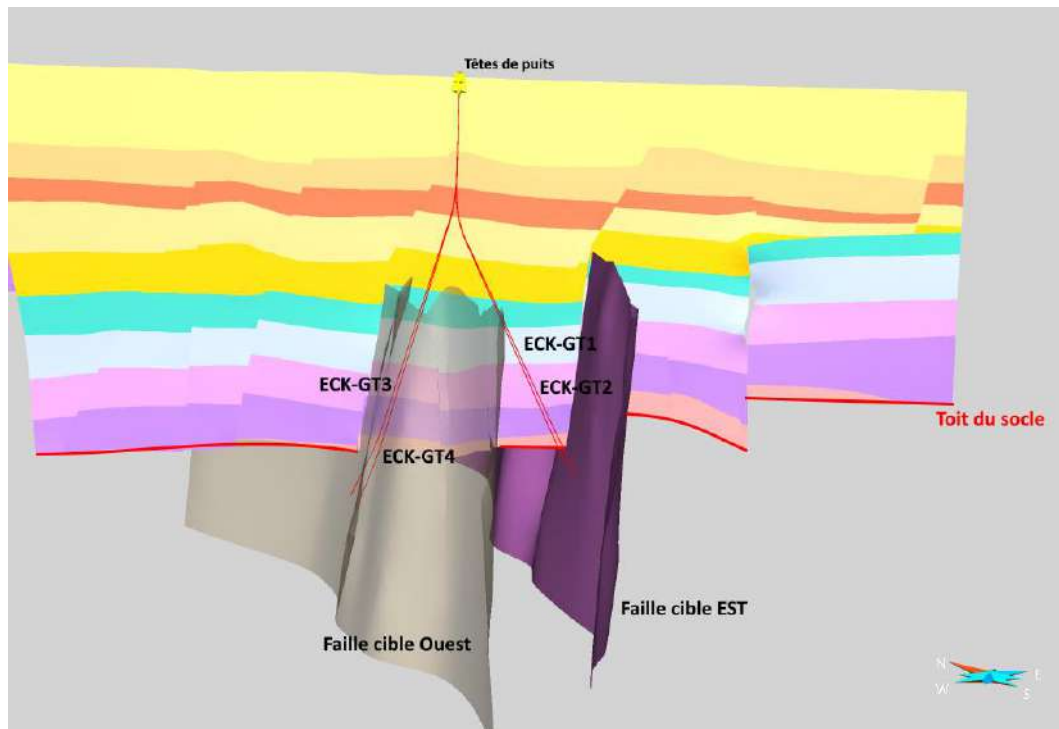


Figure 13: Coupe verticale de la trajectoire des puits des deux doublets géothermiques sur le site d'Eckbolsheim.

3.3.2 Modèle réservoir

Un premier travail de modélisation numérique sous Feflow 6.2 a été réalisé., permettant connaître l'impact d'un point de vue hydraulique et thermique de l'exploitation géothermique sur les sites de Hurtigheim et Eckbolsheim. Georhin, comme expliqué dans la section 3.2.7, a utilisé des outils numériques issus du monde pétrolier, adaptés au contexte de géothermie profonde (suite OpenFlow de l'IFP EN) qui permettent d'utiliser :

- Une géologie directement en lien avec le modèle structural réalisé avec SKUA-GOCAD.
- Trajectoires de puits prenant en compte des déviations.
- Etudes de sensibilité concernant l'optimisation des paramètres réservoirs.

L'objectif est d'évaluer l'impact de l'exploitation géothermale en termes de pression et de température dans le réservoir géothermique d'Eckbolsheim.

3.3.2.1 Déclaration de la géométrie

Le modèle actuel tient compte des formations géologiques jusqu'à environ 5000 m de profondeur et présente essentiellement les failles majeures identifiées dans l'interprétation sismique, ainsi que le traitement de la base de données des puits existants dans le bassin Rhénan. Il n'intègre pas d'éventuelles failles de plus petite échelle dans le socle ou proches du siège principal de circulation, comme celles observées sur le site de Vendenheim.

3.3.2.2 Déclaration de la pétrophysique

La détermination des paramètres pétrophysiques intégrés dans le modèle, se base sur l'étude des paramètres pétrophysiques des roches analogues affleurantes du secteur d'étude et sur des données de puits profonds (carottes, diagraphies).

De la même façon, différents rapports Georg, projet européen mis en place pour harmoniser l'information géologique du bassin rhénan (Base de données GeORG : projet Interreg IV, <https://www.geopotenziale.org/home?lang=3>, 2008 à 2012), ainsi que deux thèses de doctorat, « Transferts de pression, de masse et d'énergie au sein des systèmes aquifères grandes profondeurs : application à la géothermie haute énergie » (Le Lous, 2017) et « Etude des réservoirs géothermiques développés dans le socle et à l'interface avec les formations sédimentaires » (Bertrand, 2017), en lien avec les projets de géothermie profonde de Georhin ont été utilisés.

3.3.3 Programme des travaux relatifs au forage géothermique

3.3.3.1 Les tests du réservoir ou essais de production

Dans le but d'établir un bilan hydrodynamique, le forage mettra en évidence les indices des ressources géothermiques disponibles depuis la zone de transition jusqu'aux zones altérées du socle cristallin, et en option selon la qualité du réservoir précédent, le toit de la Grande Oolithe et la partie supérieure du Trias (Muschelkalk).

Rappel : l'objectif de test est d'obtenir entre 250 et 350 m³/h de débit cumulé à la température moyenne en tête de puits supérieure à 150°C, pouvant être alimenté par différents réservoirs.

Les formations réservoirs seront testées conformément au programme type suivant et selon les qualités de roches rencontrées pendant le forage. Ce programme pourra être réduit le cas échéant.

Equipement spécifique

Afin de pouvoir réaliser les tests, la plateforme de forage sera équipée :

- d'une pompe immergée en cas de non artésianisme.
- d'un bassin de stockage étanche, ayant un volume de stockage égale à plusieurs fois le volume d'eau géothermale produite soit de l'ordre de 7000 m³.

3.3.3.2 Test en phase forage

Il convient de noter que, quelques soient les zones productrices finales, les calculs de recalage in situ simulant le réservoir intégreront l'influence de l'exploitation en profondeur sur les couches supérieures (jusqu'au mur du Tertiaire). Les interconnexions des réservoirs, particularité du Fossé Rhénan, seront ainsi intégrées dans les évaluations de réservoirs. Ces interconnexions sont liées à l'absence de couches imperméables jusqu'à la discordance Mésozoïque/Cénozoïque ainsi qu'aux circuits hydrothermaux générés par les failles principales et secondaires.

Les tests en phase forage sont basées sur le suivi des pertes à l'avancement pour prédéfinir les zones de circulation d'eau géothermales éventuelles. Ils consistent à vérifier l'équilibre hydrostatique entre la densité de la boue de forage et la densité théorique de la saumure du réservoir à la cote considérée, de marquer un point d'arrêt dit d'observation afin d'évaluer le comportement en gain ou perte de la zone traversée.

3.3.3.3 Test courte durée

Les tests hydrauliques permettent d'approfondir différentes caractéristiques du réservoir, tant par interprétation de résultats que par des mesures directes. Ils font référence aux tests de stimulations ainsi qu'aux diagaphies, pouvant mesurer des conditions statiques ou dynamiques ainsi que des conditions de surface ou en fond de puits. Les méthodes de stimulation fournissent des informations sur la pression, température et débit d'exploitation ainsi que des paramètres réservoirs tels que perméabilité, porosité, zones de fracturation entre d'autres. Les tests de stimulation permettent l'amélioration de la perméabilité du réservoir proche aux puits géothermiques, dont le but principal est d'incrémenter l'indice d'injectivité visant le débit et température d'exploitation.

Pour ce faire ils seront réalisés en trou ouvert à partir du top du buntsandstein jusqu'au bas du dernier réservoir de socle, dans le couloir d'endommagement de la faille ou dans les zones susceptibles de faire partie du siège principale de circulation (où se trouvent des pertes de boue importantes), par exemple. Il est important, afin de limiter le risque sismique associé, de rester en dessous du seuil de déstabilisation/rupture des failles tels qu'ils seront actualisés au fur et à mesure de l'acquisition de données géosciences complémentaires. Les tests sont listés ci-dessous :

Natural Logs (mesure statique)

Avant de réaliser de tests dynamiques, il sera important de déterminer le comportement statique du réservoir. Pour y arriver, ces tests seront réalisés après une longue attente ou repos (s'il y a eu une quelconque injection dans le réservoir préalablement).

La détermination de zones conductives/convectives pourront être déterminés, ainsi que la température de production et le profil thermique à l'équilibre (gradient géothermiques), voir Figure 14, a. C'est avec ce test, réalisé sur les puits injecteur et producteur de VDH, que la température dans le réservoir a été estimé d'être à plus de 200°C. D'autres types de diagaphies pourront être réalisés (la descente d'un débitmètre ou d'un équipement Gamma Ray par exemple, voir Figure 14, b).

a) b)

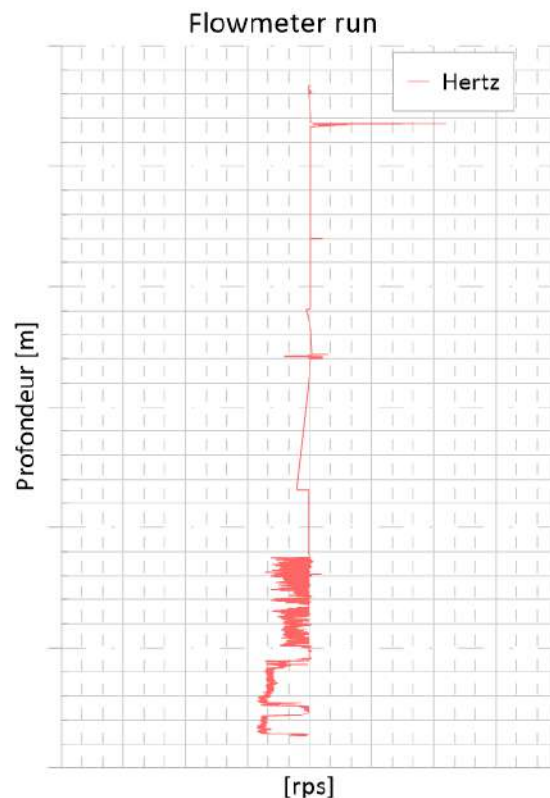
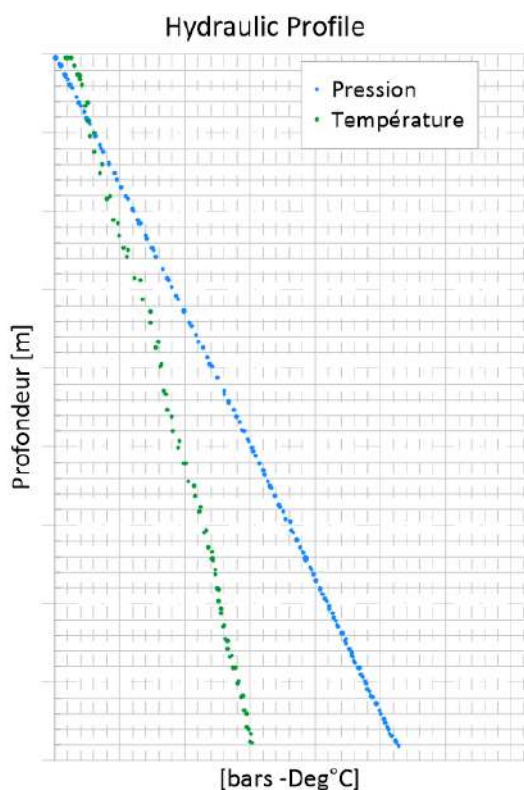


Figure 14 : a) Exemple du profile hydraulique. b) Exemple du run flowmeter

Dégorgement de puits (test de production)

C'est la technique pour mettre le puits en production continue effective, idéalement sans l'aide d'un appareil externe (artésianisme, voir Figure 15). Ce type de stimulation a été réalisé sur VDH avec l'aide d'un appareil d'Airlift sans succès. Postérieurement au développement du puits en artésianisme, une pompe immergée sera utilisée afin de nettoyer et stimuler le puits producteur et calculer le rabattement de production. C'est aussi important pour déterminer l'empreinte géochimique du réservoir (et le break out pressure) si le prélèvement d'eau géothermale au fond de puits n'est pas possible techniquement (cf. VDH), ainsi que la détermination de l'indice de productivité. Il sera réalisé postérieurement à la série de tests et stimulations hydrauliques.

Afin d'optimiser les essais, le puits doit être nettoyé. La boue est remplacée par l'eau géothermale par évacuation du fluide de base par l'eau géothermale avec un "carrier-spacer", qui nettoiera le tubage et les parois de la roche traversée des morceaux de roches incrustés ainsi que du « cake » pouvant endommager les essais. Un nettoyage par *acid washing* ou une circulation d'un petit bouchon d'acide permet de finir la préparation du puits.

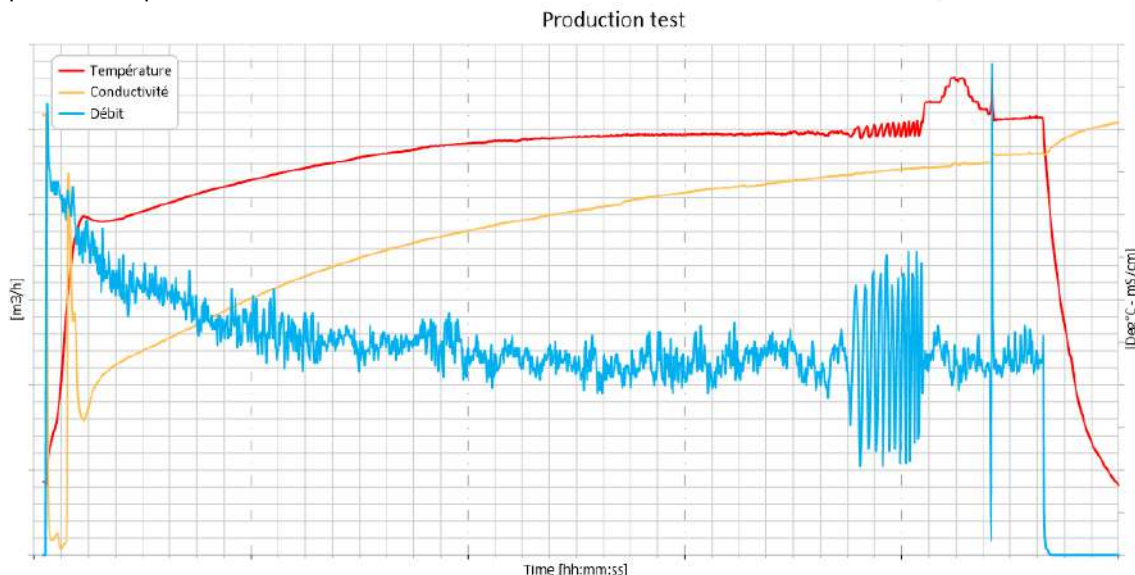


Figure 15 : Exemple du test de production.

Stimulations Hydrauliques

Le but est d'ouvrir le réseau de fractures préalablement nettoyées avec l'acide, facilitant la circulation d'eau au sein du réservoir et permettant l'incrémentation du débit sans avoir plus de pertes de charge. L'efficacité du test se traduira par une amélioration de la performance hydraulique du réseau fracturé.

Ces tests d'injection sont réalisés par différents paliers. Afin de limiter le risque sismique, les paliers de descente seront plus longs que les paliers de montée. Ils permettent de compléter la caractérisation du réservoir, et donne un premier aperçu de sa réponse mécanique (Rosberg, 2010). Ils permettent d'obtenir les caractéristiques de la formation géothermique pour évaluer l'impact de l'exploitation à long terme. Ces tests se découpent en plusieurs étapes qui seront précisés lors du dépôt de programme de test, voir Figure 16.

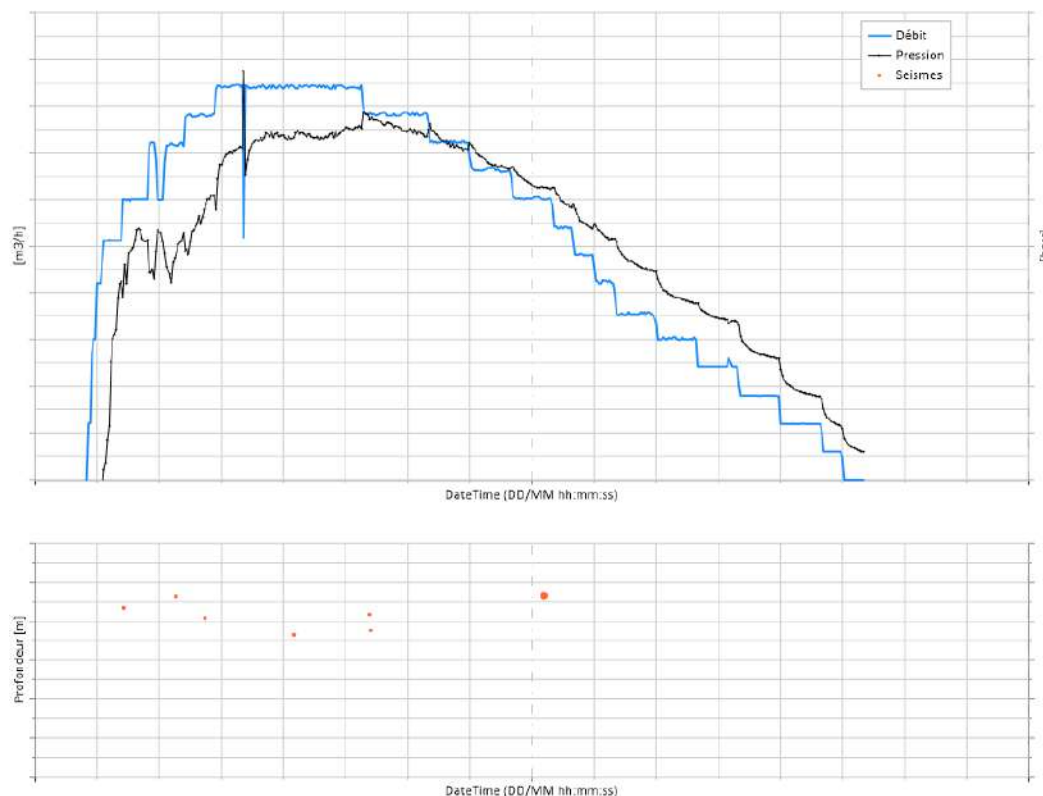


Figure 16 : Exemple de Stimulation hydraulique et suivi microsismique.

Stimulations avec acide

Les stimulations avec acide seront implémentées pour nettoyer les failles/fractures et la section à trou ouvert (borehole) des minéraux ou dépôts présents. Elles seront réalisées suite aux procédures de stimulation hydraulique ou entre deux tests d'injection. La solution acide est ajustée en fonction du type de roche, ainsi que du colmatage des fissures par cristallisation secondaire. Par exemple, un mélange d'acide organique biodégradable (acide acétique par exemple) ou HCl/HF pour les formations triasiques à un réactif plus concentré en HF sur les zones silicatées. En cas de fortes présences de ciment quartzeux, un réactif type OCA sera privilégié. Le mélange acide sera dosé de façon à s'assurer d'une totale réaction dans le réservoir de façon à ne pas remonter d'acide actif, voir le Tableau 2 pour plus d'information.

Tableau 2 : Liste des réactifs et remarques associées.

Types de réactifs utilisés pour la stimulation chimique des réservoirs géothermiques	Remarques	Risque potentiel sur l'environnement
Mélanges HCl / HF *	les plus utilisés faible coût potentiel de réaction avec les minéraux argileux riches en silice	Manipulation du fluide en surface Aucun risque de contaminations des formations aquifères utilisées pour l'AEP
Acide fluorhydrique HF*	Dissout les argiles, les feldspaths et les micas Réactivité plus faible vis à vis du quartz (100 à 200 fois moins rapide qu'avec les argiles et les feldspaths) Le risque d'utilisation d'HF est la forte affinité de Si et Al avec le fluor, ce qui peut provoquer la précipitation de	Manipulation du fluide en surface Aucun risque de contaminations des formations aquifères utilisées pour l'AEP

	complexes siliceux ou aluminés, endommageant ainsi la formation par des pluggings L'autre risque concerne l'utilisation de ces solutions dans des systèmes présentant de fortes teneurs en carbonates (supérieur à 20%) : des précipitations de CaF ₂ sont possibles.	
Les chélatants Les plus utilisés sont : • EDTA (acide éthylènediaminetétraacétique) • HEDTA (acide hydroxyéthylènediaminetriacétique) • AHEID (acide hydroxyéthyliminodiacétique) • NTA (acide nitrilotriacétique)	Solutions utilisées comme agents de nettoyage et de stimulation de puits surtout dans des formations qui peuvent être endommagées par des acides forts Ils agissent comme solvant, augmentant les opérations de mouillage à l'eau et la dissolution (entièrement ou partiellement) de certains minéraux contenant Fe, Ca, Mg et Al. La vitesse de dissolution de la calcite à partir des chélatants n'est pas aussi rapide que celle observée lors de l'utilisation d'acides forts. Cette vitesse de dissolution plus faible indique que le chélatant est capable de mieux se répartir dans la formation réservoir, avec une dissolution plus large de la calcite, sur de plus grands volumes (contrairement à une dissolution massive près de la zone d'injection, laissant le reste du réservoir non impacté).	Manipulation du fluide en surface Aucun risque de contaminations des formations aquifères utilisées pour l'AEP
Les acides organiques OCA	Systèmes acides de haute performance, conçus pour les formations gréseuses sensibles qui peuvent présenter des problèmes avec les traitements conventionnels d'acidification. Les fluides OCA combinent un effet retard et une technologie proche de la chélation induisant peu de précipitations. Ils réduisent le risque de baisse de la production ainsi que les précipitations minérales secondaires et tertiaires qui peuvent bloquer l'espace poral. Ses propriétés retardées permettent également une réduction des effets corrosifs (utilisation de faibles quantités d'inhibiteur de corrosion). Ces solutions acides s'attaquent principalement à la calcite, mais aussi aux silicates, alumino-silicates, hydroxydes et oxydes de fer ainsi qu'aux complexes Ca-Fe-NTA.	Manipulation du fluide en surface Aucun risque de contaminations des formations aquifères utilisées pour l'AEP

La stimulation avec acide sera organisée en 3 étapes, voir Figure 17 :

- Pre-flush ou test d'injectivité : utilisant de l'eau douce/géothermale pour diminuer la température du puits et ainsi retarder l'effet de l'acide, lui permettant de pénétrer et nettoyer les zones fracturées visées.
- L'injection d'acide ou acid job est composée de :
 - injection du volume d'eau mélangé avec un inhibiteur de corrosion pour la préservation du train de tiges et des cuvelages.
 - injection de la solution d'acide conçu pour agir sur la zone réservoir identifiée (fonction de la composition minéralogique de la zone d'intérêt).
- Déplacement de l'acide avec de l'eau douce ou géothermale et fermeture du puits.

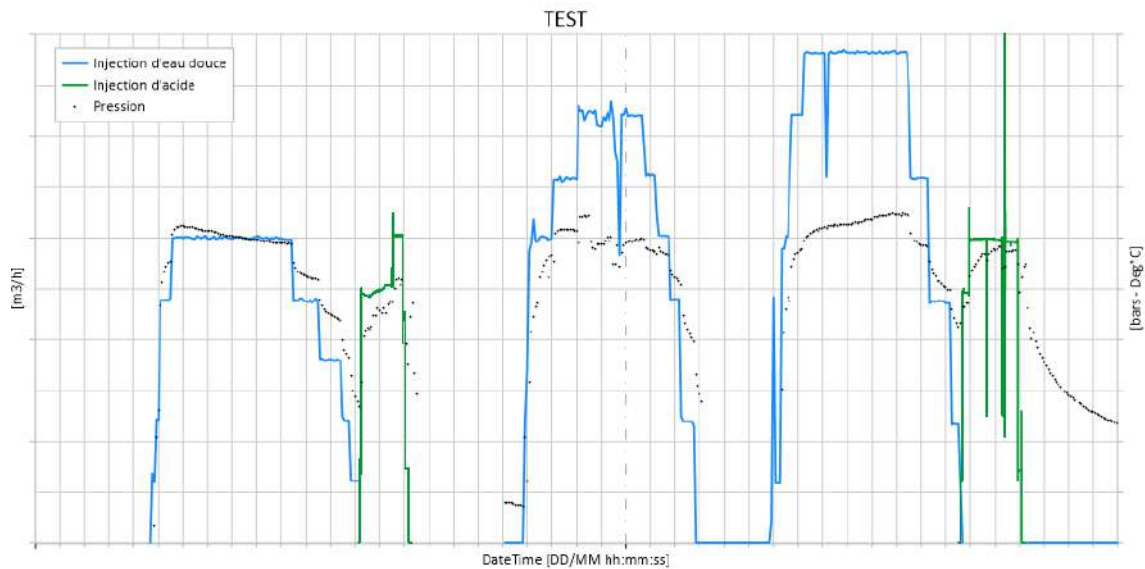


Figure 17 : Exemple d'Acidification (injection d'acide en trait vert).

Stimulations thermiques

C'est l'amélioration de perméabilité causée par une contraction thermique due au changement de température dans le réservoir granitique. Elle permet d'améliorer la perméabilité proche du puits (augmentant ou ouvrant les fractures préexistantes).

L'indice d'injectivité et de productivité améliorés et les tests courtes durées terminés, le doublet pourra entrer dans une phase de test longue durée de plusieurs mois (voir Figure 18) pendant laquelle la centrale de surface sera raccordée au réseau pour valider le fonctionnement global en ligne et le comportement du doublet. En parallèle de cette phase de test, une demande de concession de 50 ans sera déposée pour la future exploitation.

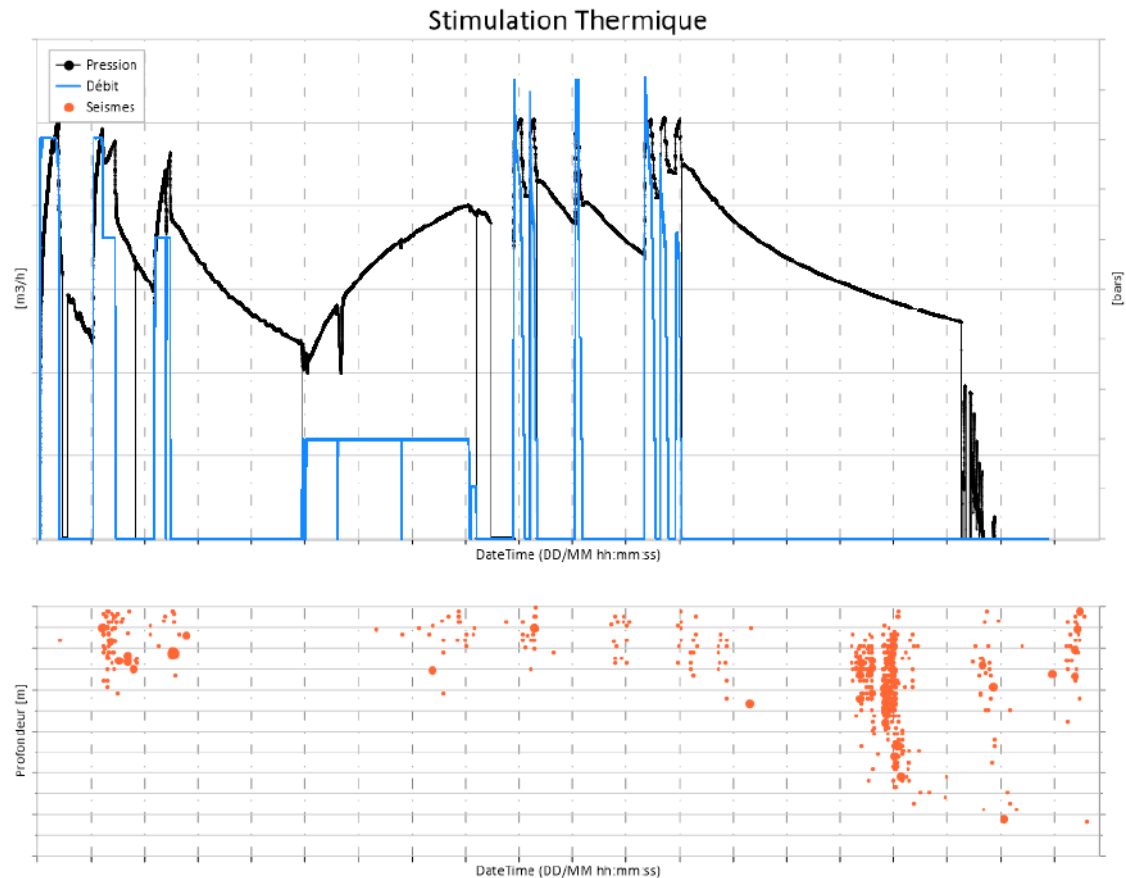


Figure 18 : Exemple de stimulation thermique et suivi microsismique.

Tests de traçages (mode doublet)

Un test de circulation en mode doublet peut être complété avec un test de traçage. Il sera réalisé uniquement en mode doublet et permettrait de reconnaître les barrières hydrauliques, ainsi que les propriétés dispersives/transport et le temps de résidence dans le réservoir. Le test de traçage sera réalisé dans un premier temps en débit artésien (faible débit) et évoluera jusqu'au débit d'exploitation.

Une détermination des conditions initiales sera réalisée, afin de déterminer l'évolution des propriétés géochimiques, ainsi que la concentration des traceurs dans l'environnement.

Le suivi du traceur (Fluorescéine) se fera sur site avec l'aide d'un spectrofluoromètre, ainsi que d'une mesure de fluorescence en laboratoire avec un chromatographe HPLC (mesure plus détaillée, voir Figure 19). Concernant l'échantillonnage après le démarrage du test, la fréquence d'échantillonnage évoluera, en privilégiant le suivi du pic dans la courbe de restitution du traceur (BTC), et la stabilité de la queue de la BTC. Si après la fin du premier test de circulation il n'y a pas eu de restitution du traceur, la procédure sera répétée avec des débits plus importants en conservant le traceur déjà injecté (cf. fluorescéine) et éventuellement en utilisant d'autres types de traceurs (Sulfonates et/ou Naphtalène) pour visualiser l'effet changement de débit (analyse différentielle d'arrivée).

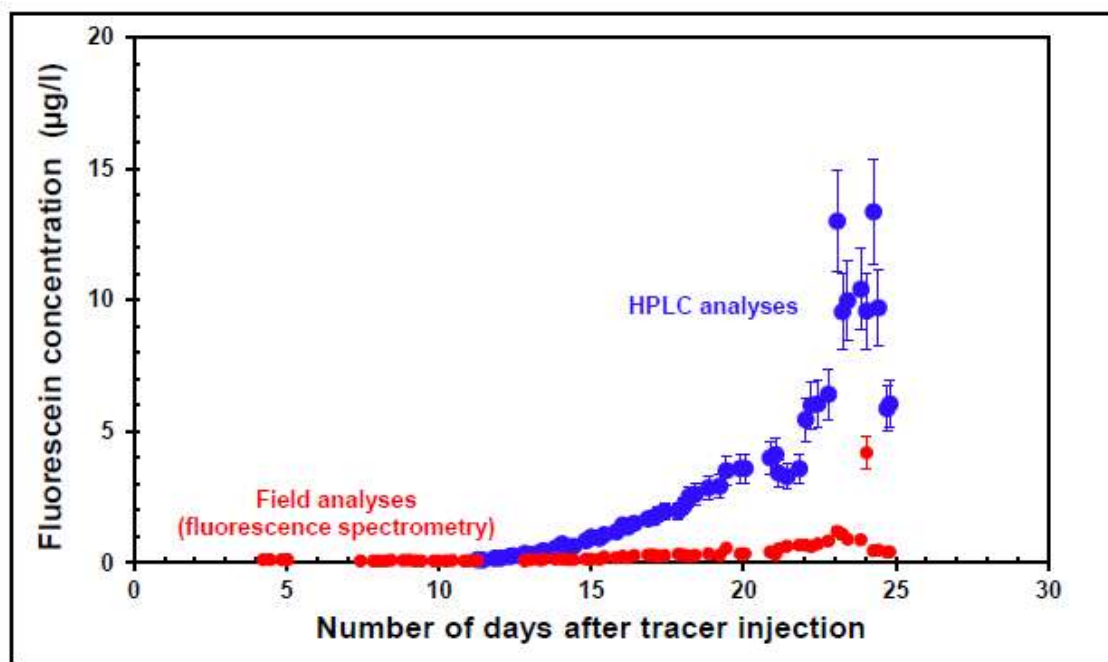


Figure 19 : Courbe de restitution du traceur (BTC) (Bernard Sanjuan et al., 2016).

Méthodologie et IP

Finalement la méthodologie à mettre en place peut être résumé avec le diagramme ci-dessous :

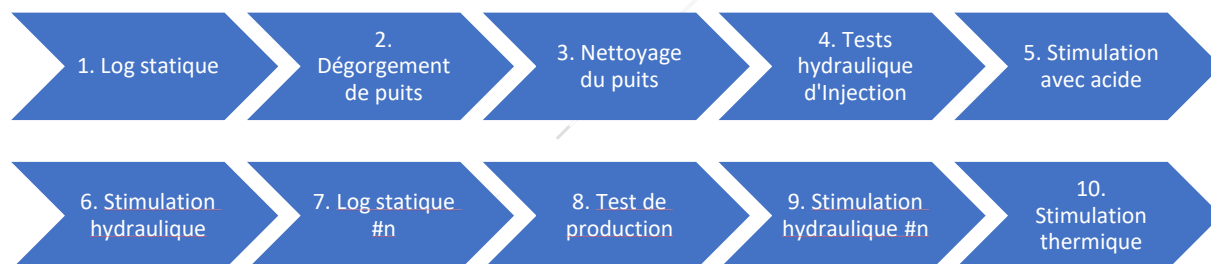


Figure 20: Schéma simplifié utilisé sur VDH.

Bien que le but principal fût d'améliorer le IP/II, ce schéma a permis aussi de mieux comprendre les interactions au sein du réservoir, grâce aux tests de *build-up* ainsi qu'aux tests de *traçages* réalisés sur VDH. Pour constater et estimer cette amélioration, les tests de #1 au #6 doivent au minimum être réalisés.

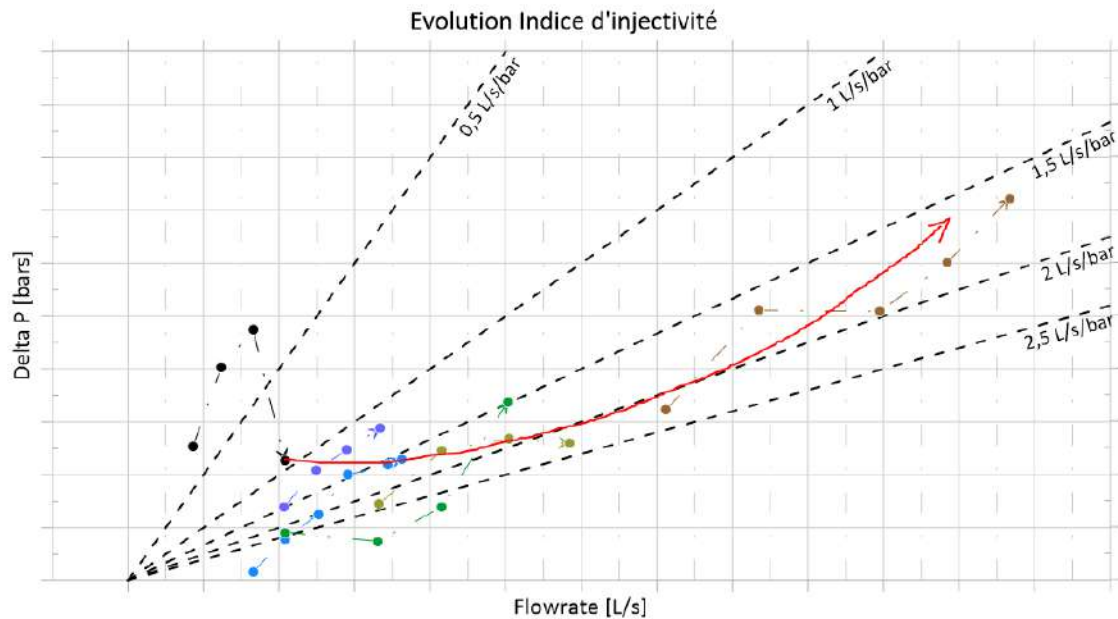


Figure 21 : Exemple d'Amélioration de l'indice d'injectivité (trait rouge).

3.3.4 Surveillance microsismique

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

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

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

3.3.4.1 Le réseau de surveillance

Réseau permanent

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

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

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

Réseau complémentaire

Un réseau complémentaire et mobile sera installé. Il se composera de SmartSolo, capteurs sismiques autonomes à 1 ou 3 composantes (1C ou 3C), sensibles aux fréquences à partir de 5 Hz. Durant les phases d'essais, il est possible d'intégrer un réseau citoyen (notamment le réseau AM). Composé d'environ 10 stations 1C et 3C ainsi que des capteurs de type géophone et accéléromètre.

3.3.4.2 Gestion du risque

Protocole de surveillance

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

La gestion de la sismicité est réalisée en fonction du TLS (traffic light system) dont les seuils de magnitude ont été réduits par rapport à l'AP. En fonction du statut de la variable, les décisions à prendre et les démarches à suivre sur les opérations sont définies selon : le signallement interne, la communication externe et la mise en œuvre des actions sur les opérations. Le protocole (Figure 22) est basé sur un système d'alerte TLS mixte utilisant les critères (variables) suivants :

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

Réseau de mesure des vibrations par rapport à l'habitat

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

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

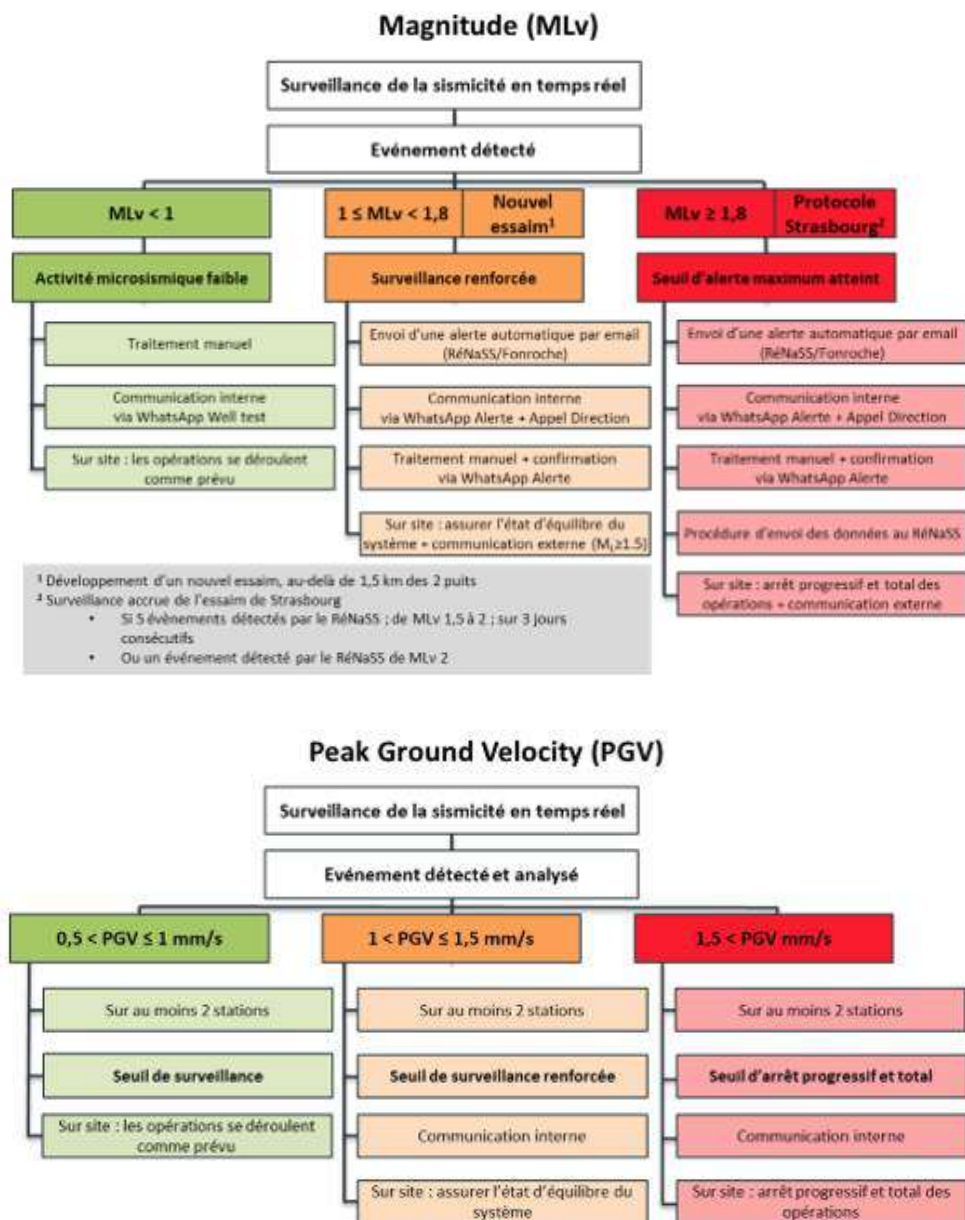


Figure 22 : Traffic Light System basé sur la magnitude (en haut) et sur le PGV (en bas).

3.3.5 Activité de forage

3.3.5.1 Diagraphies

Wireline/Diagraphies au câble

Les mesures wireline effectuées dans le cadre du projet de Vendenheim ont montrés les limites des outils standards sur le marché. En effet, en raison des températures élevées (mesurées avec une sonde P/T°) supérieures à 200°C au droit du réservoir, les limites techniques comme la température maximale que supportent les outils n'ont pas permis la réalisation des diagraphies nécessaires à la bonne caractérisation du réservoir.

De plus, les géométries complexes et déviées des puits peuvent engendrer des risques de coincement des outils de logging, lorsque leur descente se fait directement dans l'openhole.

De nouvelles technologies utilisent des systèmes de convoyage filaires garantissant une analyse complète de du réservoir, appelées « pipe conveyed ».

L'outil de mesure est descendu à travers les tiges du RIG et se positionne dans la BHA. Ainsi le refroidissement est assuré par la circulation de la boue. La Figure 23 présente un exemple des outils disponibles sur le marché avec le procédé de déploiement (ici l'exemple de Schlumberger).

Ces technologies permettent d'acquérir des données de diagraphies dans des domaines de températures élevés (>200°C) et donc de réaliser les acquisitions de données nécessaires à la caractérisation du réservoir et la zone de faille cible traversés.

La mise en place de l'imagerie de puits type FMI sera réalisée sur l'ensemble du réservoir afin d'obtenir toutes les informations nécessaires à la caractérisation pétrophysique et mécanique de la zone de faille traversée. Cela permettra par exemple la création d'un DFN (modèle numérique de fractures) visant à préciser le modèle géologique et améliorer l'étude de l'aléa sismique.

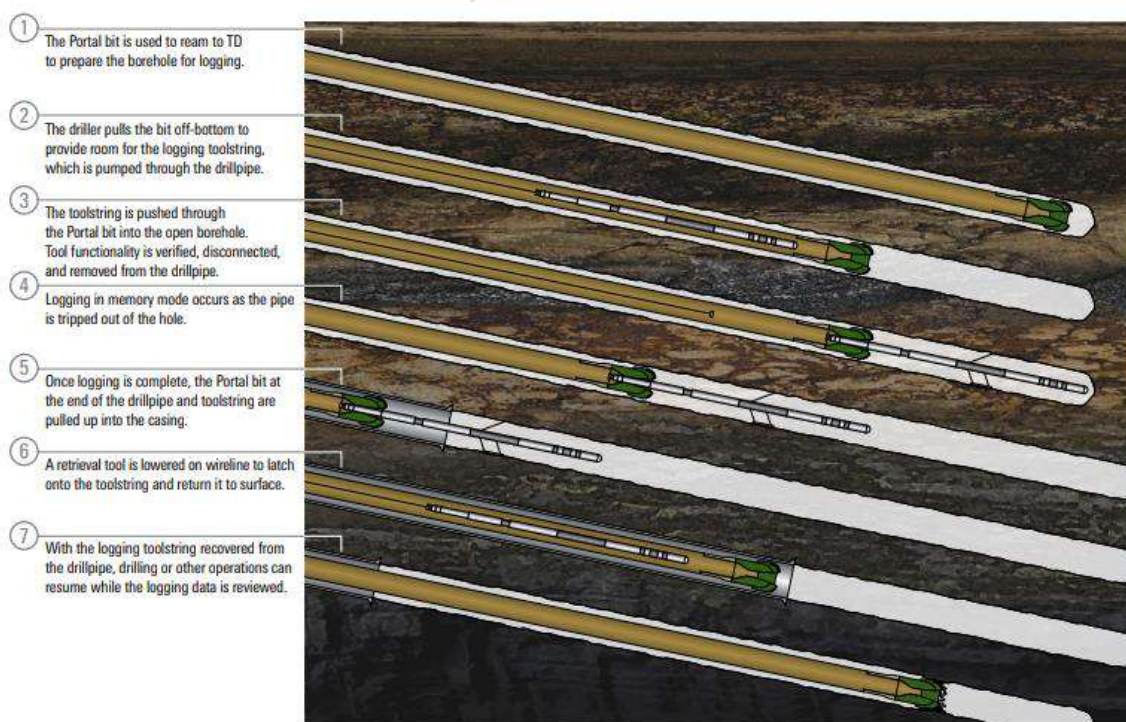


Figure 23: Schéma d'explication du déploiement de l'outil wireline pipe conveyed de Schlumberger.

Logging While Drilling (LWD) et Measurement while Drilling (MWD)

En plus des diagraphies classiques réalisées et mentionnées dans le premier dossier de DODT, il est possible d'envisager des acquisitions de données en lien avec la géomécanique et les propriétés mécaniques locales.

Dans le guide méthodologique provisoire mandaté par la DGPR, il est fait mention d'essais envisageables dans le réservoir : « Si la magnitude des contraintes est très mal connue et que des stimulations EGS sont prévues, réalisation d'essais ad hoc tel le XLOT (Extended Leak off Test, e.g. Zoback, 2011) ou HTPF (Hydraulic Testing of Pre-existing Fractures, Haimson et Cornet, 2003). »

Profil Sismique Vertical (VSP)

Le profil sismique vertical (VSP) est la mise en œuvre de sismique de puits la plus couramment utilisée. Cette mise en œuvre nécessite une source sismique située en surface, un géophone de puits ancré successivement à différentes cotes profondeur. La source a une position fixe. Elle est en général située à l'aplomb du géophone de puits quelle que soit sa profondeur. La sismique de puits a une résolution verticale métrique à décamétrique et une investigation latérale de quelques dizaines à plusieurs centaines de mètres.

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

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

« 3.2 DEFINITIONS ET GRANDEURS CARACTERISTIQUES DE LA SISMICITE

3.2.1 L'aléa et le risque sismique

L'évaluation du risque sismique consiste d'une part à analyser la probabilité d'occurrence d'un séisme d'intensité donnée en un lieu donné (aléa) et d'autre part à estimer la vulnérabilité physique, fonctionnelle (réseaux) et sociale des enjeux exposés (conséquences sur les hommes, les constructions et l'environnement). Ces enjeux peuvent être de nature humaine, économique, ou même patrimoniale.



Figure 24: L'aléa sismique

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

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

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

3.3.6.1 Limites de l'étude géomécanique avant forage

Bien que les études avant forage montrent un état de stabilité des failles ciblées sur les projets d'Eckbolsheim et Hurtigheim. Au regard du retour d'expérience du site de Vendenheim, où la stabilité des failles principales avant forage était annoncée par l'étude géomécanique, la présence potentielle de réseaux de failles secondaires dans le socle au potentiel de sismicité avéré peut modifier le potentiel de sismicité induite suite à l'injection. Afin de renforcer l'étude géomécanique et la connaissance de l'aléa sismique sur les sites d'Eckbolsheim et Hurtigheim, Georhin a déposé le 29/09/2022 une déclaration de levé géophysique de sismique réflexion pseudo 3D qui devrait permettre une meilleure caractérisation du réservoir et des failles secondaires, après calage sur la zone Nord de l'EMS qui comportent le plus d'information géosciences sur le territoire de l'EMS. Grâce à la cartographie de ce système de failles potentiellement sismogènes du socle hercynien, il sera possible d'inclure ces structures dans une analyse géomécanique actualisée dans l'objectif d'évaluer l'aléa sismique le plus complet possible.

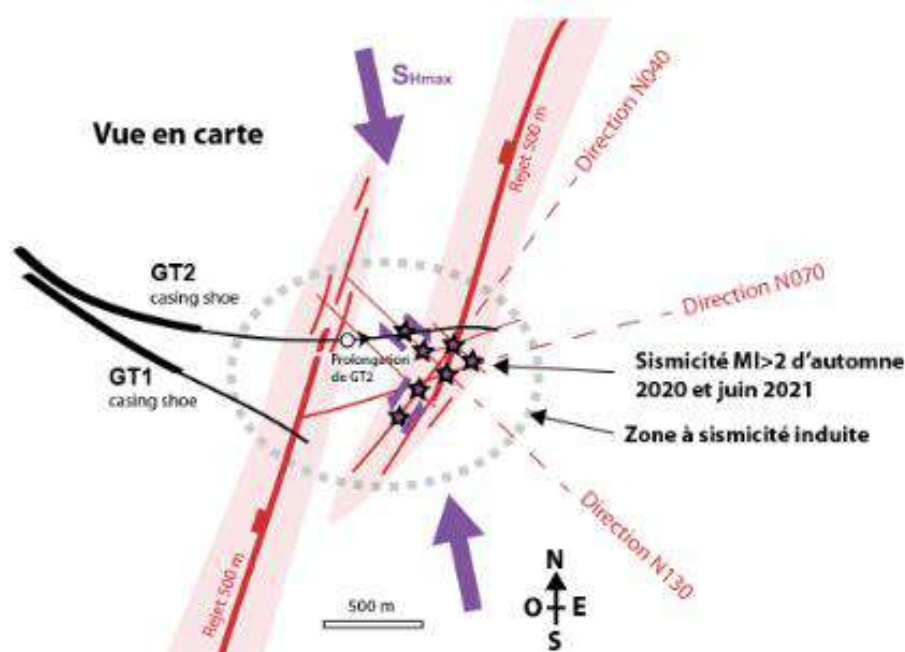


Figure 25: Schéma de synthèse de la zone de failles sur le site de Vendenheim issu du rapport du comité d'experts du 28 mars 2022.

3.3.7 Surveillance de la nappe

Les forages superficiels, dont la réalisation est l'objet du présent rapport, ont été effectués dans le cadre de la préparation du chantier d'un doublet géothermique profond appelé « Projet de Hurtigheim ». Il s'agit de la réalisation de 3 piézomètres profonds, atteignant le substratum de la nappe, dans l'objectif de permettre un contrôle qualitatif et quantitatif de la nappe. Ces 3 piézomètres captent toute la hauteur des alluvions rhénanes. Ils ont été réalisés en novembre 2017.

Les sites des forages ont été définis par Georhin et les implantations sont indiquées sur la Figure 26.

Un échantillon de terrain a été prélevé à chaque mètre traversé par l'entreprise de forage et disposé au sol. Un prélèvement et conditionnement a été effectué sur chacun des échantillons issus du piézomètre 1. Une évaluation approximative de la granulométrie des alluvions meubles a été faite sur la base suivante et reportée sur les coupes géologiques (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) :

- sable (s) : < 0.2 cm
- gravier (g) : de 0.2 à 2 cm environ
- galets (G) : > 2cm



Figure 26: Vue générale des implantations piézométrique (d'après vue aérienne Google Earth).

3.4 Réalisation sur la Partie Nord du PER de Strasbourg

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

Le secteur de Haguenau a fait l'objet d'une pré-étude de faisabilité structurale et thermique.

Sur cette base, le potentiel industriel de distribution de chaleur a été identifié, synthétisé sur la Figure 27. Les prochaines étapes sont les suivantes :

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

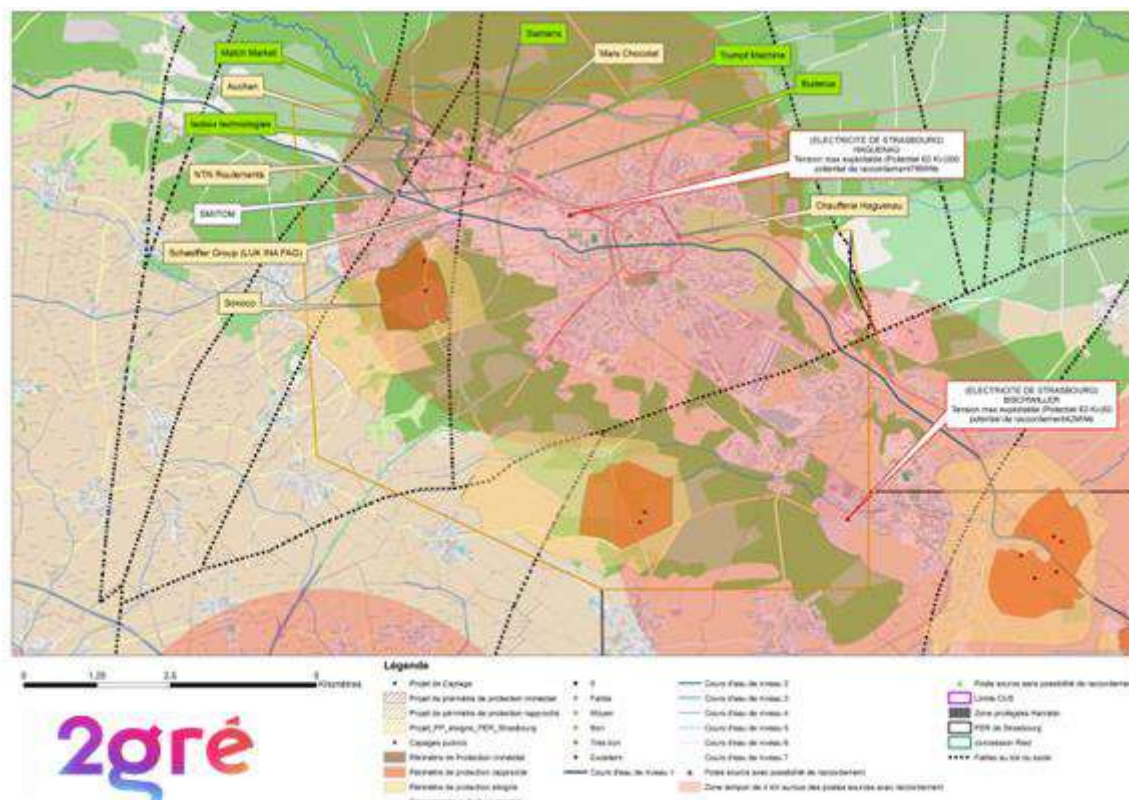


Figure 27: Potentiel de consommation de chaleur et postes sources à proximité d'Haguenau

3.4.2 Secteur de Bischwiller/Herrlisheim

Le premier forage VDH-GT1 réalisé sur l'ancienne raffinerie de Reichstett-Vendenheim a confirmé le potentiel de la faille ciblée pour ce projet.

La Figure 28 suivante présente le modèle géologique basé sur la sismique réflexion et la localisation de la faille ciblée durant le forage VDH-GT1. La faille régionale visée durant le forage VDH-GT1 s'étend au-delà de la limite Nord du PER de Strasbourg.

Les données du modèle régional GeORG sont issues des anciennes lignes sismiques disponibles sur le secteur du bassin rhénan. Les lignes sismiques utilisées sont présentées dans la Figure 29.

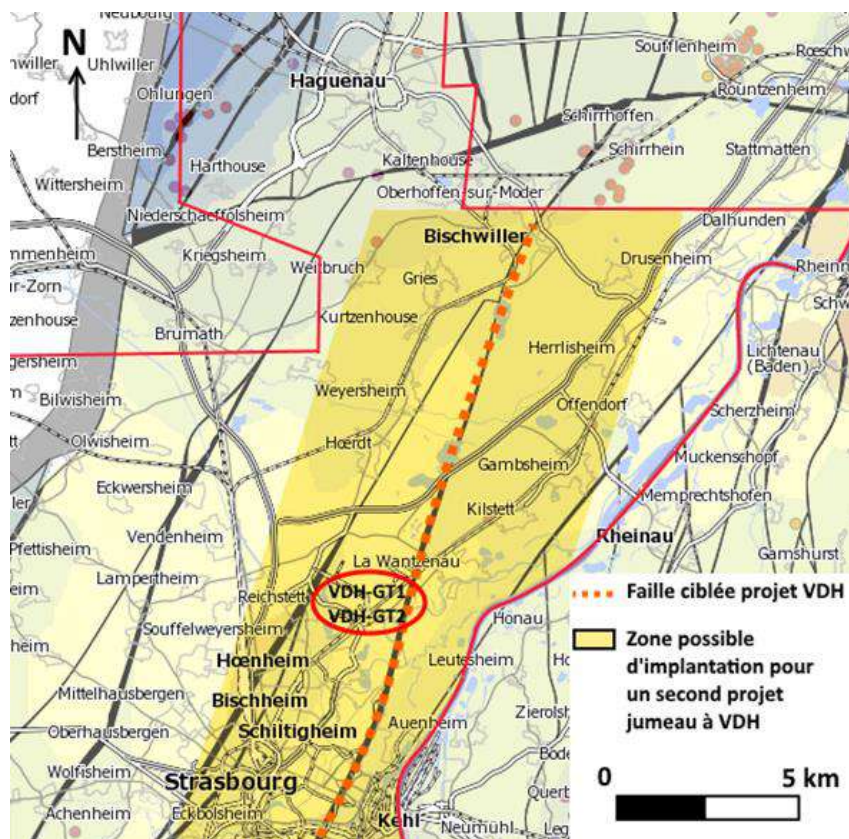


Figure 28: Localisation de la faille ciblée pour le doublet géothermique de Vendenheim et zone d'implantation possible pour de futurs clusters géothermiques.

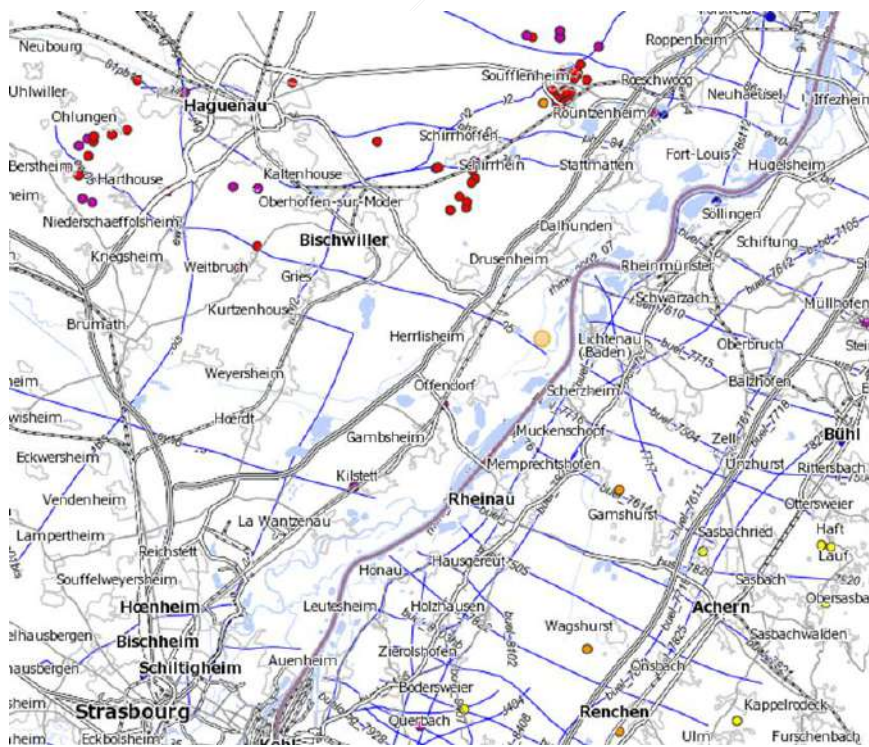


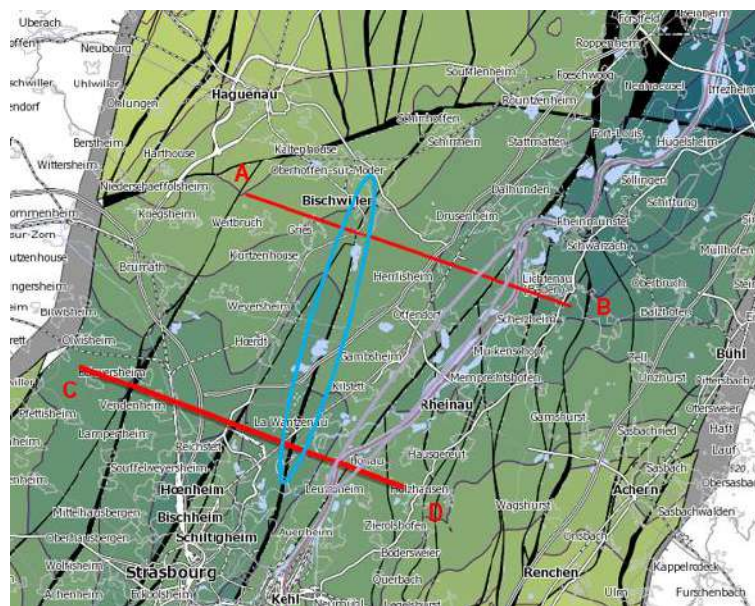
Figure 29: Localisation et mise en évidence des lignes sismiques utilisées dans la création du modèle structural GeORG.

La parcelle d'intérêt faisant l'objet de cette étude est située sur une ancienne ligne sismique (phs84p, 75st5) d'orientation NW/SE opérée par CGG. Cette ligne sismique n'est pas dans la base de données acquises par Georhin dans la création du modèle sur le projet de Vendenheim. La coupe AB (Figure 30, b) correspond à la coupe verticale suivant cette ligne sismique en surface.

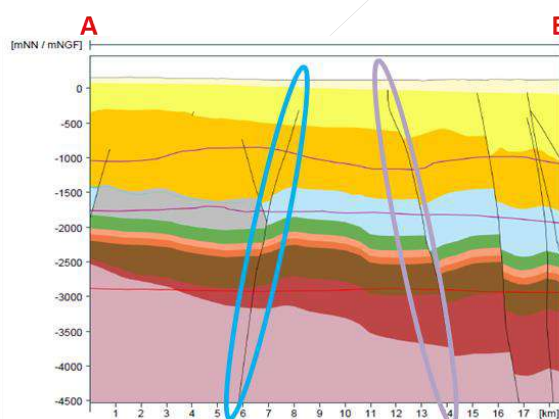
La Figure 30 suivante présente les localisations et l'agencement du système de failles de coupes géologiques verticales AB et CD du bassin Rhénan sur le secteur concerné. En bleu est identifiée la faille cible pour le projet VDH-GT1, en violet une faille majeure d'orientation NE-SW à pendage SE. Ces coupes mettent en évidence l'atténuation du rejet de la faille cible VDH-GT1 sur son extension Nord (coupe AB) ainsi qu'une remontée du toit du socle (3000m).

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

a)



b)



c)

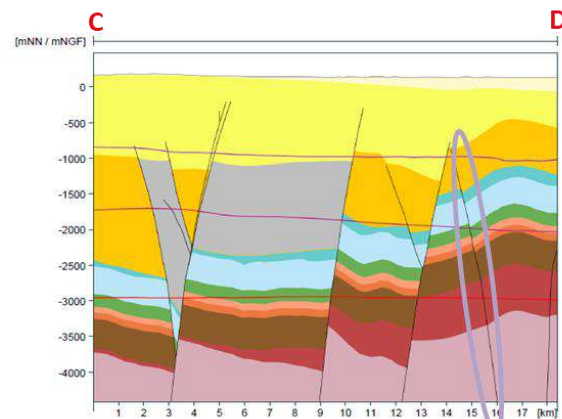


Figure 30: a) Carte structurale au toit du socle d'après GeORG, localisations des 2 coupes (AB) et (CD). b) Coupe géologique verticale AB. c) Coupé géologique verticale CD.

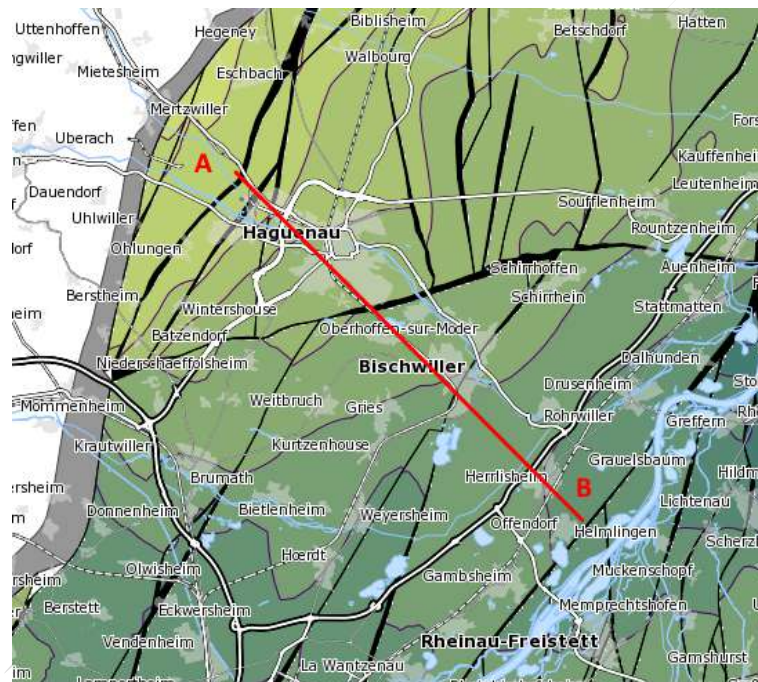
Au regard de ces premières observations, on peut dire :

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

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

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

a)



b)

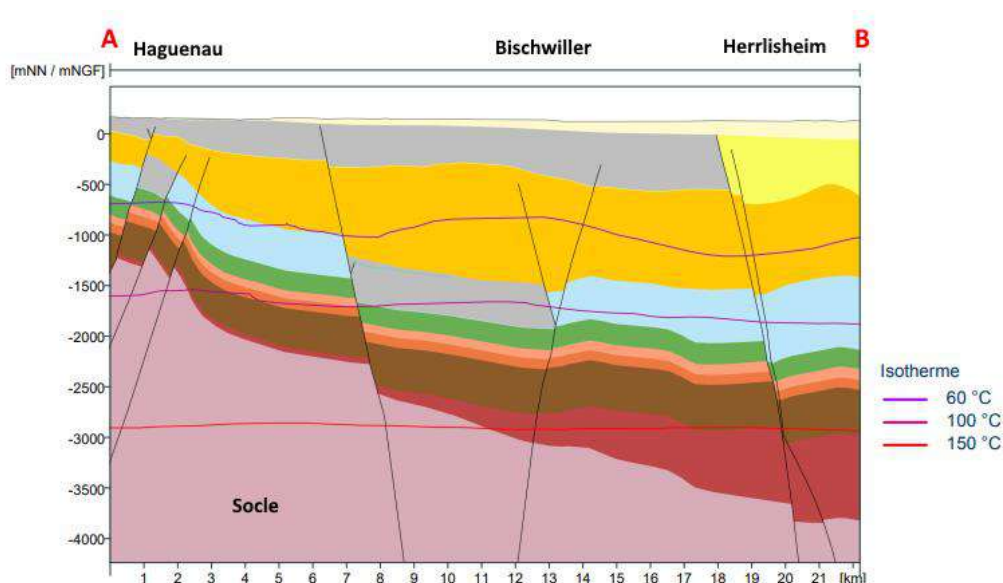


Figure 31: a) Coupe géologique NW-SE allant de Haguenau jusqu' Herrlisheim. b) Coupe géologique verticale AB

4 Récapitulatif des dépenses

4.1 Récapitulatif des dépenses engagées

Tableau 3: Récapitulatif des dépenses engagées au cours de la première durée du Permis Exclusif de Recherche Strasbourg

	Etudes G&G (k€)	Travaux géophysiques (k€)	Forage	Etudes environnementales	Installation de surface et étude de valorisation énergétique	Total (k€)
Jusqu'en 2014	2 752					2 752
2015	523	1657				2 180
2016	926	1235	1933	926		5 020
2017	1380	96	20396	591		22 463
2018	452	29	10770	193		11 444
2019	933		10411	367	18 896	30 607
2020	2711	141	25960	1807	13 462	44 081
2021	795		373		200	1 368
2022 (prévision en cours)	367					367
	10 839	3158	69843	3884	32 558	
Total (sans Centrale surface)				(°) 87 724 k€		120 282 k€

Rappel :

L'engagement sur la première période 2013 – 2018 était de 16,9 M€. Il a été dépassé à hauteur de 42,84 M€.

L'engagement sur la deuxième période 2018 – 2023 était de 19 M€. Il a été dépassé à hauteur de 44,88 M€.

En synthèse, l'engagement cumulé sur le PER de Strasbourg sur 10 ans est de 35,9 M€. Il a été dépassé à hauteur de 87,72 M€.

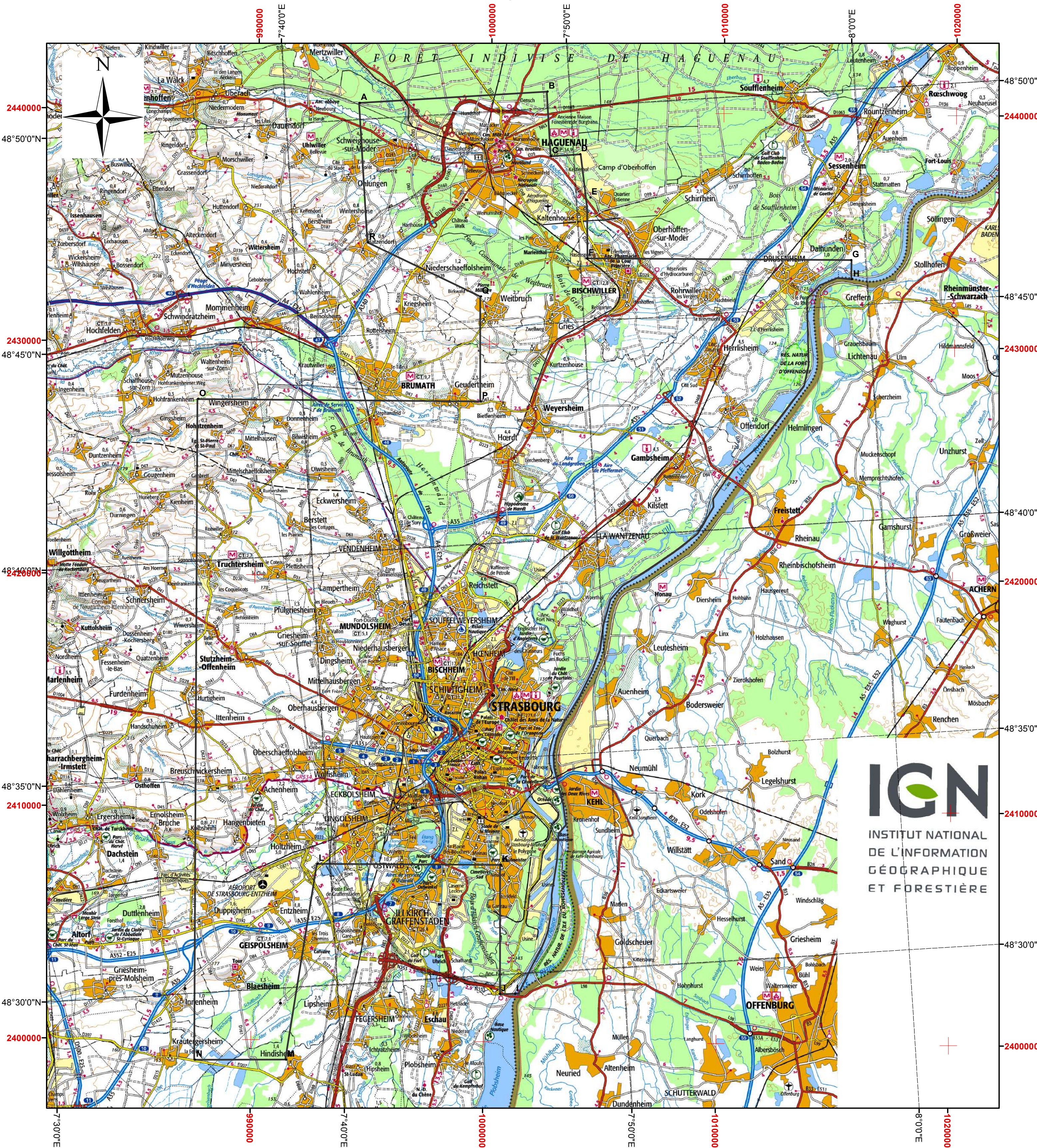


ANNEXES

- Carte du PER dit de « Strasbourg » au 1/100.000 °



Carte du Permis Exclusif de Recherche de Géothermie dit de "Strasbourg" au 1/100 000
2gré



IGN
INSTITUT NATIONAL
DE L'INFORMATION
GÉOGRAPHIQUE
ET FORESTIÈRE

PER de Géothermie Haute Température de Strasbourg

Carte du Permis Exclusif de Recherche Minier
dit de " Strasbourg " au 1 / 100 000



Légende

- Points délimitant le PER de Strasbourg
- PER dit de Strasbourg

Point	Coordonnées en RGF 93	
	X	Y
A	1045531,62	6870308,47
B	1053590,35	6870795,58
C	1053743,59	6868019,45
D	1054992,64	6868096,78
E	1055432,77	6866244,54
F	1055305,77	6863625,16
G	1066638,48	6863546,93
H	1066682,52	6862722,72
J	1051549,94	6832000,00
I	1052203,46	6831999,91
K	1051587,95	6837558,91
L	1043713,35	6837608,95
M	1042360,83	6829189,74
N	1038441,91	6829183,16
O	1038581,12	6857581,30
P	1050736,10	6857484,96
Q	1050737,47	6861993,72
R	1045889,56	6864314,55

La superficie du périmètre du permis dit de "Strasbourg" est de 572 km2