

**Rapport Phase 1 du comité d'experts créé
en appui à l'administration sur la boucle
géothermique GEOVEN**

26 Avril 2022

Version publique

Membres du comité d'experts

- Mme Monique TERRIER, en tant que représentante du BRGM
- Mme Francesca DE SANTIS, en tant que représentante de l'INERIS
- M. Roger SOLIVA, maître de conférences à l'Université de MONTPELLIER (UMR 5243 / CNRS 18)
- M. Benoît VALLEY, professeur au laboratoire d'hydrogéologie et de géothermie à l'Université de NEUCHÂTEL
- M. Dominique BRUEL, chercheur au centre géosciences, à l'Ecole des Mines de Paris
- M. Yves GERAUD, professeur à l'Université de Lorraine
- M. Jean SCHMITTBUHL, directeur de recherche CNRS à l'EOST/ITES, en tant que représentant du CNRS-INSU

Résumé

En avril 2021, la Préfecture du Bas Rhin a constitué un comité d'experts (CE) pour l'éclairer sur plusieurs questions posées autour du projet géothermique GEOVEN, localisé dans la commune de Vendenheim et mené par Fonroche Géothermie (FG). Ce comité est composé d'experts issus du monde académique (Univ. de Strasbourg/EOST, Univ. de Neuchâtel/Suisse, Univ. de Montpellier, Univ. de Lorraine, Univ. PSL/Mines PARISTECH), de l'Ineris et du BRGM. Les questions (assimilées à des objectifs) qui étaient posées concernaient :

- La compréhension des mécanismes conduisant au déclenchement de la sismicité au voisinage des puits en fin 2020 (objectif 1),
- La réévaluation du lien entre les opérations sur le site géothermique de Vendenheim et l'activité sismique survenue depuis novembre 2019 dans le secteur de la Robertsau (objectif 2),
- L'identification d'éventuels indices qui auraient pu alerter sur la survenue d'événements sismiques majeurs (objectif 3),
- L'état post-opération du réservoir (objectif 4),
- Un retour d'expérience (REX) de Vendenheim, en faisant ressortir des recommandations ou pistes de réflexion utiles pour les sites géothermiques voisins (objectif 5).

La mission a été initialement structurée en deux phases successives : la phase 1 concernant un premier avis du CE basé sur l'expertise du CE des données et des résultats propres à FG, et la phase 2 qui demandera un investissement (temps, moyen) plus important pour permettre de produire des résultats propres au CE et aux groupes d'experts associés en vue d'apporter des analyses indépendantes de vérification des résultats de FG ainsi que le développement d'approches complémentaires pour des réponses plus approfondies aux questions posées.

Le présent rapport correspond à l'avis du CE dans le cadre de la phase 1 de la mission. La phase 2 est reportée dans un cadre ultérieur à définir.

Afin d'émettre un premier avis sur ces questions, la méthodologie du CE a été de d'abord focaliser son travail sur la récupération des données mesurées ou traitées et autres documents produits par FG et utiles à sa mission. Le CE a ensuite réalisé quatre journées d'audition de FG, pour interroger l'opérateur sur les méthodes d'acquisition, de traitement et de calcul des données et paramètres, ainsi que sur les stratégies mises en place pour la réalisation des opérations à Vendenheim. Il s'est agi également de recueillir le point de vue de FG concernant les différentes questions posées par la préfecture. Ces quatre journées de travail, en plus des nombreux échanges par email avec FG, ont abouti à la constitution d'un corpus d'information inédit, qui a permis de mieux cerner les difficultés rencontrées par FG, les limites des données communiquées et des procédures suivies ainsi que les objectifs recherchés lors des différents tests réalisés lors du projet.

Un objectif 0 a été conçu pour, d'une part, consolider et valider des données existantes de FG et, d'autre part, expertiser les modèles géologique, hydrogéologique et géomécanique de FG.

Dans ce cadre, un temps plus important que prévu initialement a été nécessaire au CE pour récupérer les données de FG, comprendre les modes d'acquisition ou de traitement utilisés et structurer ces informations dans un format mieux exploitable pour conduire l'analyse avec une vision synchrone des données sur les deux puits et pour des périodes plus étendues

que celles généralement affichées par FG. De façon générale, il apparaît qu'il n'y a pas eu d'acquisition en continue des différentes données et paramètres de puits sur le site de Vendenheim avant octobre 2020. En effet, avant cette période, les mesures ont pour la plupart été réalisées seulement lorsque des opérations visant à contrôler ou améliorer les propriétés de puits ou du réservoir (stimulation), étaient en cours sur l'un ou l'autre des deux puits.

Concernant la construction du modèle géologique sur le site de Vendenheim, les données d'entrée sont peu nombreuses et peu fiables. Elles ne permettent pas de contraindre la géométrie du modèle 3D attendu en fin de phase d'exploration ni d'avoir une connaissance suffisante du réservoir. Pourtant un seul modèle a été retenu par FG sans qu'il y ait eu une analyse de sensibilité des paramètres et donc une quantification de l'incertitude correspondante. A travers les informations collectées, l'opérateur a paru rechercher plus une validation du modèle préconçu que sa remise en question. Cela a eu pour conséquence : de ne pas considérer l'hypothèse des directions de failles instables N130, pourtant décrites dès 2019 par l'EOST, et de sous-estimer la zone de relai par rapport à la connexion hydraulique entre les puits. Cela a également conduit l'opérateur à sous dimensionner la zone à considérer dans ses modèles géologique, hydrologique et géomécanique.

Il est à noter que le CE n'a pas abordé plusieurs aspects qui pourraient être importants et complémentaires mais qui ne sont pas apparus comme entrant dans sa mission telle que définie par la Préfecture : les aspects financiers du projet, les contraintes économiques, les aspects réglementaires, le positionnement sur le suivi des recommandations données par le BRGM et Ineris en 2020, des recommandations vis-à-vis du moratoire sur les projets de géothermie profonde en Alsace, ou encore l'avenir du CE.

Avis du CE sur les questions posées

Objectif 1 - La compréhension des mécanismes conduisant au déclenchement de la sismicité au voisinage des puits (en particulier à partir de fin 2020)

Le site géothermique de Vendenheim a fait l'objet de nombreuses opérations d'injection entre fin août et décembre 2020. Ces opérations se sont déroulées successivement tantôt sur GT1, tantôt sur GT2, sans attendre entre chaque test un état de stabilisation du réservoir, et avec des volumes injectés importants. Par ailleurs, lors de la phase dite de 'mise en sécurité' en novembre 2020, FG a piloté l'injection sur la base d'un débit dit « d'équilibre » qui visait à équilibrer les volumes produits de façon artésienne en GT1 avec ceux injectés en GT2. Ce concept d'équilibre de masse impliquait nécessairement l'existence d'une connexion hydraulique entre les puits en profondeur, ce qui n'était pas le cas. D'autres scénarios auraient dû être envisagés par FG. De plus la réinjection du débit produit de GT1 nécessite une surpression importante au niveau de l'injecteur GT2, loin des conditions naturelles d'équilibre.

La sismicité du 27 et 28 octobre 2020 (respectivement M_l 2,1 et 2,8) intervient durant la phase de vidange du bassin géothermal, avant le démarrage du test d'interférence en pression entre les puits. Les causes de cette sismicité sont probablement à rechercher dans le mode opératoire de la vidange du bassin réalisée le 27/10, notamment du fait des fortes variations de débits d'injection sur un temps très court et dans un réservoir où un volume conséquent de fluide avait déjà été injecté depuis septembre.

A partir de début novembre 2020, la sismicité migre vers le fonds de puits GT2, dans une zone plus profonde du réservoir jusque-là asismique. L'analyse des mécanismes au foyer des séismes ainsi que leur localisation montrent que l'activité sismique de début novembre 2020 mobilise des segments de failles différents et distants de ceux en lien avec l'essaim de

séismes situés plus haut dans le réservoir (séismes d'octobre 2020 et de 2019). Il s'agit très probablement de failles d'orientation NW-SE. Ces directions de failles sont bien connues dans la région et les calculs de stabilité des failles montrent qu'il s'agit d'une direction particulièrement instable. Le modèle géologique et géomécanique de FG n'a pas retenu la possibilité d'existence des failles N130 au voisinage des puits ; en conséquence, l'analyse de l'aléa sismique le long de ces structures n'a pas été menée.

A partir de début novembre 2020, c'est donc la mise en pression en continu du fond du puits GT2 et le cumul des volumes injectés (en particulier à partir d'août 2020) qui a entraîné une instabilité des failles intersectées par l'approfondissement du puits GT2. La surpression appliquée sur le réservoir était telle que les critères de stabilité des structures en fond de puits étaient dépassés, entraînant une instabilité de faille avec des glissements (i.e. sismicité) successifs dans le temps.

Le maintien de l'injection dans la deuxième moitié de novembre n'a fait qu'augmenter ce phénomène d'instabilité en conduisant à l'occurrence du séisme de magnitude 3,6 survenu le 4 décembre dans la même zone que celle des événements sismiques observés du 5 au 13 novembre 2020.

En comparaison avec les bases de données d'injections d'autres projets (McGarr, 2014 ; Zang et al., 2014), les magnitudes des séismes induits à Vendenheim (M_lv~3.9) correspondent aux magnitudes attendues pour de tels volumes nets injectés (~147 000m³) en suivant l'approche empirique de McGarr (2014), qui lie les magnitudes maximales observées pour différents cas d'injection de fluide dans les réservoirs profonds.

Objectif 2 - Avis du CE sur les opérations de Vendenheim et l'activité sismique survenue depuis novembre 2019 dans le secteur de Robertsau

Plusieurs éléments factuels convergent vers la conclusion que le déclenchement de la sismicité de Strasbourg/Robertsau en novembre 2019 est lié à l'activité dans les puits de Vendenheim. Parmi ces éléments, on cite :

- Entre novembre 2019 et janvier 2020 et en août 2020, la sismicité dans la zone de Strasbourg/Robertsau se produit dans les jours qui suivent une forte activité de sismicité induite autour de GT1.
- La faille F1B, faille cible du projet géothermique, correspond à la faille dite de la Robertsau. Les amas sismiques de Vendenheim et de Strasbourg/Robertsau se trouvent sur cette même faille et à des profondeurs comparables (environ 5 km).
- L'analyse de la sismicité montre deux orientations principales de failles au niveau de l'amas de Strasbourg/Robertsau : N15 (direction de F1B) et N140 (direction conjuguée). La direction N15 est cohérente avec la survenue de la sismicité le long de la faille de la Robertsau.
- En 2019, le volume total net injecté dans GT1 et GT2 est supérieur à 92 000 m³. En utilisant l'approche empirique de McGarr (2014), on constate une cohérence entre les volumes injectés et la magnitude des séismes les plus forts de Strasbourg et de Vendenheim.
- Le long de la faille F1B, entre les deux amas, Vendenheim et Strasbourg/Robertsau, il y a une zone sans sismicité. Cette absence de sismicité n'est pas une manifestation d'une non-perturbation de contrainte le long de la faille. En effet, plusieurs mécanismes tels qu', un transfert de contrainte, de fluides ou un glissement asismique de F1B depuis Vendenheim jusqu'à l'amas de Strasbourg/Robertsau sont tout à fait possible sans sismicité.

- Les tests d'août 2020 sur GT1 reproduisent un temps de réaction similaire de la sismicité de l'amas de Strasbourg/Robertsau à celui d'octobre 2019 à savoir une dizaine de jours pouvant correspondre à un transfert de l'effet de surpression depuis GT1 vers la zone de Strasbourg/Robertsau.
- Les séismes de 2019 et 2020 dans la zone de Strasbourg/Robertsau, localisés à environ 5 km de profondeur, sont moins profonds que les séismes naturels dans la région. Ce secteur ne présentait pas d'activité sismique avant le démarrage en 2018 des opérations d'injection sur le site de Vendenheim.

L'ensemble de ces éléments forme un faisceau d'indices pour établir le lien entre les injections dans GT1 et l'activation de la zone de Strasbourg/Robertsau. Néanmoins les mécanismes de transfert (perturbation de contrainte, réponse poroélastique, etc.) sont encore mal connus et les données pour les contraindre en nombre très limité. Leur caractérisation nécessite des analyses et des études plus approfondies (intégration de données complémentaires géodésiques, analyse plus approfondie de la sismicité, modélisations géomécaniques du réservoir ...).

Objectif 3 - Avis du CE sur les indices d'alerte

Le projet de Vendenheim vise un réservoir profond (environ 5 km) à proximité d'une faille régionale. Or avec des profondeurs élevées, les puits se rapprochent sensiblement de la zone sismogénique (i.e. zone où les conditions d'initiation de séismes sont favorables). Par conséquent le potentiel pour des relâchements de contraintes induisant des événements sismiques de magnitude importante augmente. Si de plus les failles sont soumises à un état de contrainte critique, où de faibles variations (par exemple modification de la pression réservoir due aux injections) peuvent être suffisantes pour déclencher un glissement de la faille, et que ces failles ont une taille importante (la magnitude potentielle d'un séisme étant liée à la taille de la faille associée), cela génère des conditions d'un aléa sismique élevé. La gestion de cet aléa ne pouvait se faire sans une connaissance précise de la structure géologique du réservoir, de la géométrie de faille, de leur état mécanique et de la mise en œuvre d'outils robustes de prévision de la sismicité (Traffic Light Systems), ce qui n'a pas été le cas.

Au vu des grandes profondeurs atteintes, de l'existence de zones de failles importantes, d'un chargement tectonique significatif, mais aussi des faibles valeurs d'injectivité mesurées en GT1 et GT2 et des grands volumes de fluide injectés par l'utilisation de l'eau provenant du rabattement de la nappe phréatique sur le site industriel de Reichstett (nappe d'Alsace), le site géothermique de Vendenheim présentait un niveau d'aléa sismique pouvant être considéré comme élevé. Ces observations auraient dû inciter à plus de précautions dans la conduite des opérations sur le site avec la mise en place d'une analyse plus avancée de l'aléa sismique.

Le manque de données solides pour la construction d'un modèle géologique a impliqué une mauvaise connaissance de la structure du réservoir et une mauvaise évaluation du risque de sismicité. Dans une telle situation, avec un modèle sous contraint, plusieurs modèles alternatifs tenant compte du contexte régional auraient dû être élaborés et investigués, plutôt que de choisir de faire évoluer un seul modèle structural. Cela aurait permis de définir des scénarios plus conservateurs pour cadrer les développements et opérations effectuées en forages.

De façon générale, les procédures opérationnelles de FG se sont toujours placées dans des scénarios favorables (connexion hydraulique entre les puits, état du réservoir supposé stable, non prise en compte des volumes injectés auparavant, indice d'injectivité ou de

productivité plus important que la réalité, mode de calcul de la surpression réservoir, etc.). Cela a conduit à sous-estimer les risques. En outre, la gestion des opérations en particulier lors de la phase dite de 'mise en sécurité' en novembre 2020, a été basée sur la valeur de surpression réservoir, or celle-ci n'est pas une valeur mesurée, mais interprétée, avec plusieurs paramètres d'entrées hypothétiques. De fait, les protocoles opérationnels de mise en sécurité des puits retenus par FG sont discutables.

Concernant l'identification d'indicateurs qui auraient pu précéder les séismes majeurs, il serait nécessaire de réaliser une rétro-analyse détaillée des données brutes (hydrauliques et sismiques) ce qui va au-delà des travaux menés dans le cadre de la phase 1 de la mission du CE. Des propositions sont faites en ce sens pour la phase 2 de la mission d'expertise.

Objectif 4 - Avis du CE sur l'état post-opération du réservoir

L'analyse de la localisation fine des séismes et des mécanismes au foyer associés suggèrent fortement qu'il existe des failles N130 (ou NW-SE) au niveau du réservoir. Ces failles sont optimalement orientées par rapport au champ de contraintes pour générer des séismes (selon un critère de rupture de Mohr-Coulomb, sans surpression de fluide provenant des injections dans les puits, et à cohésion faible). La taille de ces failles semble être de l'ordre de quelques centaines de mètres en accord avec la taille des ruptures des séismes de la fin 2020 et de juin 2021. Cette configuration peut être encore susceptible de générer des séismes de magnitude comparable. Des analyses plus détaillées des propriétés mécaniques des directions des failles instables relevées (N0-20, N40, N130) doivent être menées pour mieux quantifier l'aléa sismique associé. A noter que les failles de direction N20 présentent des dimensions plus importantes que les failles N130 ou N40, et de fait sont capables de générer des séismes de magnitude plus forte.

Aujourd'hui le réservoir n'est pas encore stabilisé en pression. Après un an, la pression a baissé d'un facteur 10 dans GT2 mais est encore deux fois supérieure à la pression naturelle estimée du réservoir. Il est indispensable de continuer à mesurer les températures et pressions dans les puits, et de maintenir le réseau sismique existant, ainsi que de continuer le traitement des données.

Cette surveillance pourrait être complétée par un réseau de suivi des déformations possibles en surface (suivi géodésique GSS, InSAR), l'acquisition d'une imagerie de réservoir 4D (tomographie par exemple), un suivi géochimique des gaz (ou des fluides en profondeur si les puits le permettent), une réalisation de profils (logs) thermiques au cours des prochains mois.

Objectif 5 - REX : Les enseignements à tirer du projet de Vendenheim

Il est apparu un manque important de structuration et de consolidation des données mesurées ou calculées par FG. Cela a fortement pénalisé l'analyse et la compréhension des tests par FG.

La connaissance initiale de la géologie du site de Vendenheim n'était pas suffisante pour bien appréhender et évaluer les risques à la fois géologique (identifier et atteindre la ressource de chaleur attendue) et sismique (prévenir voire éviter l'occurrence de séismes ressentis et ceux générant des dégâts). Les incertitudes du modèle géologique local sont dues aux imprécisions de localisation des interfaces lithologiques, à la connaissance insuffisante de la géométrie des réseaux de failles, de leur état de contrainte mécanique et de leur perméabilité, de la perméabilité des massifs rocheux traversés par les forages, etc. Il aurait été nécessaire d'intégrer dès la phase d'exploration des modèles géomécaniques même simples et de considérer des scénarios alternatifs possibles en tenant compte de l'état

des connaissances et de ses incertitudes. Une telle démarche cherchant à quantifier les possibles aurait pu permettre une meilleure évaluation des risques préalablement et pendant les activités sur les puits.

La géothermie profonde EGS en tant que ressource énergétique est encore en phase de développement. FG a participé à plusieurs projets de recherche tournés vers cette technologie de géothermie profonde, mais les retours d'expérience des projets précédents, les résultats et les questionnements de la communauté scientifique n'ont pas suffisamment été pris en compte dans la conduite du projet. Une meilleure estimation de la maturité réelle de la filière et une meilleure coopération avec les équipes de recherche auraient pu faciliter l'acquisition et la définition du niveau de connaissance minimal à atteindre à chaque étape de l'avancée du projet.

Les connaissances minimales nécessaires aux différentes phases du projet (fin de la phase exploratoire, foration des puits, stimulation du réservoir, démarrage du doublet, phase opérationnelle, etc.) doivent être mieux définies. Ce corpus d'informations minimales devrait être intégré à un phasage des projets avec des évaluations de type Go / no Go impliquant des experts extérieurs au projet dans une gouvernance à redéfinir.

Le comité relève par ailleurs que les éléments de communication de FG tout au long du projet n'ont pas intégré les incertitudes sur les connaissances disponibles et les analyses de risque géologique et/ou sismique du projet.

Ouverture des données du projet de Vendenheim aux travaux de recherche autour de la géothermie

Concernant le site de Vendenheim, un nombre considérable de données a été acquis. Il constitue un matériel précieux pour des analyses scientifiques qui permettraient de mieux comprendre ce type de réservoir, sa gestion et les risques de sismicité. Aujourd'hui, l'essentiel de ces données est confidentiel. Dans le cadre de ce rapport plusieurs pistes de recherche visant à mieux répondre aux questions posées initialement au CE sont proposées. Ces développements ne pourront se faire que si un grand nombre de ces données deviennent disponibles librement auprès de la communauté scientifique.

Sommaire

1.	Introduction	15
1.1.	Contexte et mission du comité d'experts.....	15
1.2.	Les objectifs de la mission	16
1.3.	Modalités de travail du CE	17
1.3.1.	Les deux phases de la mission	17
1.3.2.	Modalités de traitement de la phase 1 de la mission.....	17
1.4.	Vue d'ensemble sur le déroulé du projet de Vendenheim	18
1.4.1.	Les objectifs initiaux et les travaux réalisés avant la demande de permis	18
1.4.2.	Synthèse sur les opérations.....	20
2.	Objectif N°0 - Consolidation et validation des données existantes.....	24
2.1.	Point général sur les données.....	25
2.1.1.	Description et modalités d'archivage des données et documents	25
2.1.2.	Modalités d'utilisation des données et documents	25
2.1.3.	Avis du CE sur les données.....	26
2.2.	Points spécifiques sur les données.....	27
2.2.1.	Mesures hydrauliques (pressions, débits, températures, volumes)	27
2.2.2.	Mesures des indices d'injectivité et de productivité IP.....	29
2.2.3.	Estimation de propriétés de réservoir par méthodes analytiques (diagnostic par analyse des dérivées logarithmiques des variations de pression).....	31
2.2.4.	Mesures en forage et mesures de contraintes	31
2.3.	Points sur les motivations pour les tests choisis et de la stratégie suivie par FG.....	33
2.4.	Objectif N°0 – Principaux points à retenir (1/2)	33
3.	Objectif N°0 – Modèles géologique, hydrogéologique et géomécanique	36
3.1.	Contexte structural régional	36
3.2.	Description du modèle géologique de FG et son évolution	38
3.2.1.	La structure cible à la résolution GeORG.....	38
3.2.2.	Le modèle géologique construit à partir de l'interprétation des profils sismiques anciens et nouvellement acquis par FG.....	39
3.2.3.	Évolution du modèle après acquisition des données de puits et réalisation des tests de GT1 et GT2.....	40
3.2.4.	Évolution du modèle après intégration des données de sismicité	41
3.3.	Modèle hydrogéologique de FG et son évolution	42
3.4.	Discussion du CE sur la continuité structurale des failles principales.....	43
3.5.	Avis du CE sur les modèles géologique et hydrogéologique de FG	47
3.6.	Objectif N°0 – Principaux points à retenir (2/2)	47
4.	Objectif N°1 – Compréhension des mécanismes conduisant au déclenchement de la sismicité au voisinage des puits, en particulier les évènements de fin 2020	49
4.1.	Synthèse de l'historique des opérations selon Fonroche Géothermie	49
4.1.1.	L'évolution des puits en 2020	49
4.1.2.	Essais hydrauliques en 2020	50

4.1.3.	Résumé des observations de FG sur la sismicité d'octobre à décembre 2020	56
4.2.	Avis préliminaire du CE.....	58
4.2.1.	Discussion sur les essais hydrauliques d'août 2020 en GT1.....	58
4.2.2.	Discussion sur la vidange du bassin et le test d'interférence d'octobre 2020 ..	58
4.2.3.	Discussion sur la sismicité d'octobre 2020.....	61
4.2.4.	Discussion sur les opérations menées depuis le 29 octobre et jusqu'à début novembre 2020	62
4.2.5.	Discussion sur la sismicité de novembre et décembre 2020	62
4.2.6.	Localisation relative de la sismicité et analyse des mécanismes au foyer par FG	64
4.2.7.	Discussion sur les modèles géomécaniques du réservoir	66
4.3.	Proposition d'analyses complémentaires	68
4.4.	Objectif N°1 – Principaux points à retenir.....	70
5.	Objectif N°2 – Réévaluation du lien entre les opérations à Vendenheim et l'essai de Strasbourg (2019)	72
5.1.	Synthèse de l'historique des opérations entre 2017 et 2019 selon Fonroche Géothermie.....	72
5.1.1.	L'évolution des puits entre 2017 et 2019.....	72
5.1.2.	Essais hydrauliques et chimiques entre 2018 et 2019	73
5.1.3.	Synthèse des observations de FG sur la sismicité de Novembre 2019.....	75
5.2.	Avis préliminaire du CE.....	77
5.2.1.	Discussion sur la temporalité de la sismicité au voisinage des puits GT1 et GT2 et dans la zone de la Robertsau/Strasbourg à partir des données de l'EOST	77
5.2.2.	Discussion sur l'utilisation de la 'surpression réservoir' calculée à la place d'une réelle mesure de pression.....	83
5.2.3.	Discussion sur le colmatage de GT1 et le rôle de l'air-lift.....	84
5.2.4.	Discussion sur les très grands volumes cumulés injectés	84
5.2.5.	Discussion sur l'absence d'observation d'événements sismiques entre l'amas sismique du nord (Wantzenau/Vendenheim) et celui du sud (Robertsau/Strasbourg) ..	86
5.2.6.	Discussion sur la sismicité dans la zone de Strasbourg en septembre 2020..	87
5.2.7.	Discussion sur la question de la classification des événements.....	87
5.2.8.	La question de séismes induits à grande distance	88
5.2.9.	Discussion sur l'hypothèse d'un changement régional voire européen du taux de sismicité naturel en novembre 2019	89
5.3.	Proposition d'analyses complémentaires	90
5.4.	Objectif N°2 – Principaux points à retenir.....	92
6.	Objectif N°3 – Identification d'éventuels indices d'alerte.....	94
6.1.	Synthèse des observations de Fonroche Géothermie.....	94
6.2.	Avis préliminaire du CE.....	94
6.2.1.	Discussion sur le niveau d'aléa sismique attendu pour le site de Vendenheim	94
6.2.2.	Discussion sur la conduite des opérations	98
6.2.3.	Discussion sur l'interprétation de la sismicité	99

6.3.	Proposition d'analyses complémentaires	99
6.4.	Objectif N°3 – Principaux points à retenir.....	99
7.	Objectif N°4 – Analyse de l'état post-opération du réservoir	101
7.1.	Synthèse des observations de Fonroche Géothermie.....	101
7.2.	Avis préliminaire du CE.....	101
7.2.1.	Point sur la pression mesurée en tête de puits	101
7.2.2.	Point sur l'occurrence du séisme du 26 juin 2021	103
7.2.3.	Point sur la stabilité mécanique des failles.....	104
7.2.4.	Point sur les actions à mettre en place sur le site de Vendenheim.....	105
7.3.	Proposition d'analyses complémentaires	105
7.4.	Objectif N°4 – Principaux points à retenir.....	106
8.	Objectif N°5 – REX de Vendenheim pour les sites géothermiques voisins	108
8.1.	Synthèse des observations de Fonroche Géothermie.....	108
8.2.	Avis préliminaire du CE.....	110
8.2.1.	Aspects sur les conditions initiales du site	110
8.2.2.	Aspects techniques et sur le mode opératoire	111
8.2.3.	Historique des collaborations scientifiques de FG.....	113
8.2.4.	Retours d'expérience concernant les aspects socio-économiques du projet.....	115
8.3.	Objectif N°5 – Principaux points à retenir.....	117
9.	Conclusion et recommandations	118
10.	Bibliographie	123
11.	Annexes	126

Liste des figures

Figure 1 : Présentation générale des opérations et des données du site géothermique de Vendenheim.....	19
Figure 2 : A gauche : Évolution de l'IP sur GT1-ST7 (2ème jambe) jusqu'au 24 octobre 2019. A droite : Évolution de l'IP en 2020, 3ème jambe.....	30
Figure 3 : A gauche Index IP évalué pour le puits GT2 au cours des essais de 2019. A droite : Évolution de l'index sur le puits GT2 étendu, au cours des essais réalisés en 2020.	31
Figure 4 : a) Organisation des structures hercyniennes dans le Fossé Rhéan (Schumacher, 2002) ; b) Localisation des dépôts centres au Quaternaire (Schumacher, 2002) ; c) Carte des anomalies magnétiques dans le secteur Strasbourg- Schirmeck (Edel et al 2018) ; d) Organisation de la fracturation dans le secteur de Schirmeck (Bertrand et al., 2018).	37
Figure 5 : Écorché à 4000 m du modèle GeORG (d'après https://www.geopotenziale.eu) ...	39
Figure 6: Plan de position des profils sismiques (lignes rouges) et 2 exemples d'interprétation de profils utilisés pour construire le modèle géologique exploratoire. Figures de FG.....	40
Figure 7 : Vue en carte des failles du modèle structural régional dit "de Strasbourg" édité par Fonroche Géothermie en 2014 (Figure de FG).	Erreur ! Signet non défini.
Figure 8 : Évolution entre 2017 à 2018 du modèle structural VDH (Figures de FG).....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 9 : Modèle structural de FG, début 2020, vue du dessus (Figure de FG).....	41
Figure 10 : Modèle structural de FG, fin 2020, vue du dessus (Figure de FG).....	42
Figure 11 : Schéma de synthèse de discussion du modèle structural de FG, vue en carte...	45
Figure 12 - Opérations menées dans GT1 en août-septembre 2020 et magnitude des événements sismiques enregistrés. Figure extraite du fichier FG_DT_F05-1b_2021-04 de FG.....	51
Figure 13 - Opérations entre septembre et début octobre en GT2 et magnitude des événements sismiques enregistrés. Figure extraite du fichier FG_DT_F05-2b_2021-04 de FG.....	52
Figure 14 - Opérations entre le 11 et le 29 octobre sur le doublet de Vendenheim et magnitude des événements sismiques enregistrés. Figure extraite du fichier FG_DT_F05-2b_2021-04 de FG.	53
Figure 15 - Opérations en GT1 et GT2 et magnitude des événements sismiques enregistrés entre fin octobre et début décembre 2020. Figure extraite du fichier FG_DT_F05-2b_2021-04 de FG.	55
Figure 16 : Débit d'injection (en GT2), débit de production (en GT1), surpression sur le réservoir et magnitude des événements sismiques observés entre le 3/12/20 et le 02/01/21. Figure extraite du fichier FG_DT_F05-2b_2021-04 de FG.....	56
Figure 17 : Identification d'essaims sismiques par FG sur la base de la localisation de la sismicité. Image du haut : distribution spatiale des essaims sur le plan horizontal. Image du bas : distribution temporelle des essaims. Images montrées par FG lors de l'audition du 9 juin 2020.....	58
Figure 18 : Mesures des débits d'injection (GT2, courbe bleue) ou production (GT1, courbe rouge), surpressions réservoir (en GT2, courbe verte) et microséismes enregistrés sur la période du 26 au 31 octobre 2021 (figure de FG).....	59

Figure 19 : Mesures des débits d'injection (GT2, courbe bleue) ou production (GT1, courbe rouge), surpression réservoir (en GT2, courbe verte) et microséismes enregistrés sur la période 11 au 31 octobre 2021 (figure de FG).....	60
Figure 20 : Production dans GT1 pour le test d'interférence, le 28 et 29 octobre 2020 : débit de production (courbe bleue) et rabattement dans le puits (courbe verte)	61
Figure 21 : Localisation des événements sismiques de fin octobre (cercles en bleu clair) et entre début novembre et début décembre 2020 (cercles bleu foncé).	63
Figure 22 : Résultats de FG sur la relocalisation relative réalisée avec hypoDD pour les événements de fin 2020.(Figure de FG).	65
Figure 23 : Résultats du slip tendency (ST) modélisé par Q-Con sur les failles du modèle d'exploration de 2014 (a) et les failles du modèle révisé début 2020 (b et c).	67
Figure 24 : Orientation de sismicité et stabilité des failles.....	68
Figure 25 : VDH-GT2 - Détail des trois stimulations thermiques de 2019 de GT2 -	73
Figure 26 : VDH-GT1 - Stimulations chimique et hydrauliques de la deuxième jambe de GT1 en 2019	74
Figure 27 : VDH-GT2 - Dernière stimulation hydraulique de GT2 (ST2 - première faille) en Nov 2019.....	74
Figure 28 : VDH-GT1 - Dernière stimulation de GT1 (version ST7 - deuxième jambe) en Nov 2019	75
Figure 29 : Localisation géographique de la sismicité au voisinage des puits GT1 et GT2 à partir du catalogue de sismicité de FG	76
Figure 30 : Evolution de la sismicité au cours du temps depuis 01/11/2019 dans la région de la Wantzenau (en bleu), dans la région de la Robertsau (en rouge) et dans les autres régions en vert, à partir du catalogue de sismicité de FG. (Figure FG)	77
Figure 31 : Évolution temporelle de l'activité sismique à proximité du site de Geoven..	78
Figure 32 : Comparaison de l'évolution en temps (jours) de la sismicité dans la région des puits GT1/GT2, amas de Vendenheim/La Wantzenau (en bleu) et dans la région de l'amas de Strasbourg/Robertsau (en rouge).	79
Figure 33 : (a) (gauche) Localisation des grappes de sismicité nord et sud du catalogue BCSF-Rénass par rapport à la géologie structurale locale.	80
Figure 34 : Distribution de la profondeur des séismes à partir des localisations du Bcsf-renass: en bleu, les séismes du l'amas de La Wantzenau/Vendenheim; en rouge, les séismes de l'amas de la Robertsau/Strasbourg [extrait de Schmittbuhl et al, (2021)].	81
Figure 35 : Évolution temporelle du taux de sismicité mensuel depuis le 01/01/1980 pour différentes régions centrées sur la position de la tête de puits de Geoven, mais en utilisant différents rayons : (de haut en bas) R = 5, 10, 20, 30 et 50 km [extrait de Schmittbuhl et al, 2021].	82
Figure 36 : Détail de l'évolution en 2019 du nombre de séismes du catalogue de sismicité BCSF-Rénass (en bleu), ainsi que ceux détectés par template matching (en orange). [extrait de Schmittbuhl et al, 2021]	82
Figure 37 : Localisation de l'amas de sismicité nord (Vendenheim/Wantzenau) et sud (Strasbourg/Robertsau)	83

Figure 38 : Magnitude maximale observée en fonction du volume injecté dans des opérations de géothermie profonde (carrés), d'injections d'eau usée (triangles), de fracturation hydraulique pour les gaz de schistes (rond) et du projet de forage profond KTB (étoile) [extrait de Zang et al, 2014]. La loi de limite de magnitude maximale vient des travaux de McGarr, (2014).85

Figure 39 : (B) Décroissance spatiale depuis le puits d'injection de la densité de sismicité induite. (C) Prédictions théoriques de la baisse de la densité spatiale avec la distance au puits (Extrait de Brodsky & Goebel, Science, 2018).89

Figure 40 : Suivi GPS de la station REIC située près du site de GEOVEN: différence de la composante horizontale nord par rapport au mouvement du site montrant un comportement anormal en 2020 (oscillation) [Extrait de Schmittbuhl et al, 2021 - Suppl. Material].91

Figure 41 Relations volumes-magnitudes maximales modifiées d'après Zang et al. (2014). 96

Figure 42 - Relation entre magnitude sismique et injectivité (Zang et al., 2014).97

Figure 43 : A : Evolution de la pression en tête de puits de GT2 depuis le 1/11/20 (tracé rouge) ; B : chronique des débits produits et injectés dans GT1 (tracé bleu) et GT2 (tracé rouge) depuis le 1/11/20. Le shut-in a lieu le 2-jan-2021 à 12:35 (trait noir)..... 102

Figure 44 : Analyse préliminaire de la décroissance de pression postérieure au shut-in du 2-jan-2021 à 12:35. En rouge les données et en pointillé une régression exponentielle du type : $p_t = p_e + \Delta p \exp(-t/t')$ 103

Figure 45 : Localisation relative de la sismicité sur le site de Vendenheim issue des analyses de l'EOST (voir note de l'EOST du 27/06/2021). 104

Figure 46 : Coupe géologique Nord/Sud passant par les sites de Soultz-sous-Forêts, de Rittershoffen et Vendeheim en utilisant le modèle GEORG. 111

Liste des tableaux

Tableau 1 : Détail des quatre journées d'audition de FG par le CE. Au total, ces auditions représentent 24h30 d'enregistrement. 18

Tableau 2 : Liste synthétique des opérations de forage construite sur la base des informations fournies par Fonroche Géothermie dans le fichier FG_DT_I01_2021-04-28.xlsx. 21

Tableau 3 : Liste des tests réalisés sur les puits, synthétisée sur la base des informations fournies par Fonroche Géothermie dans le fichier FG_DT_I01_2021-04-28. 21

Tableau 4 : Bilan des volumes injectés et produits dans les puits GT1 et GT2 selon les périodes du projet. Les données sont extraites de fichier 'FG_DT_I02e_2021-08-06.xlsx' après correction d'une erreur sur les volumes cumulés sur GT1 pour la période 2018-2020. 22

Tableau 5 : Les sept critères opérationnels pour classer les séismes induits ou non induits [d'après Davis et Frohlich, 1993]. (extrait de Schmittbuhl et al, 2021). 88

Tableau 6 : Liste des collaborations scientifiques sur le site de Vendenheim telle que reportées par FG dans le fichier FG_DT_I03_2021-06-16.xlsx 114

1. Introduction

1.1. Contexte et mission du comité d'experts

Entre novembre 2019 et juin 2021, plusieurs séquences sismiques, comprenant des événements de magnitude supérieure à 2, ont été observées au nord de l'Eurométropole de Strasbourg, sur deux zones distinctes dans la commune de Vendenheim et dans le quartier de La Robertsau à Strasbourg.

La sismicité sur la commune de Vendenheim, survenue depuis octobre 2020, se localise à proximité directe du projet géothermique GEOVEN, porté par la société Fonroche Géothermie (FG), et notamment autour du puits GT2 du doublet géothermique existant. L'origine de cette sismicité, qui a culminé dans un événement de M 3,9 le 26 juin 2021, est sans aucun doute anthropique et plus précisément à attribuer aux opérations réalisées par FG sur le doublet GEOVEN.

La sismicité dans le secteur de La Robertsau, observée à partir de novembre 2019 avec l'événement le plus fort atteignant une magnitude de 3,1 le 12 novembre 2019, se localise à environ 5 km au sud-est des travaux menés sur le site GEOVEN, dans une zone qui a été très peu impactée par des séismes d'origine naturelle dans le passé récent. Une origine anthropique pour cette sismicité a donc été proposée, cependant cette hypothèse est rejetée par la société FG qui met en avant des mécanismes d'origine naturelle.

Ces séquences sismiques, qui ont été largement ressenties par les populations locales, ont conduit l'autorité administrative à suspendre une première fois le projet GEOVEN, suite aux séismes de novembre 2019, puis à formuler un arrêt définitif du projet suite au séisme de magnitude 3,6 du 4 décembre 2020 et demander à la société FG une déclaration d'arrêt définitif des travaux miniers sur le site.

Pour améliorer la compréhension de ces phénomènes sismiques et évaluer les liens avec les opérations géothermiques sur le site GEOVEN, la Préfecture du Bas-Rhin a mis en place et missionné, en date du 16 avril 2021, un comité d'experts (CE) pour travailler sur le sujet.

Sur la base de la lettre de mission envoyée aux membres du CE par la Préfecture du Bas-Rhin le 16 avril 2021, la fonction du CE est d'éclairer l'autorité administrative ainsi que la commission de suivi de site de Reichstett-Vendenheim sur la compréhension des différentes séquences sismiques intervenues sur l'Eurométropole de Strasbourg depuis novembre 2019 et sur les questions techniques et géologiques relatives à la maîtrise du risque sismique.

Sont membres du comité :

- Mme Monique TERRIER, en tant que représentante titulaire du BRGM,
- Mme Francesca DE SANTIS, en tant que représentante de l'INERIS,
- M. Roger SOLIVA, maître de conférences à l'Université de MONTPELLIER (UMR 5243 / CNRS 18)
- M. Benoît VALLEY, professeur au laboratoire d'hydrogéologie et de géothermie à l'Université de NEUCHÂTEL,
- M. Dominique BRUEL, chercheur au centre géosciences, à l'École des Mines de Paris
- M. Yves GERAUD, professeur à l'Université de Lorraine
- M. Jean SCHMITTBUHL, directeur de recherche CNRS à l'EOST/ITES, en tant que représentant du CNRS-INSU

1.2. Les objectifs de la mission

La mission du CE se décline en cinq objectifs principaux décrits ci-dessous et définis dans le courriel de la DREAL Grand Est du 12 avril 2021.

Objectif 1 : Compréhension des mécanismes conduisant au déclenchement de la sismicité au voisinage des puits, en particulier les événements de fin 2020

Il s'agit d'apporter un avis technique sur les causes probables des événements sismiques de fin 2020 et d'évaluer comment et dans quelle mesure les pratiques mises en œuvre par FG (par exemple en termes de protocoles de tests hydrauliques, ainsi que des profondeurs atteintes) ont eu un impact sur le déclenchement des différentes séquences sismiques et leur intensité.

Objectif 2 : Réévaluation du lien entre les opérations à Vendenheim et l'activité sismique survenue depuis novembre 2019 dans le secteur de La Robertsau

Il s'agit de réévaluer les liens de causalité possibles entre les opérations dans les puits sur le site GEOVEN et le déclenchement de l'activité sismique observée depuis novembre 2019 environ 5 km au sud-est du site GEOVEN.

Objectif 3 : Identification d'éventuels indices d'alerte

Il s'agit d'évaluer et identifier l'occurrence éventuelle de variations significatives dans les données opérationnelles et sismiques (pression, température, volumes injectés et produits, sismicité, etc.) qui auraient pu alerter sur la survenue d'événements sismiques ressentis en surface.

Objectif 4 : Analyse de l'état post-opération du réservoir

Il s'agit ici d'apporter un avis technique sur l'état actuel, l'évolution des conditions au droit des deux puits de Vendenheim jusqu'à la zone de la Robertsau et l'aléa sismique associé.

Objectif 5 : REX de Vendenheim pour les sites géothermiques voisins

Pour ce dernier objectif, il s'agit de bénéficier de l'expérience acquise sur Vendenheim pour tirer des recommandations générales ou des pistes de réflexion pour la prise en compte de la sismicité dans le développement de projets de géothermie profonde sur le territoire de l'Eurométropole de Strasbourg (EMS).

Dans son offre technique, datée du 12 avril 2021, le CE détaille les modalités de traitement des objectifs susmentionnés et indique qu'un travail préalable au traitement de ces objectifs est nécessaire afin de disposer d'une vue d'ensemble sur les données disponibles et leur validité, ainsi que de mieux appréhender les différentes opérations menées par FG sur le site GEOVEN. Ce travail constitue l'objectif 0 de la mission du CE :

Objectif 0 : Travail préalable - Consolidation et validation des données existantes

Il s'agit de faire un inventaire et d'évaluer les données mises à disposition par FG pour l'expertise du site de Vendenheim. Ce travail préalable doit permettre d'établir un état des connaissances le plus précis possible, rassembler les informations dans un format homogène et apporter des précisions sur le mode de validation des données et des modes opératoires mis en œuvre.

Il est à noter que la mission du comité d'expertise ne porte pas sur l'analyse des dégâts causés par les séismes induits et les procédures d'indemnisation associées.

1.3. Modalités de travail du CE

1.3.1. Les deux phases de la mission

Pour répondre aux questions (ou objectifs) posées par la DREAL Grand Est, deux phases de travail successives ont été initialement définies :

Phase 1

Elle concerne l'avis du CE sur les objectifs de 0 à 5. Cet avis est formulé uniquement sur la base des données et documents mis à disposition par FG, c'est-à-dire sans que le CE ait réalisé ses propres analyses à partir des données brutes. En effet, le but de cette première phase est de donner un éclairage sur l'ensemble des 6 objectifs à partir d'une revue des approches de dimensionnement et d'exécution des opérations, des données collectées et des analyses menées par FG.

Les modalités de traitement de la phase 1, dont les résultats constituent l'objet du présent rapport, sont détaillées dans la section suivante.

Par ailleurs, cet avis préliminaire peut nécessiter des investigations plus importantes pour apporter une réponse plus précise aux questions initialement posées. Le CE détaille les analyses qui pourraient être faites et les moyens nécessaires pour y répondre. Ces éléments pourront servir de support pour le choix des actions à mener en priorité en phase 2.

Phase 2

Il s'agit de travaux à moyen / long terme qui concernent la réalisation d'études scientifiques détaillées sur la base de la rétro-analyse des données brutes de FG réalisée par le CE ou des groupes dédiés identifiés par le CE. Le but de cette phase 2 est de traiter les aspects attachés aux objectifs de la mission pour lesquels la phase 1 n'aura pas permis de cerner complètement les questions soulevées. Au moment de la sortie du présent rapport, la phase 2 de la mission est pour l'instant suspendue et probablement à rediscuter dans un nouveau cadre qui reste à définir.

1.3.2. Modalités de traitement de la phase 1 de la mission

Le CE a choisi de construire la phase 1 sur une série de quatre journées d'audition de FG (voir Tableau 1) afin de constituer un corpus d'informations complémentaires aux documents écrits déjà fournis par FG. Il s'agissait de recueillir un nouvel éclairage des travaux menés par FG et d'organiser un échange d'information le plus direct possible entre FG et le CE pour faciliter l'exposé des faits ainsi que leur mise en contexte et en perspective. Ces échanges au cours desquels tous les objectifs de la mission ont été abordés (voir Tableau 1), sont sous la forme de questions et de réponses. L'enregistrement des échanges a donné lieu à des retranscriptions accessibles, aux seuls membres du CE, sur le site e.cenaris (Ineris).

Le travail lors de cette première phase a porté sur la constitution de ce corpus et son analyse par le CE. Il ne s'agit pas d'une contre-analyse construite sur une réinterprétation indépendante des données brutes de FG par le CE.

Chaque journée d'audition de FG a nécessité à la fois une journée de préparation des questions par le CE, selon la lettre de mission et les objectifs de la mission tels que discutés aux sections précédentes, ainsi qu'une journée de débriefing. Trois réunions de travail en fin de phase 1 ont été organisées pour préparer et finaliser le présent rapport.

Réunions FG/CE	Date	Durée	Objectifs abordés
1	04/05/2021	8h	0, 1
2	09/06/2021	7h	0,1,2,3
3	23/06/2021	6h30	0,3,4,5
4	02/07/2021	3h	0,4,5

Tableau 1 : Détail des quatre journées d'audition de FG par le CE. Au total, ces auditions représentent 24h30 d'enregistrement.

Dans ce présent rapport, nous synthétisons ou citons (principaux extraits) les explications et arguments de FG ; puis pour chaque objectif, l'avis du CE au stade actuel de l'étude (phase 1) est donné.

1.4. Vue d'ensemble sur le déroulé du projet de Vendenheim

Avant de développer les réponses de FG et l'avis du CE articulés autour des 5 objectifs, il est utile de rappeler le déroulé du projet géothermique de FG, ainsi que le développement des crises sismiques majeures. La Figure 1 propose une vue synthétique des principales opérations avec une mise en parallèle des données collectées par FG lors de cette étude (voir annexe).

Une discussion détaillée sur les données est proposée en section 2. Nous nous contenterons donc ici de résumer le déroulé du projet.

1.4.1. Les objectifs initiaux et les travaux réalisés avant la demande de permis

FG réalise en 2015 une campagne de géophysique 2D à large échelle, allant du nord de Vendenheim jusqu'au sud de Strasbourg et comprenant les deux limites Est-Ouest du PER (du haut du Rhin à l'est et, jusqu'au pied des Vosges, à l'ouest). Les résultats de cette campagne, avec la réalisation d'environ une dizaine de lignes NS et EW, ont été couplés à la rétro-analyse des données historiques issues des lignes sismiques réalisées dans les années 80 avec les données des puits pétroliers présents dans le secteur, ainsi que du puits Cronembourg (puits géothermique). Sur la base de données collectées en 2015 et de la rétro-analyse des données historiques, FG a calé un premier modèle de réservoir et défini la cible des opérations géothermiques. Sur trois cibles potentielles, la zone de Vendenheim a été identifiée par FG comme la meilleure.

Avant l'étape de réalisation des forages, initialement, l'objectif de FG était de trouver une ressource à plus de 185°C, pour un débit entre 350 et 450 m³/h, un indice de productivité de 2,5 l/s/bar et un gradient espéré continu de l'ordre de 40 à 43°C/km.

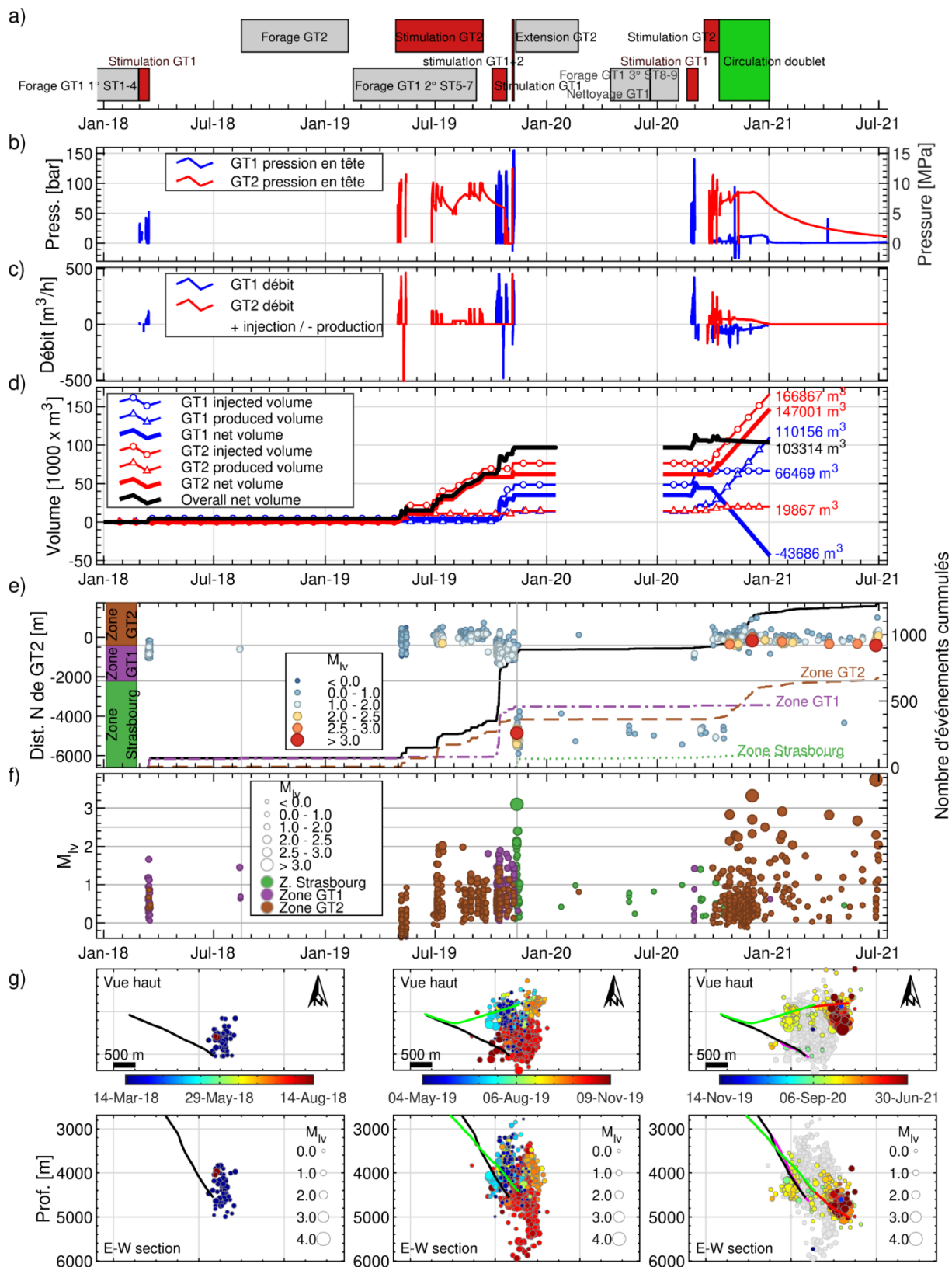


Figure 1 : Présentation générale des opérations et des données du site géothermique de Vendenheim. a) opérations principales avec en gris les phases de forage, en rouge les phases de stimulation et en vert la phase de circulation. b) Données de pression en tête des puits en bar sur l'échelle de gauche et en MPa sur l'échelle de droite. c) Données des débits injection (positif) ou produit (négatif). d) Volumes injectés, produits et volumes nets pour GT1 et GT2. A noter que dans les panneaux b, c et d l'absence de la courbe indique de périodes où les données sont manquantes. e) Catalogue sismique de FG présenté dans le temps et selon la latitude relative. Trois zones sont définies : la zone GT2 (brun), GT1 (violet) et

Strasbourg (vert). Les tailles et couleurs des symboles indiquent la magnitude M_{lv} (Magnitude locale calculée sur la composante verticale de l'enregistrement du séisme). f) Mêmes données sismiques présentées en temps et magnitude M_{lv} . La taille des symboles indique la magnitude M_{lv} et la couleur la zone de latitude. Les courbes du nombre d'événements cumulés par zone et pour tout le catalogue sont également représentées. g) Projections en plan et en coupe E-W des localisations des séismes pour trois périodes de temps successives (indiquées par les lignes grises verticales en e et f). La taille des symboles représente la magnitude et la couleur le temps. Les symboles en gris représentent la sismicité passée. Les trajectoires des puits GT1 (noir et bleu pour la jambe ST7) et GT2 (vert et rouge pour l'extension de 2020) sont également présentées en projection sur ces figures.

1.4.2. Synthèse sur les opérations

Les activités de forage sur le site de Vendenheim ont débuté en juin 2017 avec la foration du puits VDH-GT1 (voir **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Le forage VDH-GT1 est orienté vers l'ESE avec une déviation par rapport à la verticale de l'ordre de 40°. Les forages ont rencontré un certain nombre de difficultés et de nombreux "side tracks" (ST) ont dû être réalisés. Ainsi, dans cette première phase de foration, en 2017, 4 side tracks ont été nécessaires pour atteindre la longueur visée de 5 408 m soit une profondeur de 4516 m depuis la surface (d'après les informations de FG, document FG_DT_A04-10). Puis, pour des raisons de perte d'outils de logging dans le puits en 2018 et de colmatage en 2020, des jambes parallèles au puits ont dû être à nouveau forées en 2019 (ST7, longueur totale forée atteignant 5285 m) et en 2020 (ST9 atteignant 5447 m, pour une profondeur finale de 4644 m par rapport à la surface topographique). Ces side tracks sont considérés par FG comme étant hydrauliquement connectés au réservoir initialement développé autour de VDH-GT1-ST4 (Figure 1a).

Le forage VDH-GT2 (situé au nord du forage VDH-GT1) a fait l'objet de deux périodes de foration. Une première en 2018-19 durant laquelle le forage dévié vers l'ENE a atteint une longueur de 5308 m. Puis, une seconde période, avec une prolongation jusqu'à une longueur forée de 6312 m en 2019-20, soit une profondeur de 5011 m par rapport à la surface du sol.

Les opérations de forage ont été systématiquement suivies par des protocoles de développement chimique puis de stimulation hydraulique voire thermique (voir Tableau 3 et Figure 1a). Les opérations de stimulations réalisées sur chacun des deux puits ne sont pas synchrones.

Date début	Date fin	Puits	Side Tracks (ST)	Jambes	Longueur [m MD]	Profondeur [m TVD]	Objectif et résultats attendus	Résultats obtenus
14/06/2017	10/10/2017	VDH-GT1	ST1, ST2, ST3, ST4	1ère jambe	ST4 - 5408	ST4 - 4650	Faille F1B, côte: 4926 mMD	Faille F1B, côte: 5140 mMD
25/10/2017	27/02/2018	VDH-GT1						
16/08/2018	01/12/2018	VDH-GT2	ST1, ST2	-	ST2 - 5308	ST2 - 4417	Failles F1B et F1C, côtes: 5164 mMD et 5986 mMD	Failles F1B et F1C, côtes: 5150 mMD et 5840 mMD
15/12/2019	05/02/2019	VDH-GT2						
16/02/2019	07/09/2019	VDH-GT1 (1 ^{er})	ST5, ST6, ST7	2ème jambe	ST7 - 5285	ST7 - 4556	Faille F1B, côte: 5152 mMD	Faille F1B, côte: 5120 mMD
11/11/2019	22/02/2020	VDH-GT2 (ext)	ST3	-	ST3 - 6312	ST3 - 5011	Faille F1B, côte: 5986 mMD	Faille F1B, côte: 5840 mMD
20/06/2020	05/08/2020	VDH-GT1 (2 ^e)	ST8, ST9	3ème jambe	ST9 - 5447	ST9 - 4644	Faille F1B, côte: 5125 mMD	Faille F1B, côte: 5140 mMD

Tableau 2 : Liste synthétique des opérations de forage construite sur la base des informations fournies par Fonroche Géothermie dans le fichier FG_DT_I01_2021-04-28.xlsx. À noter que la numérotation des jambes de GT1 diffère ici de celle communément utilisée par FG. Nous nommons ici VDH GT1 1ère jambe la foration initiale (ST1 à ST4), 2ème jambe la foration de 2019 (ST5 à ST7) et 3ème jambe la foration de 2020 (ST8 et ST9). Fonroche ne numérote pas la foration initiale et nomme 1ère jambe la foration de 2019 et 2ème jambe la foration de 2020. A noter que les failles F1B et F1C ciblées par GT2 sont indiquées respectivement comme première et deuxième faille dans la suite du texte. Les profondeurs des puits sont données en mètres depuis la tête de puits : MD (Mesured Depth from rotary table) sur la base des informations reportées dans les fichiers FG_DT_A06-4, FG_NT_F04-10_2021-10-01, FG_NT_F04-11_2021-10-01 et FG_NT_F04-12_2021-10-01.

Les premières stimulations sur GT1 ont eu lieu en février et mars 2018. La pression maximale en tête de puits lors de ces opérations a atteint 51 bar pour des débits de 120 m³/h et a généré une sismicité en proximité de la base du puits (zone de Vendenheim/Wantzenau) avec une magnitude locale maximale atteinte de Mlv 1,7.

Date début	Date fin	Activité	Remarque	Puits	Side-Tracks (ST)
28/02/2018	17/03/2018	essais sur puits	stimulation chimique/hydraulique	VDH-GT1	GT1-ST4
27/04/2019	16/05/2019	essais sur puits	stimulation chimique/hydraulique	VDH-GT2	GT2-ST2
25/06/2019	12/07/2019	essais sur puits	stimulation thermique		
29/07/2019	18/09/2019	essais sur puits	stimulation thermique		
03/10/2019	27/10/2019	essais sur puits	stimulation chimique/hydraulique	VDH-GT1 (1 ^{er})	GT1-ST7
05/11/2019	07/11/2019	essais sur puits	stimulation chimique/hydraulique	VDH-GT2	GT2-ST2
05/11/2019	08/11/2019	essais sur puits	stimulation chimique/hydraulique	VDH-GT1 (1 ^{er})	GT1-ST7
15/04/2020	19/06/2020	nettoyage GT1	VDH-GT1 colmaté, nettoyage		
19/08/2020	06/09/2020	essais sur puits	nettoyage chimique/hydraulique	VDH-GT1	GT1-ST9
16/09/2020	11/10/2020	essais sur puits	nettoyage chimique/hydraulique	VDH-GT2 (ext)	GT2-ST3
11/10/2020	02/01/2021	essais sur puits	fonctionnement doublet	VDH-GT1 et VDH-GT2 (ext)	GT1-ST9 et GT2-ST3
02/01/2021	aujourd'hui	observation du doublet	doublet à l'arrêt de circulation		

Tableau 3 : Liste des tests réalisés sur les puits, synthétisée sur la base des informations fournies par Fonroche Géothermie dans le fichier FG_DT_I01_2021-04-28.

Période	Puits	Volume produit (m ³)	Volume injecté(m ³)	Volume net (m ³)
2018	GT1	470	4 771	4 301
2019	GT2	14 490	76 364	61 874
2019	GT1	13 101	43 759	30 658
2020 (mono-puits)	GT1	8 769	17 940	9 171
2020 (en doublet)	GT2	5 377	90 503	85 126
2020 (en doublet)	GT1	90 366	-	90 366
2018-2020	GT1	112 706	66 470	46 236
2018-2020	GT2	19 867	166 867	147 000
2018-2020	GT1+GT2	132 573	233 337	100 764

Tableau 4 : Bilan des volumes injectés et produits dans les puits GT1 et GT2 selon les périodes du projet. Les données sont extraites de fichier 'FG_DT_I02e_2021-08-06.xlsx' après correction d'une erreur sur les volumes cumulés sur GT1 pour la période 2018-2020.

D'avril à septembre 2019, le puits GT2 a été stimulé. En plus des stimulations chimiques et hydrauliques, une stimulation thermique par injection avec un débit plus faible (atteignant 120 m³/h) sur une plus longue durée a également été tentée sur ce puits entre juin et septembre 2019. Lors des stimulations hydrauliques et chimiques dans GT2, la pression en tête de puits a atteint 114 bars pour un débit maximum de 460 m³/h. Des pressions en tête de puits de 100 bars ont été atteintes lors des stimulations thermiques. Un volume net atteignant 58 430 m³ a été injecté dans GT2 lors de ces opérations. Des microséismes de magnitude 2,0 ont été enregistrés à proximité du puits GT2 lors des stimulations thermiques.

En octobre 2019, la deuxième jambe de GT1 nouvellement forée a été stimulée hydrauliquement et chimiquement. Les pressions en tête de puits lors de ces opérations atteignent 120 bars pour des débits maximaux de 450 m³/h. Une sismicité avec des magnitudes jusqu'à Mlv 2,0 se développe lors de ces opérations en-dessous et au nord de la base du puits GT1.

En novembre 2019, des opérations de stimulation chimique et hydraulique ont lieu successivement sur GT2 puis GT1. Des injections avec des débits atteignant 450 m³/h et des pressions de tête de 125 bars sont initiées d'abord dans GT2 (entre le 5 et 7 novembre). Cela est suivi immédiatement (entre le 7 et 8 novembre) par des injections dans GT1 avec des débits de 390 m³/h pour des pressions en tête de puits jusqu'à 155 bars. Simultanément aux injections, des séismes sont enregistrés entre les puits et au-dessous de ceux-ci, avec des magnitudes restant en dessous de 2,0 Mlv. Les injections se terminent le 8 novembre.

Dès le 7 novembre 2019, une faible sismicité s'active à environ 5 km au sud des puits (zone de la Strasbourg/Robertsau) suivi d'une crise sismique importante le 12 novembre avec un événement de magnitude 3,1 et plusieurs dizaines de répliques dans les semaines qui ont suivi.

L'année 2020 a vu l'extension du puits GT2 de 1004 m de longueur forée pour un approfondissement de 451 m et la foration de la 3^e jambe de GT1. Ces opérations de forage ont été suivies par des stimulations. En août 2020, GT1 a été stimulé avec des débits de 420 m³/h et des pressions en tête de puits jusqu'à 140 bars. Une faible sismicité autour des puits est enregistrée lors de ces stimulations (zone de Vendenheim/Wantzenau). La plupart des événements ont eu lieu dans la zone de Strasbourg/ Robertsau, distante des forages de 5 km environ. En septembre et octobre 2020, GT2 a été stimulé avec des débits atteignant 285 m³/h et des pressions en tête de puits de 115 bars.

Dès le 11 octobre 2020, une circulation en doublet est initiée avec GT2 comme injecteur et GT1 comme producteur. Des débits de production et d'injection balancés de l'ordre de 45 m³/h sont typiquement utilisés, avec quelques paliers de débit d'injection plus importants, atteignant temporairement 120 m³/h. Les pressions d'injection en tête du puits GT2 lors de ces opérations sont de l'ordre de 75 à 85 bars. Lors de ces opérations de circulation, une sismicité persistante se développe à proximité de l'extension du puits GT2. Cette sismicité se développe avec un événement de magnitude 2,8 Mlv le 28 octobre, et 3,6 Mlv le 4 décembre 2020. Suite à ces événements, le débit de circulation du doublet est réduit progressivement jusqu'à son arrêt complet le 2 janvier 2021. Le volume net injecté dans

GT2 lors des opérations de stimulation et de circulation de 2020 atteint un total de 85 126 m³ (voir Tableau 4 Ce volume net important par rapport aux volumes classiquement utilisés lors des stimulations EGS (~10 000 m³) ou au volume du bassin en surface (~6 000 m³) traduit une utilisation massive de l'eau du captage de la nappe réalisée à Reichstett. Une pression en tête du puits GT2 de 64 bars est encore observable à la fin de la circulation le 2 janvier 2021. Cette pression décroît alors lentement et engendre de nouveaux séismes dans le courant 2021, notamment un séisme de magnitude M_lv 3,9 le 26 juin 2021 alors que la pression en tête du puits GT2 a baissé jusqu'à environ 13 bars.

2. Objectif N°0 - Consolidation et validation des données existantes

Le CE a consacré un temps important lors des interviews avec FG à discuter des données disponibles, leur signification, leur validation et leur archivage. Ces données sont en effet cruciales pour permettre une compréhension des processus prenant place lors du développement du projet géothermique de Vendenheim. Sans avoir la capacité lors de cette première phase de traiter indépendamment et systématiquement ces données, il a paru primordial pour le comité de faire un effort particulier pour inventorier, décrire, vérifier autant que possible, et archiver les données disponibles. Un tel travail est une étape incontournable à l'expertise à la fois de la première et de la deuxième phase.

Les discussions sur les données étaient initialement prévues pour se tenir seulement lors de la première journée d'interview. Elles se sont finalement prolongées et certains aspects concernant ces données ont été abordés à chaque échange avec FG. Le temps qui a donc été consacré à cet objectif 0 est considéré comme précieux, car il a permis de mieux comprendre le contenu et la qualité des informations communiquées par FG, et d'en tirer une représentation consolidée des données (activités, mesures de pression, volume des fluides, sismicité) depuis janvier 2018 à juillet 2021 (cf Figure 1). En outre un accès facilité aux données sera essentiel pour le bon déroulement des analyses complémentaires ultérieures (phase 2 du projet).

Les types de données évoqués lors des échanges avec FG sont les suivants :

- historique et géométrie des puits, coupes techniques des puits (position des casings), trajectométrie, side-tracks et cimentations,
- diagraphies menées dans les puits,
- mesures de pression et de débit, en surface et en fond de puits (pression en tête de puits, pression au niveau des casing shoes),
- estimations des sur-pressions dans le réservoir et des volumes d'injection et de production, ainsi que des volumes cumulés,
- catalogues de séismes et mécanismes au foyer des plus gros événements sismiques,
- synthèse des données de contraintes existantes au plus proche de la zone d'étude, et rapports d'analyse géomécanique,
- logs de production (PTS),
- rapports de forage avec en particulier les analyses de boue de forage,
- modèles géologiques et hydrogéologiques (versions 0 à n+1).

Les discussions ont concerné l'identification, l'accessibilité et la validation de ces données ainsi que l'identification d'éventuelles données manquantes.

Des travaux d'archivage systématique et de construction des métadonnées n'ont pas été initiés dans cette phase du projet. Mais, cela reste indispensable car la structuration des documents et données fournies par FG est apparue insuffisante au CE pour deux raisons essentielles : 1) garantir leur préservation, et 2) faciliter l'accessibilité et l'utilisation par notamment une mise au standard FAIR (findable, accessible, interoperable, reusable).

2.1. Point général sur les données

2.1.1. Description et modalités d'archivage des données et documents

Le nombre de documents et de données produits par FG est important : au total, environ 180 fichiers comprenant des notes, des rapports et des données ont été mis à la disposition du CE par FG. La liste complète est reportée en Annexe.

Le partage de ces documents s'est fait au travers d'un espace numérique partagé, via Google Drive, dans un premier temps, puis sur une plateforme Sharepoint. Les données et documents partagés avec le CE sont de nature diverse et variée, et concernent notamment : les connaissances géologiques, hydrogéologiques et mécaniques du réservoir de Vendenheim, sur la base des analyses et interprétations de FG, les protocoles de tests hydrauliques réalisés dans les puits avec les données opérationnelles mesurées au cours des opérations, ainsi que les analyses des données sismiques, incluant les magnitudes, les localisations ainsi que les mécanismes au foyer des événements enregistrés.

Dans un souci de transparence, afin d'avoir une prise en main directe de l'archivage de ces documents et pour mieux suivre leur mise à jour ainsi que l'ajout régulier de nouveaux fichiers, le CE a mis en place un espace d'archivage et un système de référencement des différents documents avec des identifiants spécifiques sur la plateforme sécurisée Pydio via le site e.cenaris de l'Ineris. Dans un souci de confidentialité des documents partagés (voir section suivante), cette page est accessible uniquement par les membres du CE via des comptes et mots de passe personnels. La liste des données disponibles en Annexe reporte les identifiants de chaque fichier tels qu'utilisés dans e.cenaris, avec le nom correspondant utilisé par FG lorsque celui-ci est disponible.

2.1.2. Modalités d'utilisation des données et documents

Afin d'avoir accès aux documents mis à disposition par FG, chaque membre du CE a signé un protocole d'utilisation des données avec FG. Ce protocole classe les documents en deux catégories : (i) les données E, à savoir les données considérées par FG comme conférant un avantage concurrentiel et/ou économique et (ii) les autres données, à savoir toutes les données non classées dans la catégorie E. Le protocole d'utilisation stipule que les données classées E doivent rester strictement confidentielles, elles ne peuvent pas être divulguées à des tiers externes au CE et ne peuvent en aucun cas être utilisées en dehors de la mission du CE. Ces restrictions ne s'appliquent pas aux autres données qui ne sont pas classées E. Cet accord, signé en juin 2021 par les membres du CE, a une validité de 10 ans. L'accord stipule également que ce classement des données en deux catégories peut évoluer au cours du temps en concertation avec la DREAL et son ministère de rattachement, l'accord ne se substituant pas au code minier et à la réglementation en matière d'accès aux données publiques.

A la date de rédaction du présent rapport, sur plus de 180 documents mis à la disposition du CE par FG, seuls 12 ne sont pas classés E (c'est-à-dire accessibles par des tiers externes au CE). Il s'agit notamment des informations concernant les trajectoires des puits de Vendenheim, des emplacements des capteurs sismiques, une image représentant l'interprétation des horizons lithologiques traversés par GT1, une note décrivant les scénarios de circulations hydrogéologiques dans le réservoir de Vendenheim, ainsi que les pseudo-catalogues des événements sismiques enregistrés entre 2018 et fin juin 2021, avec les indications de date et heure, magnitude estimée et du PGV correspondant mais pas les localisations dans l'espace.

Pour ce qui concerne les données hydrauliques, à ce jour, seulement les données (surpression réservoir, débit d'injection et production, température d'injection et de production) des opérations d'août 2020 pour GT1 et celles de septembre 2020 à avril 2021

pour GT1 et GT2 sont utilisables sans restriction (données non classées E), celles-ci ayant été rendues publiques préalablement au démarrage de la mission du CE.

En complément des données classées E, FG a mis à disposition du CE des données uniquement visualisables sur écran, non téléchargeables, ni diffusables ; celles-ci sont couvertes par une confidentialité allant au-delà des 10 ans prévus dans l'accord d'utilisation des données. Ces documents concernent plus particulièrement les évolutions des modèles géologiques et hydrogéologiques, les profils sismiques et leur interprétation, l'analyse minéralogique des échantillons de cuttings et l'interprétation des modèles géomécaniques.

2.1.3. Avis du CE sur les données

Avant d'aborder les spécificités de chaque type de données, il est pertinent de faire un certain nombre de commentaires généraux sur les données disponibles et transmises par FG au CE. Notons tout d'abord qu'il a été difficile pour le CE de "rentrer" dans les données et d'en comprendre les détails. Ceci a nécessité beaucoup plus de temps et d'interactions avec FG qu'initialement escompté. Ceci s'explique par les raisons suivantes :

- **Problème d'archivage et de structuration des données** : il n'y a pas en l'état une base de données structurée et incluant les métadonnées nécessaires pour accéder et naviguer dans les données disponibles. Il n'y a pas non plus de système de référencement systématique pour identifier les documents de manière unique et pour tracer les différentes versions d'un même document.
- **Données dérivées vs données brutes** : dans un premier temps, il a été partagé essentiellement des données dérivées, c'est-à-dire des données découlant de traitement, d'analyse et de calcul réalisés par FG. Il ne s'agissait donc pas de données directement issues des appareils de mesure. En complément, il manquait également les informations (notes techniques ou rapports) sur les modalités d'acquisition des données mesurées ainsi que sur les procédures de traitement pour générer les données dérivées. Dans ces conditions, il était difficile pour le CE d'analyser les données fournies dans l'état. Pour certains types de données, en particulier les mesures de pression, de nombreux échanges ont été nécessaires pour comprendre les données fournies et in fine remonter aux données brutes.
- **Absence de documents de synthèse** : il n'y a pas de rapports de synthèse fixant l'état des données disponibles à des moments clés du projet. S'il est normal que les données d'un projet évoluent dans le temps (e.g. validation, amélioration de facteurs de calibration...), il est nécessaire qu'après une certaine maturation, du temps soit investi pour fixer et consigner les modalités d'acquisition, de validation et de documentation (métadonnées) des données. Ce temps a manifestement manqué aux opérateurs du projet géothermique.

Nous notons aussi les aspects généraux suivants concernant les données :

- Nous n'avons pas connaissance de documents détaillant la **stratégie d'acquisition** des données, c'est-à-dire de descriptions des objectifs d'acquisition (types, précisions...) et de **protocoles argumentés d'acquisition des données** mis en place pour atteindre ces objectifs.
- Nous n'avons pas connaissance de documentation établissant des **protocoles d'assurance et contrôle qualité** sur les données (QA/QC).
- Les données sur le site géothermique de Vendenheim ont **souvent été acquises de manière discontinue**, c'est-à-dire seulement lorsque des activités de stimulation étaient en cours sur le site. Il est regrettable que des paramètres fondamentaux tels

que la pression en tête de puits n'aient pas été enregistrés de manière continue sur l'ensemble de la durée du projet.

- Nous constatons l'**absence de mesures importantes** en forage telles que des informations permettant d'imager les structures des horizons ciblés et d'estimer les contraintes. Nous reconnaissons néanmoins que l'acquisition de ces données constitue un **défi important dans le contexte de haute température et grande profondeur** des projets de géothermie profonde.
- Nous constatons que malgré les limites identifiées, FG a collecté une **quantité considérable de données** et qu'il y a certainement matière à alimenter des analyses approfondies (notamment dans la perspective de la phase 2 de l'expertise). Néanmoins cela nécessiterait au préalable un travail conséquent sur la validation des données.

Enfin, nous observons que l'essentiel des données mise à disposition du CE par FG est actuellement considéré comme confidentiel. **Dans un besoin de transparence et afin de développer l'analyse scientifique pour favoriser le REX, il nous paraît urgent de rendre plus largement accessible certaines données.** Cela permettrait non seulement de rendre publics les résultats du présent rapport, mais aussi d'élargir le débat et l'analyse au sein de la communauté scientifique. Dans cet objectif, nous recommandons qu'à minima les données suivantes soient rendues publiques :

- les données hydrauliques utilisées pour réaliser la figure 1, sur la base du fichier FG_DT_I02d_2021-07-02 mis à disposition par FG ;
- les formes d'onde enregistrées par les réseaux permanent et temporaire de FG depuis le début des opérations.
- les catalogues sismiques consolidés et complets (temps, position, magnitudes et autres paramètres sismiques)
- les données de puits (paramètres de forations, description des cuttings, rapports géologiques , diagraphies)
- et si possible :
- les profils sismiques (non interprétés) et autres données ayant permis de construire le modèle géologique ;
- les différents modèles géologiques, géomécaniques et hydrogéologiques produits par FG et ses consultants.

Plus largement, nous soulignons que cette ouverture des données relatives aux projets de géothermie profonde nous paraît importante dans la mesure où des travaux menés sur ces données par des équipes scientifiques devrait grandement contribuer à mieux comprendre et gérer les risques sismiques pouvant être induits par ce type de projet.

2.2. Points spécifiques sur les données

2.2.1. Mesures hydrauliques (pressions, débits, températures, volumes)

Un effort considérable a été nécessaire pour reconstituer la collection des données hydrauliques du projet de géothermie. Dans leur état initial, les données communiquées souffraient des limitations suivantes :

- Les données hydrauliques étaient fragmentées dans des fichiers Excel hétérogènes (pas d'unité de format) et découpées par opération. Le CE a également constaté qu'il n'y avait pas de données hydrauliques disponibles en dehors des périodes

d'opérations à l'exception de la période suivant le shut-in de 2021 lors duquel la pression en tête des puits a été mesurée en continu sur plusieurs mois.

- Initialement, les seules données de pression présentées étaient des données dérivées de "calcul de surpression réservoir". Le dispositif de mesure et de traitement de ces données n'était pas transparent.

Suite aux échanges avec le CE, FG a reconstitué un fichier de mesure des paramètres hydrauliques (FG_DT_I02e_2021-08-06.xlsx). Ce fichier contient une feuille de données pour chacun des deux forages GT1 et GT2 dans lesquelles les données collectées sont reportées de manière uniforme. Les données de pression mesurée en surface sont disponibles dans ce fichier. Ces mesures ont été acquises sur trois points spécifiques liés à la configuration du puits (points P2, P3 ou P6, voir document FG_NT_F05-8_2021-06.pdf). A l'exception, de quelques courts épisodes lors desquels des mesures de la pression en profondeur ont été acquises, ces données constituent les seules mesures directes de la pression sur le site de Vendenheim.

Les informations dérivées de surpression réservoir communiquées initialement par FG sont également reportées dans ces tableaux avec les différents éléments qui en permettent le calcul. Ceux-ci incluent les calculs de perte de charges, les estimations de densité et de viscosité (dépendant de la température) ainsi que les hypothèses de pression naturelle dans le réservoir. C'est en combinant ces informations que la surpression réservoir est calculée par FG (tel que décrit dans le document FG_NT_G01-2_2020-11-04.pdf).

Or, il convient de noter que ces valeurs de surpression dans le réservoir dépendent fortement des hypothèses et des modèles utilisés pour leur calcul. Les densités et les viscosités dépendent de la température sur l'ensemble de la colonne du puits. De plus il s'agit d'un paramètre dynamique pour lequel il n'y a pas de mesure directe (seule la température de surface est mesurée). La valeur de la pression naturelle du réservoir a également été débattue. Elle est difficile à estimer avec confiance, car il faudrait pour cela des données continues de pression en surface et en profondeur lors des périodes sans opération sur les puits (périodes de rééquilibrage). Ces données n'ont pas été collectées, à l'exception de la période d'équilibrage en cours, consécutive au shut-in de 2021. Autrement dit il manque des données de pression en fond de puits pour obtenir la réelle valeur de la pression au niveau du réservoir. De plus, il semble que lors de la réalisation des quelques mesures en fond de puits, les mesures en surface n'ont pas pu être obtenues ce qui rend particulièrement difficile la calibration de l'estimation de la surpression réservoir proposée par FG.

Nous reconnaissons que les valeurs de pression en fond de puits (i.e. « surpression réservoir »), et leur gradient avec les pressions au sein du réservoir sont pertinentes pour étudier les processus hydraulique et hydromécanique activés dans le réservoir. Néanmoins, au vu des incertitudes concernant l'estimation de ces surpressions dans le réservoir et de par le fait qu'une analyse approfondie des données disponibles n'a pas été possible dans le cadre de la phase 1 de cette étude, nous nous référons de manière générale aux mesures de pression lues en tête des puits car il s'agit ici d'une mesure directe indiscutable. Nous reportons donc ces valeurs sur la Figure 1b qui décrit l'historique complet des pressions mesurées sur le site de Vendenheim et mises à notre disposition. A noter également que ce sont les valeurs en tête de puits qui sont soumises à réglementation (cf arrêté préfectoral du 24 mars 2016, Article 9 - Déroulement des travaux : "Les pressions d'injection ou de réinjection seront limitées à 100 bars en tête de puits. Un dispositif manométrique sera mis en place afin de contrôler et d'enregistrer cette donnée.").

Les mesures de débit sont également renseignées dans les tableaux mis à notre disposition. Les débits d'injection sont estimés en comptant les coups de pompes (pompes à piston, chaque coup correspondant à un volume connu) et les débits produits en utilisant un système de déversoir en V. Il n'y a pas d'indication d'assurance qualité et contrôle qualité (QA/QC) ni de calibration répétée sur ces mesures. Néanmoins, ces dispositifs de mesure sont standards et, il n'y a pas d'indication de problèmes majeurs sur ces données.

Les volumes injectés, produits et nets sont fournis dans le même fichier Excel (F10f. Synthèse_hydrau_chronogramme_confidentiel.xlsx). Ces résultats ne sont pas entièrement satisfaisants dans la mesure où les volumes indiqués sont le résultat de calculs (intégration des débits) ou de relevés des niveaux dans les bassins. Idéalement, les deux jeux de données devraient être disponibles et croisés pour vérification. Les bilans de volume dans les bassins devraient aussi inclure les sources et pertes externes. Comme pertes, il s'agit essentiellement d'une estimation de l'évaporation. Comme source, il faut comptabiliser la pluviométrie, mais surtout les quantités d'eau amenées pour réaliser les tests. Dans le cas de Vendenheim, il s'agit des eaux récupérées du système de drainage assurant le rabattement de la nappe de Reichstett (i.e. pompage de confinement (1300 m³/h). Ces données de bilan ne sont pas consignées dans les documents fournis par FG.

2.2.2. Mesures des indices d'injectivité et de productivité IP

L'index "d'injectivité" est le rapport du débit injecté sur la surpression requise pour cette injection, il est par conséquent une information déterminante par exemple pour le dimensionnement des futurs moyens de ré-injection. L'index de productivité IP s'obtient en rapportant le débit de fluide que l'ouvrage peut produire à la différence de pression qu'il faut imposer pour obtenir ce niveau de production. Cet index qualifie le potentiel de production d'un puits et permet d'en évaluer le potentiel économique. Ces index sont des paramètres intégrateurs. L'index IP est fortement lié à la perméabilité du réservoir et à sa connectivité à des zones d'alimentation. De façon générale, l'IP obtenu est d'autant plus fiable qu'il a été obtenu dans des conditions stabilisées.

FG utilise la même dénomination index 'IP', qu'il s'agisse de puits injecteur ou producteur. Cette simplification peut induire de sérieuses ambiguïtés dans la compréhension du fonctionnement car pouvoir injecter dans un système ne signifie pas qu'il ait des capacités à produire. Un réservoir de failles peut tout simplement se déformer pendant une injection. Ainsi l'indice d'injectivité peut être fortement non linéaire. L'IP varie de 0, lorsque rien n'est produit quelle que soit la différence de pression imposée, à des valeurs élevées de plusieurs l/s/bar, lorsque de très faibles baisses de pressions suffisent à maintenir un débit de production constant élevé.

L'objectif des tests hydrauliques successifs effectués par FG est donc de caractériser l'état initial pour chacun des forages, puis d'améliorer cet indice IP jusqu'à atteindre le niveau jugé satisfaisant, fixé à 2,5 l/s/bar (Voir section 1.4.2). FG a donc produit des tables donnant le niveau d'IP atteint après chaque test, soit d'acidification, soit d'injection hydraulique à fort débit, soit d'injection de longue durée de fluide froid (effet thermique). Les index calculés pour évaluer le bénéfice des phases d'acidification se font sur les phases dites de 'pré-flush'. Notons que par extension de langage, l'indice d'injectivité et l'indice de productivité sont souvent présentés sur les mêmes figures, sous l'étiquette 'Evolution IP' alors que la plupart des mesures sont des indices d'injectivité. Notons aussi que dans le cas de l'injectivité, c'est à partir de la "surpression réservoir" évaluée par FG que cet indice est obtenu.

Évaluation de l'IP du forage GT1, successivement jambes 1, 2 et 3, Figure 2 :

L'index IP est évalué par FG dès mars 2018, lors de la première acidification en trois étapes. Chaque étape est précédée d'une phase 'pré-flush' également sous forme d'une succession de paliers à débit d'injection croissant : respectivement de 30 à 40 m³/h, 40 à 70 m³/h, et finalement de 50 à 80 m³/h. Les surpressions nécessaires diminuant de 32 bars à 19 bars, l'IP s'améliore d'un facteur 2, passant d'environ 0.5 l/s/bar à 0.9 l/s/bar [source FG_NT_E03-4_2018-04.pdf]. Ce niveau étant jugé insuffisant par FG, des traitements par stimulation hydraulique sont engagés en 2019, puis 2020. Les résultats illustrés en figure 2 sont reproduits du rapport FG_NT_F05-6_2021-06.pdf.

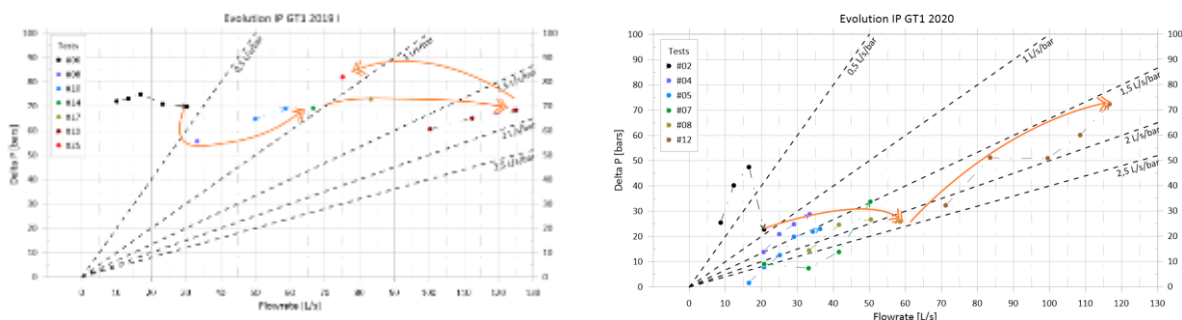


Figure 2 : A gauche : Évolution de l'IP sur GT1-ST7 (2ème jambe) jusqu'au 24 octobre 2019. La séquence #19 correspond à la première stimulation hydraulique à fort débit, la data #25 illustre la seconde stimulation hydraulique et la dégradation du système. Ce graphique ne reporte pas la valeur obtenue en production de la séquence #23, du 19/10/2019 . A droite : Évolution de l'IP en 2020, 3ème jambe. Les séquences #4,#5, #8 illustrent les effets des traitements chimiques et #12 retranscrit le traitement hydraulique à forte injection 'Fault cleaning post acid" . Le résultat IP du test #11 de production artésienne n'est pas reporté.

Le comité remarque qu'un essai lors de la phase de test du 15-18 Octobre 2019 sur GT1, avec mesure par une sonde (Pression, Température) disposée en profondeur, montre que 3 700 l/mn (soit 61 l/s) peuvent être injectés avec un incrément de pression, au fond, de 68 bars. Ce couple pression/débit peut se rapporter à un index IP de 0,9 l/s/bar pour une saumure à 90°C, mais reste inférieur à la valeur proche de 1,5 l/s/bar affichée pour la troisième étape du test de production #23, daté du 19 au 23/10/2019 (FG_DT_F05-14-2b_2021-06.png). L'index IP du forage GT1 est donc au final plus faible que celui espéré. De l'ordre de 1 à 1,5 l/s/bar, il permet à FG d'envisager tout de même sa mise en service.

Évaluation de l'IP de GT2, respectivement en 2019 (ST2) et 2020 (ST3) :

Les diagrammes de la figure 3 ont été transmis par FG pour GT2 (rapport FG_NT_F05-6_2021-06.pdf). Ils reportent les index IP relatifs à des phases d'injection au cours des phases de traitement par acidification, puis des phases d'injection à fort débit, qui se font par paliers successifs de courte durée (quelques heures). La figure 3 (droite) montre les résultats obtenus sur le forage étendu (ST3). Les meilleurs niveaux d'index obtenus en 2020 ne dépassent pas 1 l/s/bar et sont en deçà de la meilleure valeur affichée en 2019.

Selon le comité, les valeurs d'IP affichées pour les forts débits ne reflètent pas des situations hydrauliques suffisamment stabilisées. On note aussi que les observations longues de plusieurs semaines à débit faible (15 600 m³ au total) mais constant (28 m³/h soit 8 l/s) de mai 2019, conduisant à des ratios d'injectivité proches de 0,1 l/s/bar, ne sont pas communiquées pour 2019. Les meilleurs IP de 2019, affichés à 2 l/s/bar pour les séquences #25 et #34 correspondent à des pics des stimulations hydrauliques d'une durée de quelques heures, la seconde stimulation ayant mis en œuvre un volume de 6 860 m³, inférieur au volume impliqué dans la première stimulation (9 080 m³). L'IP de GT2 dérivé de la séquence

de tests de stimulation semble retranscrire davantage un effet transitoire plutôt qu'une propriété de perméabilité de réservoir. Les tests d'évaluation de 2020 restent conformes à ces observations. L'extension ST3 n'améliore pas l'indice d'injectivité car l'IP obtenu dans la gamme 0-100m³/h au cours des diverses phases de nettoyage à l'eau ou d'injection ne dépasse pas la valeur de 0,5 l/s/bar. Pendant la phase dite « en doublet », l'index IP de GT2 serait même de l'ordre de 0,25 l/s/bar. Cette limitation correspond de fait au niveau de surpression dans le réservoir identifié comme générateur d'activité microsismique. L'avis du comité est donc que cet index est insuffisamment caractérisé pour que son niveau final sur ce puits GT2 puisse être validé.

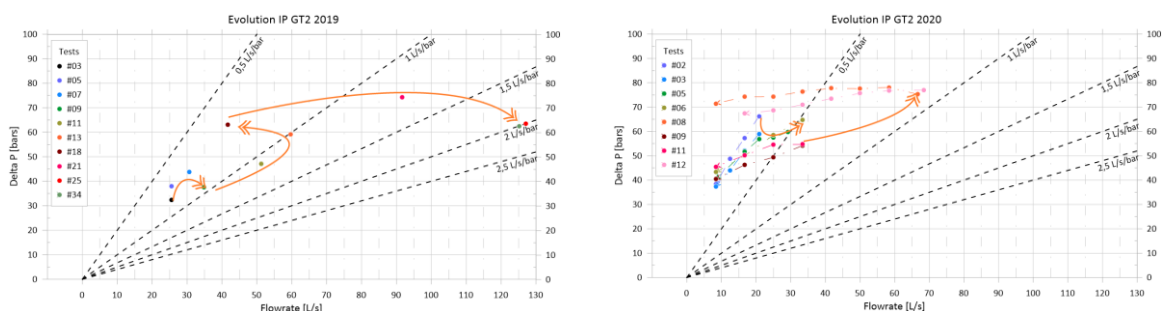


Figure 3 : A gauche Index IP évalué pour le puits GT2 au cours des essais de 2019. A droite : Évolution de l'index sur le puits GT2 étendu, au cours des essais réalisés en 2020.

2.2.3. Estimation de propriétés de réservoir par méthodes analytiques (diagnostic par analyse des dérivées logarithmiques des variations de pression)

Plusieurs essais de production à débit moyen mesuré par le suivi des volumes produits ont fourni des chroniques de variations de surpression sur des périodes de temps suffisantes pour tenter des interprétations par des modèles analytiques. Ces modèles simples ont des réponses connues, avec des caractéristiques qui permettent leur identification. FG dispose d'une suite logicielle (Kappa Engineering, outil Saphir) permettant ces analyses et a produit quelques résultats donnés ci-après.

FG a ainsi analysé plusieurs séquences sur GT2 et GT1 avec l'hypothèse simple d'écoulement radial avec limite circulaire, dans une formation perméable homogène d'épaisseur constante, de l'ordre de 150 m pour GT2 et 100 m pour GT1. En particulier, un suivi de remontée de pression (phase dite de build up) après mise en production sur GT2/ST2 (FG_DT_F05-10_2021-06.pdf) pointe la faible perméabilité (5 mD) et la proximité de limites hydrauliques fermées au voisinage du puits GT2-ST2 (distance calibrée à 264 m). Similairement, des propriétés sont obtenues à partir de tests de production sur GT1 (voir document FG_DT_F05-9_2021-06-1.pdf), montrant une meilleure perméabilité, de l'ordre de 280 mD et une condition à la limite de type 'no flow' repoussée à environ 1000 m. Ces interprétations seront reprises plus tard par FG (voir document FG_DT_F05-11_2021-06.pdf de Février 2021) en travaillant sur des séquences plus longues et avec d'autres hypothèses (double porosité) et confirmeront ce type de résultats.

2.2.4. Mesures en forage et mesures de contraintes

Sur la zone de socle ciblée pour la production, les données de forages acquises et disponibles pour l'analyse du réservoir sont relativement restreintes. Elles incluent les mesures de profondeur, de déviation du puits, les paramètres de foration (vitesse de

pénétration "ROP", la force de rotation "Torque", le poids sur le trépan "WOB", la rotation par minute "RPM"), des données de cuttings incluant des descriptions lithologiques et la minéralogie obtenue par diffraction X "DRX", des mesures de rayons gamma "GR", de température, de teneur en gaz, ainsi que les pertes et venues en fluides. Le CE n'a pas vu d'imagerie géophysique (électrique ou acoustique) des parois de forages, de carottage, ni de mesure de contrainte in situ (LOT, ovalisation...), qui auraient permis de donner des informations sur l'état de contrainte, la direction des structures, leurs dimensions, la typologie des fractures, la densité de fracturation, les propriétés pétrophysiques du réservoir fracturé et la stabilité des failles. Les principales données mentionnées dans les rapports géologiques, les synthèses de socle et les Masterlogs, utilisées pour contraindre la lithologie et l'organisation des failles et fractures sont : les variations de ROP, les pertes de boues ou les venues d'eau, et les observations et analyses sur cuttings.

La granulométrie des cuttings, millimétrique à infra-millimétrique, est souvent insuffisante pour apporter une information significative. Ainsi, la taille des cuttings ne permet pas de distinguer une roche hôte altérée (qui n'est d'ailleurs pas spécifique aux zones de faille, e.g. filons, limites ou composition variable des corps cristallins) d'une roche altérée fracturée (fracturation de fond ou endommagement de la faille), ou encore d'une roche altérée à texture bréchifiée ou cataclasée (le cœur de faille). Malgré une étude à la loupe binoculaire, la taille de ces agrégats ne peut permettre de déterminer avec certitude si ces éléments étaient des clastes provenant d'un cœur de faille, de sa zone endommagée, ou encore du protolithe. Par ailleurs, la présence de quartz automorphe, d'épidote, de silice amorphe, de carbonates ou d'argiles dans les cuttings, qui peut être induite par des processus de déformation et d'hydrothermalisme actuel ou récent recherchés dans les failles ciblées, peut aussi être héritée d'épisodes de déformations antérieures, et donc indicatrice de structures différentes de celles ciblées.

Il en résulte que la définition du réservoir fracturé visé est mal contrainte avec les données obtenues en forage, que ce soit pour l'identification des structures, de leur dimension ou de leur orientation. Les données de forage ne permettent pas de contraindre la géométrie du modèle géologique 3D attendu en fin de la phase d'exploration, ni d'avoir une bonne connaissance du réservoir. Par exemple, il ne peut être correctement fait état de la composition et de la dimension des cœurs de failles, des zones endommagées, des orientations des failles et fractures de ces compartiments, de la typologie des fractures, de leur nombre, et de leur porosité.

Le tenseur de contraintes considéré n'est pas directement mesuré sur le site mais les caractéristiques sont reprises des modèles estimés sur le site de Soultz-sous-Forêts (e.g. Cornet et al., 2007). Les données d'imagerie de puits qui permettraient de déterminer l'orientation des contraintes au niveau du réservoir ne sont pas disponibles. Des imageries de résistivité des parois sont disponibles à des profondeurs plus faibles, de 3 984 à 4 530 m dans VDH-GT1 ST3, dans les séries sédimentaires du Trias (Grès Vosgien, Grès d'Annweiler). Des breakouts et des fractures en tension ont été identifiés sur ces images. Les breakouts ont une orientation moyenne de N60° et les fractures en tension de N150°. Aux profondeurs considérées, le puits est dévié d'environ 30° vers l'ESE. Ces données suggèrent, en considérant l'inclinaison du puits, un azimut pour SHmax (composante horizontale maximale du tenseur des contraintes) d'environ N155°. Il diffère de l'azimut de SHmax N170° mesuré à Soultz dans le socle, mais on ne peut exclure une rotation des contraintes entre la couverture sédimentaire et le socle, comme cela est observé sur le site de Rittershoffen lorsque on se rapproche de la faille, ou au voisinage des failles majeures.

En outre, peu d'informations sont disponibles pour évaluer les valeurs des contraintes. Une analyse détaillée des pressions lors des stimulations permettrait peut-être de trouver des indices pour estimer la valeur de la contrainte minimum horizontale. La magnitude de la contrainte maximum horizontale reste difficile à estimer même lorsque des données d'imagerie sont disponibles. Une analyse fine de la géométrie des breakouts et des fractures en tension dans la partie sédimentaire pourrait permettre d'estimer ces valeurs dans cette section du puits VDH-GT1.

En l'état actuel, le modèle des contraintes pour le site de Vendenheim est faiblement étayé et des évaluations de sensibilité couvrant une large gamme de scénario doivent être considérées pour les analyses géomécaniques.

2.3. Points sur les motivations pour les tests choisis et de la stratégie suivie par FG

Plusieurs questions peuvent être soulevées en ce qui concerne la stratégie qui aurait été mise en place par FG en fonction des objectifs et planification de ses tests. On note en particulier :

L'enchaînement des tests

Les tests semblent s'enchaîner en fonction des opportunités et des propositions faites par différents prestataires suivant leurs expériences (e.g. expérience de BESTEC en Turquie). La stratégie globale est difficilement visible et les tests paraissent s'enchaîner sans analyses approfondies des résultats obtenus entre chaque test, ni prise en compte de l'historique des essais sur les conditions et l'évolution du site.

Le lien entre les stimulations chimique et thermique par pulses et les développements en cours autour de la stimulation hydraulique cyclique en fatigue hydraulique

La technique de stimulation de réservoir par cycles se développe depuis quelques années (Zang et al, 2013 ; 2018 ; Hofmann et al, 2018). Elle a été en particulier utilisée avec succès à Pohang (elle a été utilisée sur le puits PX1 dans le cadre du projet européen DESTRESS avant la stimulation hydraulique sur l'autre puits PX2 à l'origine de l'événement sismique de Novembre 2017 de Mw 5.5) (Yeo et al, 2020). FG confirme qu'il ne s'agit pas de tester ces développements mais de propositions de technique de stimulation par la société BESTEC qui s'appuie sur son expérience récente en Turquie.

Le choix de stimulation hydraulique pour générer un maximum de sismicité (en particulier en novembre 2019)

Début novembre 2019, soit quelques jours avant l'événement du 12 novembre 2019, il ressort que des stimulations hydrauliques importantes ont été menées dans GT1 et GT2 avec l'objectif de créer le maximum de sismicité afin d'essayer d'améliorer la perméabilité. Dans GT1, il s'agit de pulses successifs de débit dont il avait été observé empiriquement qu'ils produisaient par leur fréquence élevée, un plus grand nombre de séismes. Dans GT2, il s'est agi d'une stimulation dont le premier palier était directement à 450 m³/h soit 125 l/s. C'est un débit très important, en comparaison à ceux utilisés à Rittershoffen (max 80 l/s) ou Pohang (max 47 l/s) pour lesquels le premier palier de pression n'est pas celui de la pression maximale (Baujard et al, 2017 ; Yeo et al, 2020).

2.4. Objectif N°0 – Principaux points à retenir (1/2)

Données collectées et qualité des données

- FG a collecté ou produit un grand nombre de données et de documents. La disponibilité auprès de la communauté scientifique de ces informations permettra des analyses approfondies, y compris en phase 2 de l'expertise.

- Il y a un manque de stratégie claire sur l'acquisition des données. Notamment quelles données sont-elles considérées comme indispensables à une étape donnée du projet pour continuer le développement du projet ?
- Il manque un contrôle qualité systématique (trop peu de protocoles de validation, calibration, étalonnage, comparaison, robustesse, ...) des données.
- L'acquisition de paramètres clés telle que la pression lue en tête des puits est discontinuée, c'est-à-dire uniquement disponible lors des phases opératives. Ceci dénote d'une vision insuffisante de l'importance du suivi de ces paramètres et de la surveillance de l'état du réservoir et de son retour à l'équilibre avant d'initier de nouvelles opérations.
- L'enchaînement des opérations, tant de stimulation que de reprise de foration, a eu lieu sans faire un suivi du retour à l'équilibre avant l'initiation de nouveaux tests. Ceci est un aspect particulier au site de Vendenheim qui peut rendre difficiles les interprétations des résultats des tests et peut engendrer des effets cumulés difficilement prévisibles.
- Concernant les données de pression, il a été difficile de remonter aux données mesurées car seules des données dérivées (surpression estimée au niveau du réservoir) étaient initialement communiquées par FG. Ceci pose problème, car les données dérivées impliquent des hypothèses non vérifiables a priori. Il est donc essentiel de disposer d'un traçage transparent des hypothèses retenues. En outre, pour une analyse des données par des experts externes, il est primordial de disposer des données mesurées (ce qui permettrait de mieux calibrer l'incertitude des paramètres rentrant dans le calcul).
- Concernant les volumes, de manière générale les volumes injectés ont été importants avec une augmentation continue des volumes injectés en 2019 par une injection d'environ 20 m³/h pendant 6,5 mois. En octobre 2019, cette augmentation des volumes totaux injectés est soutenue principalement par des injections dans GT1 menant à la crise de fin 2019. En 2020, le volume net sur le site reste assez constant car le volume produit de GT1 est injecté de manière balancée dans GT2 menant à la crise sismique de 2020 aux alentours de ce dernier puits.
- Il n'y a pas d'imagerie de puits dans la partie réservoir, ce qui limite grandement la caractérisation du réservoir tant au niveau structural que géomécanique. L'acquisition de telles données est néanmoins difficile à haute température dans les puits profonds déviés.
- La connaissance de l'état de contraintes du site constitue un paramètre important lorsque l'on s'engage dans une stimulation massive d'un réservoir. Or, ce paramètre reste incertain à Vendenheim. De fait, il est alors important de considérer des scénarios multiples et des gammes de valeurs dans les analyses.

Accessibilité aux données

- Dans l'état actuel, la grande majorité des données est classée comme confidentielle (E). Ceci doit rapidement évoluer vers une ouverture des données pour pouvoir mener des actions de recherche dans la phase 2 et, de façon plus générale, faire bénéficier pleinement la communauté scientifique et la filière géothermie du retour d'expérience du projet de Vendenheim.
- Il a ostensiblement manqué de temps de consolidation et d'analyse des données de la part de FG. Ces temps de consolidation sont indispensables pour i) structurer la base de données et générer la documentation incluant les métadonnées mais aussi la description des conditions d'acquisition, de calibration, de contrôle de qualité et de traitement des données ; ii) mener une analyse rigoureuse des informations recueillies au fil des opérations.

- Pour assurer l'accessibilité aux données, il est nécessaire de mettre en place un système d'archivage systématique, incluant les métadonnées, des bases de données structurées selon les standards internationaux (FAIR). Dans l'état actuel, l'accès et la lisibilité des données sont difficiles rendant l'expertise laborieuse.

3. Objectif N°0 – Modèles géologique, hydrogéologique et géomécanique

Lors des différents entretiens entre FG et le CE, il est apparu aux membres du CE que le contexte géologique régional était peu pris en compte par FG au cours des différentes phases d'exploration et de mise en place des ouvrages. Ainsi, il a semblé nécessaire aux membres du CE de faire une rapide synthèse du contexte structural régional précisant ainsi la complexité et les principaux éléments structuraux susceptibles d'affecter la zone d'intérêt.

3.1. Contexte structural régional

FG dispose de nombreux éléments concernant la géologie présentant la structure régionale autour de la zone de Vendenheim, il s'agit de documents issus de travaux antérieurs publics ou issus de travaux financés par FG (thèses ou rapports internes). Malgré cela, dans les rapports géologiques et les documents mis à la disposition du CE sur la la construction des modèles structuraux et hydrogéologiques, il n'est peu voire pas fait état d'intégration ou de référence à ces connaissances régionales. Seul le modèle GeORG (présenté plus bas) est mentionné pour la construction des modèles structuraux préalables, et quelques directions structurales dites régionales ont été mentionnées lors des discussions. Il nous est donc apparu nécessaire de présenter l'état des connaissances de la structure régionale, qui servira à alimenter les discussions et avis du CE quant aux modèles structuraux et à la sismicité régionale.

La mise en place du Fossé Rhéan, ou Graben du Rhin Supérieur, a débuté à l'Éocène, période du début de la collision continentale dans le cycle alpin (Ziegler, 1992, Schumacher, 2002 ; Bourgeois et al., 2007). Elle est le résultat de la réactivation de structures crustales, héritées de la phase de déformation hercynienne, et elle se marque par le fonctionnement de failles normales, principalement orientées N-S qui débute à la fin de l'Eocène avec un maximum d'activité durant l'Oligocène (Illies, 1972 ; Schumacher, 2002 ; Michon et al, 2003) ainsi que la création de nouvelles failles orientées principalement N-S dans la partie sédimentaire. Au Miocène, la rotation de la direction des contraintes régionales entraîne une réactivation de l'ensemble des structures qui affectent le socle et sa couverture.

Le fonctionnement de ces failles permet la création d'une dépression dans laquelle vont se piéger des sédiments. L'épaisseur de ces sédiments n'est pas homogène sur l'ensemble du Fossé Rhéan. L'organisation de ces dépôts est donc la conséquence de l'activation de structures héritées, présentes dans le socle en fond du Fossé et sur ses épaulements (Vosges et Forêt-Noire). C'est le fonctionnement de ces accidents qui est particulièrement visible sur les données géophysiques de type sismique (Figure 4

La zone structurale de Strasbourg correspond à une bande orientée N80, oblique à l'orientation générale du Fossé. Elle constitue une zone de relai entre la partie Nord du fossé qui montre un maximum d'épaisseur de sédiments à l'Est, et la partie sud qui montre un maximum d'épaisseur des sédiments dans la partie ouest. Cette structure est active durant tout le fonctionnement du Fossé jusqu'à l'actuel. Le fonctionnement de ces structures ne devrait pas se marquer par des décalages importants dans les formations sédimentaires et ne devraient donc pas être facilement détectables à partir des déformations dans ces séries. Par contre ces structures sont identifiables grâce aux données de cartographie magnétique, sur la Figure 4c (Edel et al., 2018).

L'analyse de la fracturation du prolongement de cette structure vers l'ouest, qui affleure dans les Vosges, montre que plusieurs directions de failles et fractures affectent le socle (Figure 4d), (Bertrand et al., 2018). Ces affleurements peuvent être considérés comme analogues aux structures potentiellement rencontrées dans la zone d'intérêt. Quatre directions majeures sont décrites, N0-20, N40, N70-90 et N130. Ces directions sont toutes identifiées comme héritées de l'orogène hercynien et réactivées durant le fonctionnement du graben du

Rhin. Ces directions sont également décrites à l'échelle du Fossé Rhénan par une analyse linéaire réalisée par Valley (2007), Figure 4E.

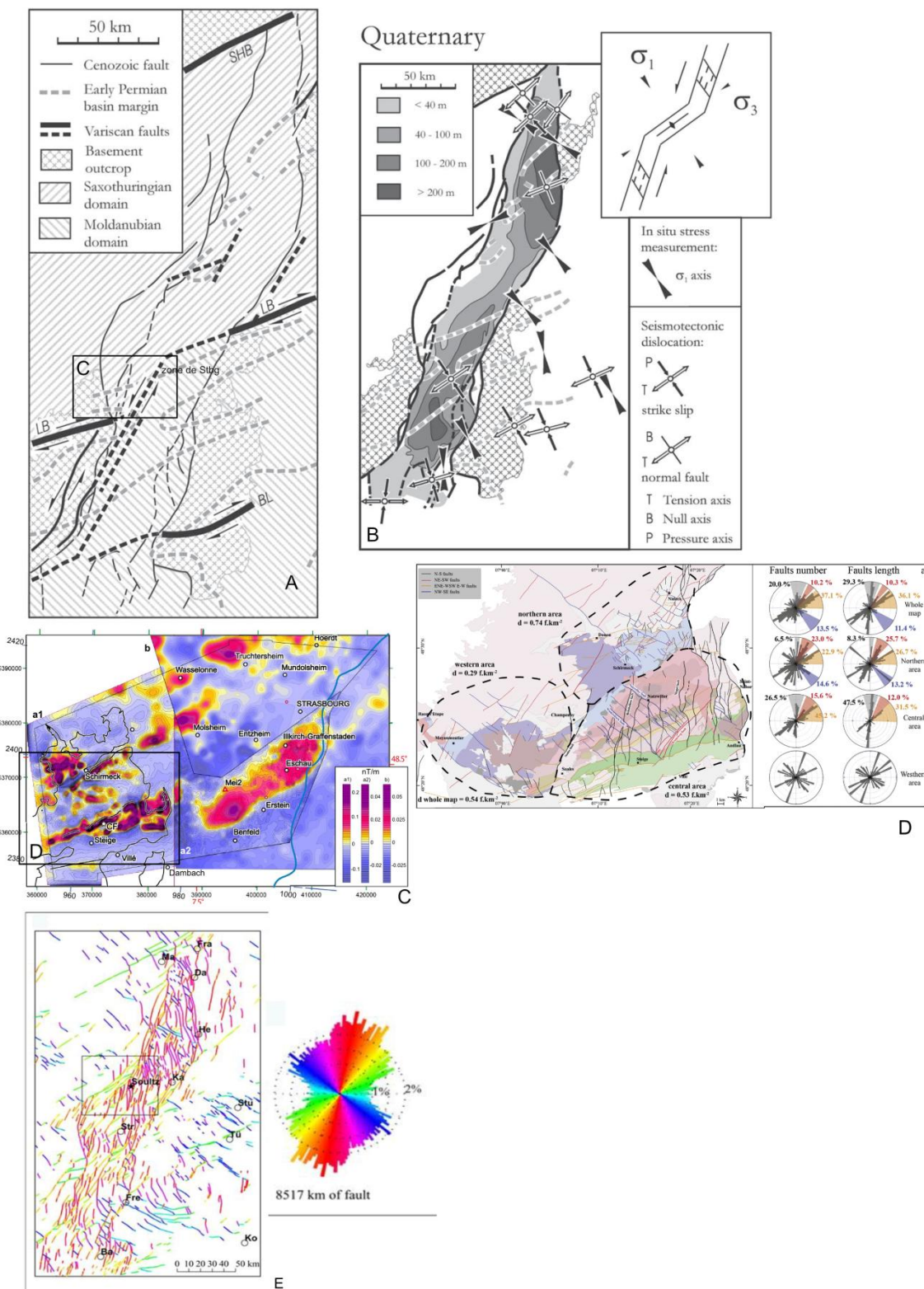


Figure 4 : A) Organisation des structures hercyniennes dans le Fossé Rhénan (Schumacher, 2002) ; B) Localisation des dépôts centres au Quaternaire (Schumacher, 2002) ; C) Carte des anomalies magnétiques dans le secteur Strasbourg- Schirmeck (Edel et al 2018) ; D) Organisation de la fracturation dans le secteur de Schirmeck (Bertrand et al., 2018). E) analyse linéaire à l'échelle du Fossé Rhénan (Valley, 2007)

3.2. Description du modèle géologique de FG et son évolution

Le réservoir ciblé est constitué par une faille et son réseau de fractures associé, développé dans le socle magmatique/métamorphique du Fossé Rhénan à une profondeur de au moins 4000 m.

Le modèle structural a progressivement évolué depuis un modèle préliminaire issu des phases exploratoires jusqu'à un modèle plus fin construit à partir des données opérationnelles de forage et de microsismicité. La construction du modèle géologique du site de Vendenheim s'est donc faite en plusieurs étapes et à partir de différents éléments :

- Une analyse des données existantes, notamment géophysiques et sismiques, qui s'appuie sur le modèle GeORG à basse résolution (Armandine Les Landes et al., 2019).
- La réinterprétation de profils sismiques existants préalablement au projet.
- L'acquisition de nouveaux profils sismiques.
- L'interprétation de données de forage : ROP (rate of penetration), d'analyses des cuttings obtenues après réalisation de forages, des données hydrauliques (e.g. pressions, pertes et venues), et des données de diagraphies qui n'ont pu être acquises que pour la partie sédimentaire.
- L'intégration des données de sismicité.

Des données de géophysiques non sismiques (cartographie magnétique) ont été acquises mais ne sont pas incorporées dans l'analyse réalisée par Fonroche.

3.2.1. La structure cible à la résolution GeORG.

La définition par FG de la cible initiale s'appuie sur le modèle GeORG. L'identification de structures potentiellement exploitables a été réalisée sur ce modèle qui est de basse résolution. La définition de la cible sur Vendenheim est aussi en grande partie dépendante du foncier acquis par FG.

Le projet européen GeORG a été financé dans le cadre du programme Interreg IV Rhin supérieur. Entre octobre 2008 et jusqu'au décembre 2012, les partenaires suisses, français et allemands de ce projet transfrontalier ont établi une base de données sur la structure géologique du Fossé rhénan. L'ensemble des résultats était mis à la disposition des professionnels ainsi qu'à celle du grand public via le site internet <https://www.geopotenziale.org>. Ce projet a donné lieu à un modèle régional, construit à l'échelle du bassin rhénan, à basse résolution (zoom maximal, échelle 1/80 000).

Dans la zone d'intérêt, il localise une structure majeure orientée N20 et montrant un fort rejet, d'environ 500 mètres. A la profondeur de 5 000 m, les lithologies recoupées sont de type granitique. A 4 000 m de profondeur, (Figure 5) des éléments de grès triasiques sont identifiés au toit des principales failles. Les accidents cartographiés dans le socle sont le prolongement des structures reconnues dans la partie sédimentaire. La longueur estimée de la structure ciblée est d'environ une vingtaine de kilomètre. Les données sismiques sont acquises en temps, leur transformation en profondeur nécessite la définition d'une loi de vitesses qui intègre les propriétés des différentes unités géologiques et leurs épaisseurs traversées par le trajet de l'onde. L'erreur induite par ces paramètres locaux est globalement au moins hectométrique. Ce modèle de vitesse va être contraignant pour la localisation des objets en profondeur et celle des séismes enregistrés lors des différentes crises sismiques.

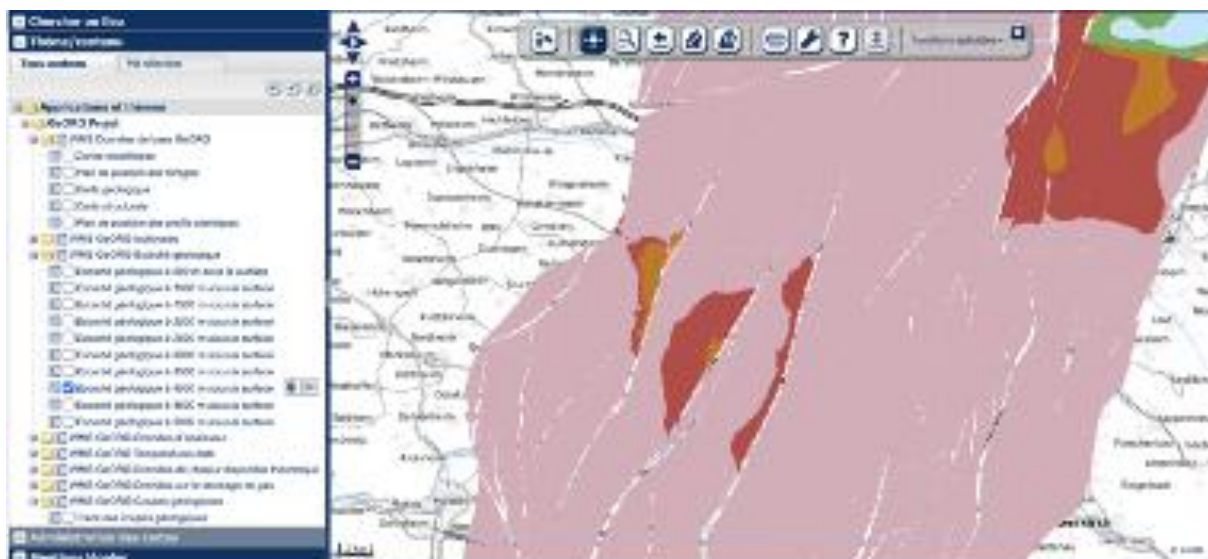


Figure 5 : Écorché à 4000 m du modèle GeORG (d'après <https://www.geopotenziale.eu>)

3.2.2. Le modèle géologique construit à partir de l'interprétation des profils sismiques anciens et nouvellement acquis par FG.

La Figure simplifiée par FONROCHE GEOTHERMIE, remplaçant les figures 6, 7 et 8 montre les données du modèle GeORG ainsi que des données microsismiques du RéNaSS. Ce modèle s'étend jusqu'au sud de Strasbourg (Figure simplifiée par FONROCHE GEOTHERMIE, remplaçant les figures 6, 7 et 8 a). L'interprétation de FG, en particulier de deux profils sismiques (Figure simplifiée par FONROCHE GEOTHERMIE, remplaçant les figures 6, 7 et 8 b et c), montre que la zone de faille ciblée est segmentée à la profondeur visée. Une seule faille est visible à 4 km de profondeur dans la partie Sud où GT1 a été foré (Figure simplifiée par FONROCHE GEOTHERMIE, remplaçant les figures 6, 7 et 8 b), alors qu'à la même profondeur deux failles sont visibles dans la partie Nord où GT2 a été foré (Figure simplifiée par FONROCHE GEOTHERMIE, remplaçant les figures 6, 7 et 8 c). Cette segmentation non visible sur le modèle GeORG est incorporée dans le modèle régional dit « de Strasbourg ».

Un premier modèle structural local (nommé VDH) a été construit par FG avant forage, en 2017 (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**a). Il est centré sur les forages de Vendenheim, il contient 19 surfaces de failles et plusieurs horizons stratigraphiques. Il situe la zone de faille cible nommée F1C, globalement orientée N020 et modélisée sous la forme d'un couloir entre deux surfaces (Figure 8b). Les failles modélisées ont des directions cohérentes avec les failles cartographiques de la région (Figure 4) et les failles principales du modèle GeORG et de Strasbourg (Figure 5 et **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

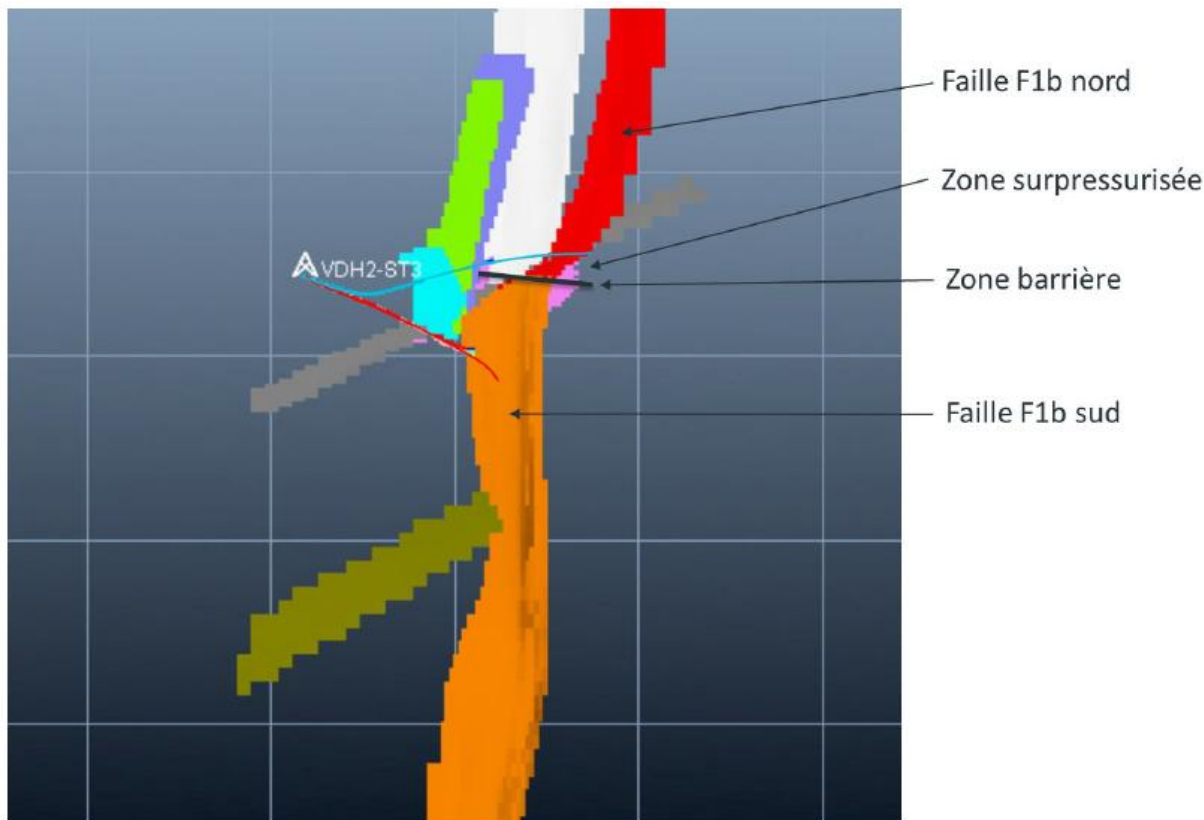


Figure simplifiée par FONROCHE GEOTHERMIE, remplaçant les figures 6, 7 et 8 pour des raisons de propriété industrielle : image conceptuelle du réservoir simplifiée avril 2022

3.2.3. Évolution du modèle après acquisition des données de puits et réalisation des tests de GT1 et GT2

En 2018, le modèle structural a été revisité avec les données de forages pour mieux discrétiser les différents segments de failles, représenter la sismicité et analyser les limites hydrologiques autour des forages après interprétation des tests hydrauliques. Les éléments de description des forages dans la partie ciblée (socle) comprennent la description lithologique des cuttings, les “breaks” de ROP (c’est à dire les variations brutales des vitesses d’avancée) et les pertes de fluides de forage. Ils ont permis d’identifier des zones d’intérêts traduites sous forme de zones de failles dans un modèle structural de 2018 (Figure 8c) plus détaillé que le modèle d’exploration de 2017 (Figure 8a et b).

Ce modèle de 2018 est construit après foration de GT1-ST4 et GT2-ST2, ce qui a permis de recalibrer les horizons et mieux discrétiser les failles rencontrées. Ce modèle suppose une continuité structurale de la faille F1B entre les forages GT1 et GT2. Dans ce modèle cette faille F1B est courbe, orientée NS, puis N035 à N020 du Sud vers le Nord. La faille F1C est la continuité vers le Nord de la partie Sud de la faille F1B.

D’après les différents rapports géologiques de forages édités par FG :

- GT1 a traversé une faille majeure à 4500 m de profondeur TVD (notée F1B en Figure 8c), supposée être d’orientation N020.
- GT2 a traversé quelques failles au-dessus du réservoir ciblé (FU, FV, FW, **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) et deux autres zones de failles au sein du réservoir ciblé dans le socle. Ces dernières sont interprétées comme orientées N-S, et de plus faible épaisseur que la faille majeure traversée par GT1. La première est rencontrée

vers 4200 m TVD (zone de faille indiquée F1C) et la seconde vers 4790 m TVD (indiquée F1B). Après l'extension du forage GT2 (cf chapitre 4.1.1, souhaitée par FG dans le but de confirmer les failles transversales dans le socle). Une troisième zone de faille est rencontrée entre 4900 et 4990 m TVD.

Cette troisième zone de faille traversée par GT2 est supposée être de direction N040-070 par FG. Elle est nommée "couloir hercynien" et sera intégrée dans un nouveau modèle structural, édité début 2020. La localisation de cette structure s'appuie notamment sur des données de mécanismes au foyer, des tests de puits et de cuttings (Figure 9).

3.2.4. Évolution du modèle après intégration des données de sismicité

Au début de l'année 2020, FG améliore son modèle structural avec l'intégration d'événements microsismiques mais aussi avec l'extension du forage VDH-GT2-ST3. Ce nouveau modèle (Figure 7) inclut à présent le couloir de faille hercynien N040-N070, traversé par GT2, et intersectant les failles F1B et F1C. Les éléments avancés par FG pour modifier le modèle de 2018 sont :

- la présence de cette dernière zone de faille rencontrée en bout de GT2 présentant une minéralogie différente de celles précédemment traversées ,
- la présence d'événements microsismiques supposés être d'orientation N040-N070, sur la base des mécanismes aux foyers, autour de GT1 à l'Ouest de F1B (Figure 9),
- un nuage de sismicité globalement E-W entre les deux forages,
- quelques indications possibles de failles transverses sur plusieurs lignes sismiques,
- la présence d'accidents hercyniens orientés N040-N070 dans la géologie régionale (Figure 4).

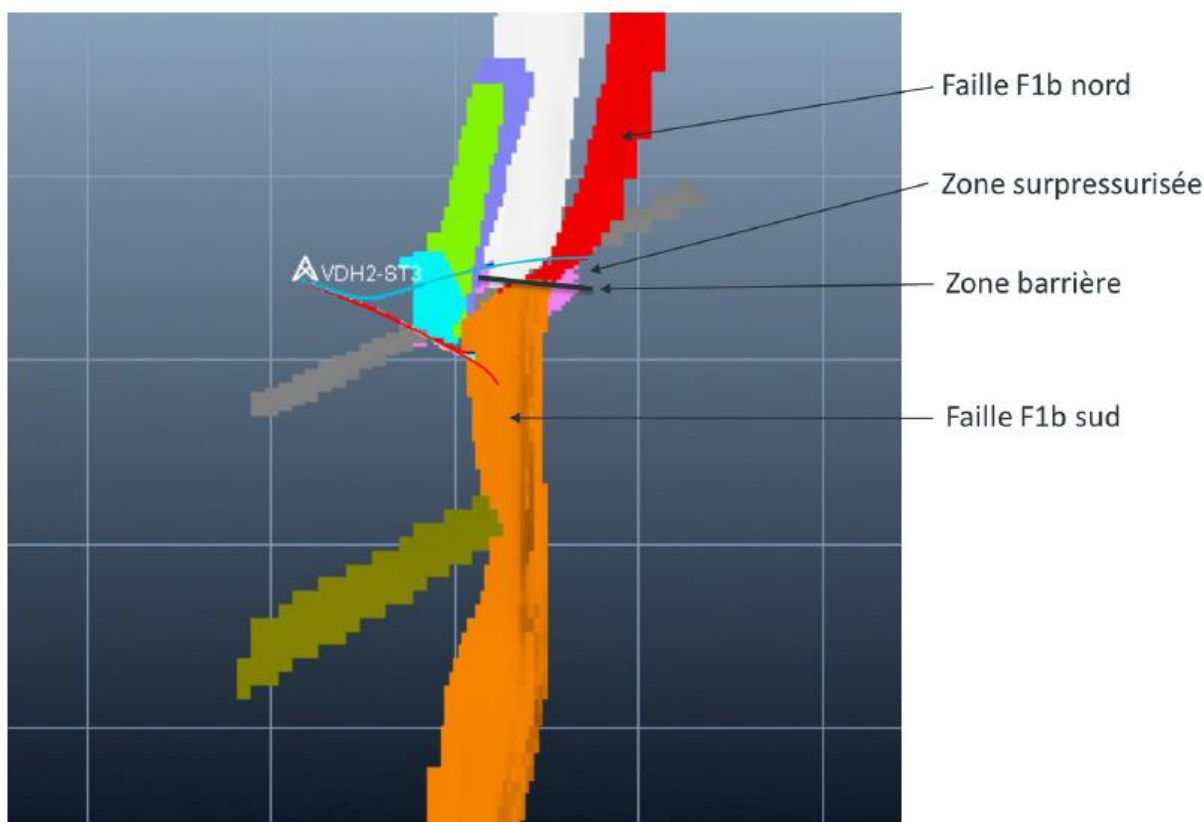


Figure 7, version simplifiée par FONROCHE GEOTHERMIE pour des raisons de propriété industrielle : image conceptuelle du réservoir simplifiée avril 2022 (Modèle structural de FG, début 2020, vue du dessus (Figure modifié de FG)).

Le modèle structural a été révisé fin 2020 à l'aide des données sismiques et hydrauliques acquises par FG (Figure 8,). Selon FG, il s'agit d'un modèle plus précis qui sert, notamment, de référence pour l'étude géomécanique avancée de stabilité des failles (étude confiée à la société Schlumberger).

Cette version, la plus récente du modèle structural 3D, est-elle aussi classée confidentielle par FG. Elle contient davantage de failles de petites dimensions, orientées N010 à N060, situées à l'Est de la zone de courbure de F1B au Sud du couloir hercynien.

Ce modèle est encore en cours d'évolution au moment de l'expertise du CE. L'étude géomécanique de Schlumberger n'est pas terminée et les données de ces modélisations ne sont pour l'instant pas mises à disposition du CE.

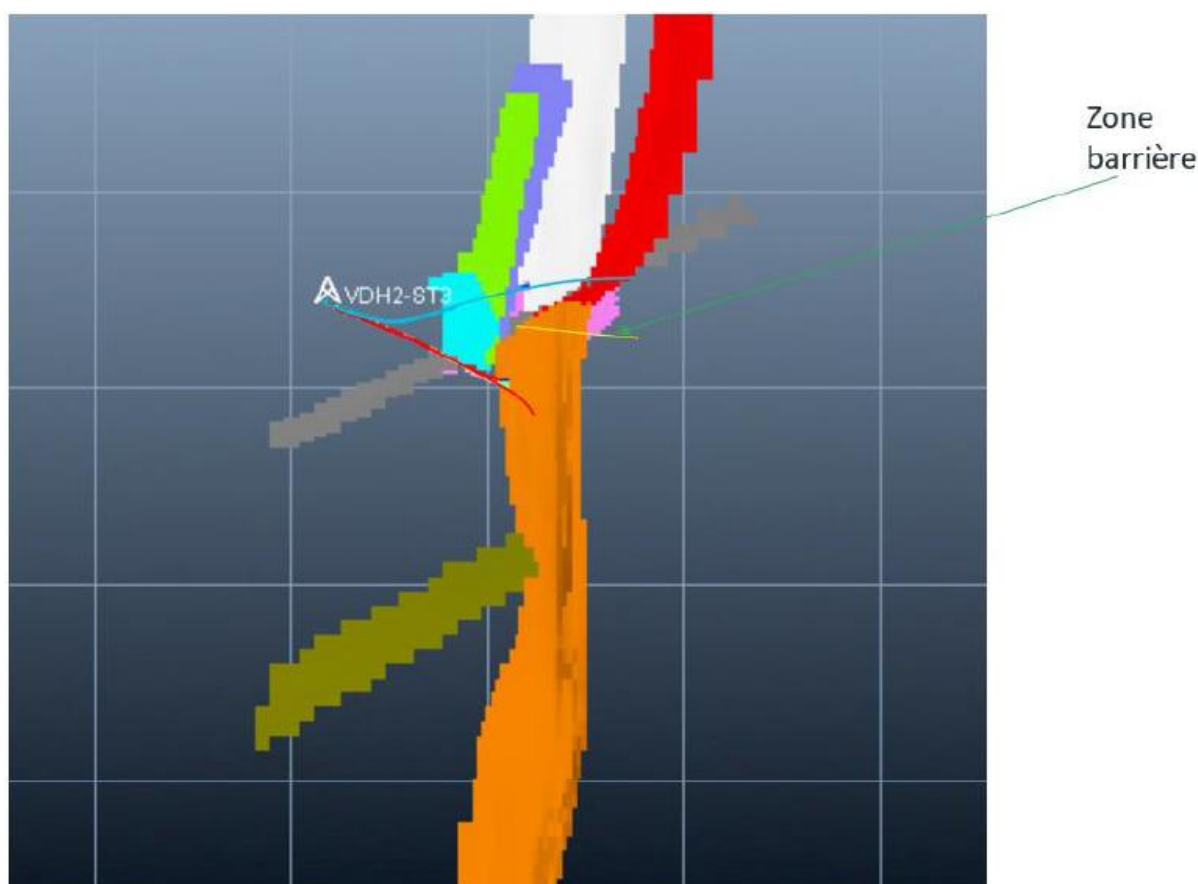


Figure 8, version simplifiée par FONROCHE GEOTHERMIE pour des raisons de propriété industrielle : image conceptuelle du réservoir simplifiée avril 2022 (remplaçant la figure 10 du rapport confidentiel : Modèle structural de FG, fin 2020, vue du dessus (Figure de FG)).

3.3. Modèle hydrogéologique de FG et son évolution

Un premier modèle hydrogéologique conceptuel a été établi en 2017 ; il a évolué en 2019 après réalisation de GT1. Puis un modèle plus avancé, numérisé et incluant des propriétés pétrophysiques, issues de la littérature, a été construit afin d'effectuer des simulations d'écoulement, de transfert de chaleur et de pression de fluides. Ce modèle numérique est basé sur le modèle structural, sur des tests hydrauliques et sur les données de microsismicité corrélées à la pression du réservoir.

Jusqu'à fin 2020, il n'y avait pas vraiment de modèle incluant le doublet, mais des modèles en mono-puits.

Dans le modèle hydrogéologique, les failles ne sont plus des surfaces, mais des volumes ayant une extension transversale de plusieurs cellules de calcul. Les modélisations ont été réalisées en 2019 dans PumaFlow (outil Beicip_FranLab), puis réadaptées en 2020, avec intégration du nouveau modèle structural (modélisé en 3D sous GoCad). Ce modèle structural est importé via un outil de génération de grille de type Petrel (Schlumberger). Cet outil permet la création d'un objet 3D hétérogène, appuyé sur les surfaces du modèle structural, formé de cellules cubiques de taille élémentaire 50 m, chaque cellule ayant ses propres paramètres pétrophysiques estimés à l'échelle de 50 m (perméabilité, porosité, compressibilité de matrice, emmagasinement spécifique, conductivité thermique, ...).

Ainsi, suivant FG, dans le modèle hydrogéologique numérique, les failles ne sont plus des surfaces mais des volumes hétérogènes ayant plusieurs centaines de mètres dans leur dimension transversale selon l'épaisseur donnée à la zone endommagée dans une matrice très peu perméable. Dans le dernier modèle, la faille transverse (N070) est considérée comme un obstacle aux circulations au sein dans la zone de faille majeure F1B, hypothèse non considérée dans les modèles précédents. Pour la faille majeure (F1B), les valeurs de perméabilité sont tirées d'un travail de thèse sur le Fossé Rhénan (Bertrand, 2017), avec des valeurs différentes dans le cœur de faille (roche de faille : brèches, cataclasites et gouges) et la zone endommagée (zone fracturée en périphérie de la faille).

Un des paramètres clé pour la réalisation du modèle du réservoir concerne l'épaisseur de la faille cible. Le premier modèle hydrogéologique tenait compte d'une épaisseur de 100 m fixe () de la zone de faille, car le logiciel utilisé (GoCad) ne pouvait pas modéliser des variations de largeur de faille. Il est précisé par FG que dans l'étude en cours de Schlumberger ce paramètre est considéré comme une variable Figure 4e.

La version présentée du modèle hydrogéologique du réservoir est basée sur les mesures réalisées en octobre et novembre 2020. Pour FG, la zone de failles en éventail indiquée par les mécanismes au foyer correspond à une zone de relai entre les deux segments de failles majeures (segments de F1B). Lors du test d'interférence en automne 2020, la zone autour de GT2 s'est retrouvée en surpression, alors que la zone autour de GT1 était en dépression. Selon FG, au niveau de la zone relai, il y a eu stockage des fluides, avec un faible écoulement vers la zone GT1, créant une surpression locale dans cette zone de relai, en lien avec la sismicité enregistrée.

A ce jour FG n'a donc pas de points de calages sur le modèle, il agit par rétro analyse d'un test à l'autre. La validation du modèle se fait par approche de type "history matching". Pour FG, l'outil a été utilisé de façon prédictive pour faire des analyses de sensibilité.

Ce n'est qu'en 2021 qu'une rétro analyse des évènements est menée par FG, pour mieux reproduire ce qui s'est passé (pression, sismicité).

Aujourd'hui, FG travaille sur un rapport présentant les résultats des modélisations hydrogéologiques. Il sera communiqué au CE dès que possible.

3.4. Discussion du CE sur la continuité structurale des failles principales

Pour la communication hydraulique entre les deux forages GT1 et GT2, l'élément majeur du modèle structural à considérer est la continuité des failles principales. Cette continuité structurale est discutée ci-dessous au regard des données de forage, de sismicité et des données hydrogéologiques (Figure 9).

Continuité structurale et données géologiques

La continuité entre les segments Nord et Sud de la faille F1B ne peut être clairement démontrée par les données de forage ou par les profils sismiques qui sont par définition, respectivement, des données 1D et 2D. Les principales failles sont probablement identifiées le long des forages à partir des données de puits, mais la nature de ces données, très indirecte (ROP, cuttings infra centimétriques, pertes et venues), ne donne que des informations très partielles. Les informations déduites de ces données ne permettent en aucun cas de déduire l'orientation des failles traversées, si bien que, par exemple, l'orientation du couloir hercynien N040-N070 proposée dans le modèle le plus récent ne peut être correctement contrainte. La densité de fractures, la porosité du réservoir et la composition lithologique et structurale des cœurs de faille et des zones endommagées ne peuvent être que trop partiellement déduites sans carottages, imageries de paroi et diagraphies avancées. Il en résulte des incertitudes sur la description et les continuités structurale et hydraulique des failles traversées par les forages (Figure 8,). Notons que les données d'épaisseur des zones de failles déduites des données de cuttings des pertes/venues et des breaks de ROP auraient pu être comparées aux relations empiriques d'*épaisseur - rejet* et *espacement - rejet* de la littérature connues pour les zones de failles afin de discuter la longueur et la connectivité latérale des failles majeures (e.g. Soliva et Benedicto, 2004 ; Imber et al., 2004 ; Savage et Brodsky, 2011 ; Solum et Huisman, 2017).

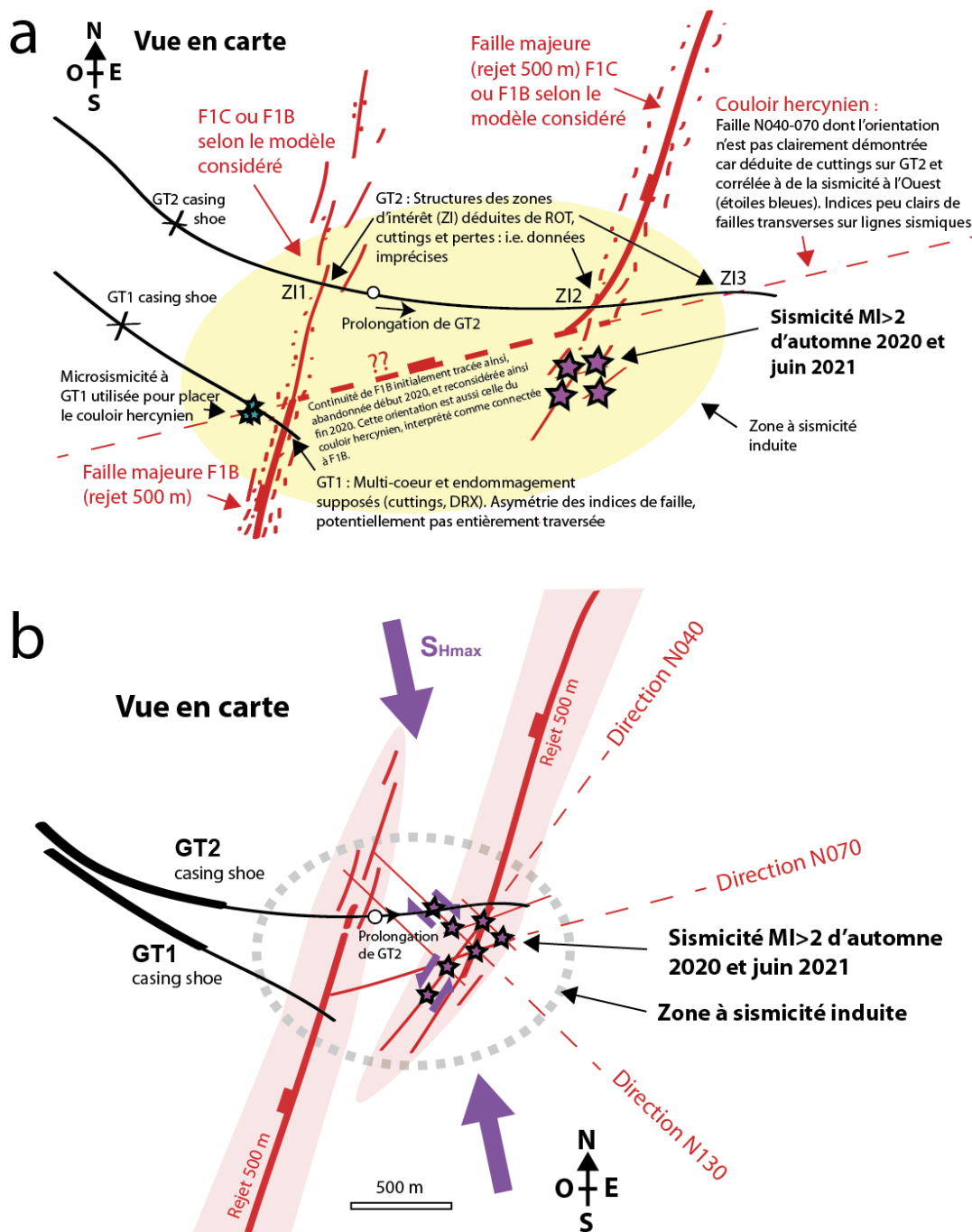


Figure 9 : Schéma de synthèse de discussion (a) du modèle structural de FG, et (b) de la vision du CE, vue en carte.

Continuité structurale et données sismologiques

La carte des séismes relocalisés par l'EOST (Schmittbuhl et al, 2021) permet en première analyse d'identifier des directions d'alignement N160-N20, N40, N130, laissant supposer la présence de discontinuités selon ces directions. Les directions déduites des mécanismes aux foyers utilisés pour la construction du modèle géologique sont incertaines, notamment car une seule direction de plan nodal (celle du couloir hercynien N040 à N070) est considérée par FG pour l'interprétation. Pourtant, les séismes enregistrés en champ proche du puits GT2 montrent des orientations d'alignements plutôt N130 que N40 (voir *note de l'EOST du 27/06/2021*, *note du CE sur le séisme du 26 Juin 2021*, et chapitre 7, objectif 4). Notons que les mécanismes au foyer déterminés pour les séismes les plus importants ont

des plans nodaux N130 et N40. Le plan nodal N130 est possible, il semble être le plus instable mécaniquement (voir section 4.2.7 et rapport du CE sur le séisme de juin 2021) et ce sont des directions de failles et de fractures régionales bien identifiées à partir d'analogues de surface (e.g. Bertrand et al., 2018 ; Figure 4). Il est précisé que FG a préféré privilégier la direction régionale des failles vues en surface et représentées dans le modèle régional GeORG. La direction hercynienne N040 à N070 est bien connue dans la région mais la présence d'une telle structure connectant les 2 segments de la Faille F1B sur le dernier modèle structural reste à démontrer (Figure 8,).

Notons par ailleurs que le dernier modèle de FG n'inclut pas de structures conjuguées à pendage Est telles que suggérées par le pendage global des essaims de sismicité (Figure 1g, vue en section).

Continuité structurale et données hydrogéologiques

Les faibles injectivités et l'absence de perturbation en pression au regard des volumes mis en jeu et des durées des tests hydrauliques entre les deux forages posent des questions sur la continuité structurale des failles entre les 2 forages dans les modèles proposés par FG. En effet, ces modèles présentent toujours une ou plusieurs failles qui connectent GT1 à GT2. Les limites hydrogéologiques issues des interprétations de tests hydrauliques n'ont que peu de recouvrement spatial, suggérant une faible perméabilité des zones de failles, ou entre les failles dans cette zone. Deux hypothèses sont envisageables pour expliquer cela :

- l'absence de faille de relais entre les principaux segments (NE et SO) de la faille majeure (F1b sur la Figure 8, , modèle de fin 2020), ou une très faible perméabilité de cette zone de relais non faillée,
- des zones de failles de relais et des fractures d'endommagement peu ouvertes car orientées NE-SO et donc sub-perpendiculaires à la contrainte principale majeure SH supposée, et fonctionnant en relai compressif.

Notons par ailleurs que des modèles hydrauliques utilisant les différents éléments des modèles structuraux 3D ne semblent pas avoir été testés au fur et à mesure que des informations géologiques sont acquises alors qu'une proposition structurale est déjà disponible fin 2018 dès la fin des opérations sur les forages de GT1-ST4 et GT2-ST2 (Cf slide 11, rapport F04-9.evolution.pdf). Il est constaté que géométriquement les zones d'influence mises en évidence par les valeurs des distances aux limites hydrauliques se recouvrent peu. La continuité hydraulique implicite jusqu'alors de la structure principale F1B est remise en question. FG avait, dans un premier temps, proposé l'existence d'une structure F1C courbe, venant buter sur F1B, F1B étant continue mais de forme sigmoïde avec sa branche nord située à l'est dans la direction N20 (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.c**).

FG proposera ensuite de distinguer la partie nord de F1B en un segment Nord-Sud décalé vers l'est appelé F1C sur la Figure 7 et se terminant au voisinage d'une structure transverse plus ancienne (évolution du modèle de début 2020), cette dernière a un rôle de barrière hydraulique pénalisant fortement les transferts.

Fin 2020, FG proposera que F1B soit d'orientation Nord 20 et reste en lien a minima structural avec sa partie sud, via un segment transverse constitué par d'anciennes structures d'un couloir fracturé d'âge hercynien. A noter que selon cette interprétation, F1C est très redressée, et ne décale que peu le socle, et pourrait se comporter comme une structure annexe sans réelle importance hydraulique autre que capacitive, à la façon des failles Fw et Fv localisées dans la couverture au toit du socle à proximité de GT2 (Figure 7).

3.5. Avis du CE sur les modèles géologique et hydrogéologique de FG

Les interprétations des données de géophysique sismique renseignent peu ou pas sur l'organisation des structures dans le socle. Seules les structures qui affectent la partie sédimentaire du bassin sont bien renseignées. Les structures qui affectent le socle sont déduites de cette interprétation, ainsi, les structures héritées dans le socle n'induisant que peu ou pas de déformation dans la couverture sédimentaire ne sont pas documentées.

La résolution ainsi que la localisation des structures affectant le socle sont réduites. L'incertitude sur la localisation est hectométrique au mieux, de même que pour l'estimation des épaisseurs de ces structures. Ainsi, le modèle géologique construit à partir de ces données est incertain. FG a proposé un modèle qui a évolué au cours du temps et de l'acquisition des données, mais il aurait été nécessaire de construire plusieurs modèles alternatifs au cours de l'acquisition des données pour une meilleure évaluation des risques.

Les tests effectués en puits montrent que :

- le segment ouest de la faille F1B recoupée par le forage GT1 est peu ou pas connecté hydrauliquement aux structures recoupées à l'ouest par le premier tronçon du forage GT2, structures interprétées par FG comme le prolongement nord de la faille F1B, puis comme étant la faille F1C.
- la prolongation du forage GT2 vers l'Est, a recoupé une nouvelle structure interprétée comme le segment nord-est de la faille F1B. Cette structure n'est pas non plus hydrauliquement connectée au segment ouest de la faille F1B.
- la dernière prolongation du forage GT2 a recoupé une structure, dite hercynienne, dont la nature des cuttings est différente (riche en épidote) de celle décrite pour les structures précédentes (composées de quartz et de calcite), F1B et F1C. Son origine, sa nature et surtout son orientation sont très incertaines.

Les données de sismicité montrent que les structures recoupées par les deux forages n'ont pas des comportements comparables. Bien qu'il ait localisé de la microsismicité à son voisinage, le forage GT1 a connecté une structure qui a possiblement permis le transfert des fluides et des pressions associées, ou une perturbation de contraintes, sur une grande distance pour induire la sismicité de décembre 2019 (voir chapitre 5, objectif 2). Par contre, les essais réalisés à partir du forage GT2, ont induit des événements sismiques en champ proche du forage, dont certains alignements ne correspondent pas aux failles du modèle géologique proposé par FG.

Ces deux comportements différents pour des forages qui sont relativement rapprochés, indiquent une complexité qui n'est pas prise en compte dans les modèles hydrogéologiques et géomécaniques construits par FG.

D'une façon générale les réseaux de failles et de fractures qui composent les modèles structuraux et qui ont été identifiés sur les profils sismiques et reconnus en forage ne constituent pas un réseau connecté entre les deux puits GT1 et GT2 et favorable aux écoulements entre les deux puits.

3.6. Objectif N°0 – Principaux points à retenir (2/2)

Le Secteur de Strasbourg appartient à une zone de transition structurale interne au Fossé Rhénan et elle constitue un objet géologique structurellement complexe.

La structure ciblée est définie initialement comme une faille importante du Fossé rhénan d'orientation N-S et de rejet important. FG propose un modèle structural composé de structures N-S et de structures N70.

L'analyse de l'ensemble des données disponibles (profils sismiques, des données de puits, test hydrauliques, données d'analogie) montre que la cible recoupée par les forages GT1 et

GT2 a une organisation structurale complexe. Cela est à l'origine des comportements hydrauliques et sismiques spécifiques à chacun des puits et de l'absence de continuité hydraulique entre les deux forages.

En l'absence d'un jeu de données probant, plusieurs modèles alternatifs auraient dû être construits en s'appuyant sur les données de la littérature (par exemple les lois d'échelles décrivant des zones de failles) et les données obtenues sur des analogues. En effet, l'organisation structurale ne peut être confirmée par les données de puits, des données de géophysique non sismique auraient pu être intégrées.

Les difficultés rencontrées à VDH font que les outils et les moyens mis en œuvre n'étaient pas appropriés pour décrire avec suffisamment de précision le réservoir et déterminer ses propriétés.

Le modèle hydrogéologique entrevu pendant les entretiens est simpliste, le modèle n'intègre pas l'historique complet des tests sur VDH, les signaux pris en compte sont issus de tests à très (trop) court terme.

4. Objectif N°1 – Compréhension des mécanismes conduisant au déclenchement de la sismicité au voisinage des puits, en particulier les évènements de fin 2020

Dans ce chapitre, le CE donne son avis sur les opérations réalisées par FG durant le deuxième semestre 2020, ainsi que sur la sismicité enregistrée entre octobre et décembre 2020 au voisinage des puits de Vendenheim. Cet avis est établi sur la base des documents FG_DT_F05-2b_2021-04, FG_NT_F01-b_2020-10 et FG_DT_I02d_2021-07-02 fournis par FG, sur les discussions tenues lors des réunions du 4 mai et du 9 juin 2021 entre le CE et FG, ainsi que sur la base des précédents documents rédigés par l'Ineris et le Brgm (notamment les notes Brgm_1_2020-12 et Ineris_1_2020-12, respectivement du 18/12/2020 et du 21/12/2020).

4.1. Synthèse de l'historique des opérations selon Fonroche Géothermie

4.1.1. L'évolution des puits en 2020

- *VDH-GT2 : opération de forage du 11 novembre 2019 ou 22 février 2020 (extension - deuxième faille), (voir Figure 1)*

En novembre 2019, après une série de tests hydrauliques et un test de build-up sur GT2, FG décide de continuer le forage de GT2 pour atteindre une deuxième faille, plus à l'Est. En effet, FG considère que GT2 est connecté à un réservoir plus petit que celui de GT1 et que la faille traversée par GT2 n'est pas la continuité de la faille régionale N20 identifiée dans GT1 (Figure 8,). FG suppose que la faille principale est plus à l'Est (voir le segment nord-est de F1B en Figure 7 et Figure 8,). Celle-ci devient la nouvelle cible à atteindre.

En conséquence de l'événement sismique du 12 novembre 2019, la Préfecture du Bas-Rhin impose l'interdiction de réaliser des tests d'injection sur le doublet de Vendenheim. La foration de GT2 se poursuit.

Dans la même période, il y a une discussion sur le modèle structural de Vendenheim. En effet, selon FG, il y aurait une faille transverse (ou un système de failles transverses) NE-SW à ENE-WSW (N40 à N70) qui ferait un relai structural entre les deux failles majeures NNE-SSW (F1B et F1C) observées au niveau de GT2 (voir section 3, **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Pour confirmer ce modèle structural, FG décide de prolonger le puits GT2 au-delà de la faille cible pour vérifier l'existence de ces failles transverses, qui en raison de leur orientation et de la trajectoire du puits doivent se rencontrer plus à l'Est. FG indique qu'il s'agit d'une extension à but « scientifique ». Le prolongement et l'extension du puits GT2, entre novembre 2019 et février 2020, aura donc deux objectifs pour FG : (i) améliorer le réservoir en atteignant la faille supposée être la faille principale, puis (ii) réaliser une extension pour vérifier la présence de(s) faille(s) transversale(s) N40/70.

- *VDH-GT1 : opération de forage du 20 juin 2020 au 05 août 2020 (3^{ème} jambe), (voir Figure 1a)*

En avril 2020, une opération de nettoyage interne au puits a lieu dans GT1 (2^{ème} jambe) qui apparaît colmaté sur une hauteur importante suite aux tests hydrauliques réalisés en novembre 2019. A la fin de cette opération, un nouveau comblement est constaté dans le puits à cause des déblais. FG décide donc de faire une nouvelle jambe (3^{ème} jambe) sur

GT1 pour passer le point de colmatage. La 1ère jambe colmatée par le câble et qui était connectée au réservoir, a été conservée. Par conséquent, à chaque fois qu'une nouvelle jambe est réalisée sur GT1, elle est connectée à cette 1ère jambe historique du fait des stimulations par acidification des failles réalisées en première phase, car les side tracks successifs (2ème et 3ème jambes) ont été forés très proches les uns des autres (entre 5 et 25 m). Pour GT1, il y a donc deux jambes (1ère et 3ème jambes) dans le réservoir mais elles remontent par une seule connexion à la tête de puits.

4.1.2. Essais hydrauliques en 2020

■ VDH-GT1 : 15 avril 2020 – 19 juin 2020 (2ème jambe – ST7), (voir Figure 1)

Cette opération n'a pas été discutée en détail lors des réunions avec FG. Dans un mail envoyé par Jean Philippe Soulé au CE, en date du 30 septembre 2021, FG indique que cette opération n'a pas impliqué une séquence hydraulique d'injection ou de production dans le réservoir. Il s'agissait d'une opération en circulation puits ouvert qui visait à remonter les cuttings du colmatage qui s'étaient formés en novembre 2019, à la suite des derniers tests hydrauliques dans le puits.

C'est à la suite de cette opération qu'un nouveau comblement a lieu dans ce puits, suite à quoi FG décide de forer une troisième jambe (cf. section précédente).

■ VDH-GT1 : 19 août 2020 – 06 septembre 2020 (3ème jambe – ST9), (voir Figure 1)

Cette opération a pour but, selon FG, de vérifier que 1) la 3ème jambe du puits GT1, dont les opérations de forage se sont conclues début août 2020 (cf. section précédente 4.1.1), est bien connectée à la 1ère jambe et que 2) l'IP était au minimum équivalent à celui mesuré auparavant.

Les protocoles utilisés pendant cet essai sont similaires à ceux des précédents cycles de stimulation en GT1, avec une première injection à environ 75 m³/h (Figure 10), visant à vérifier l'injectivité, suivie par une phase d'acidification en trois étapes pour trois profondeurs différentes du puits, en partant du bas et en remontant vers le haut et en traversant la zone endommagée (environ tous les 200 m).

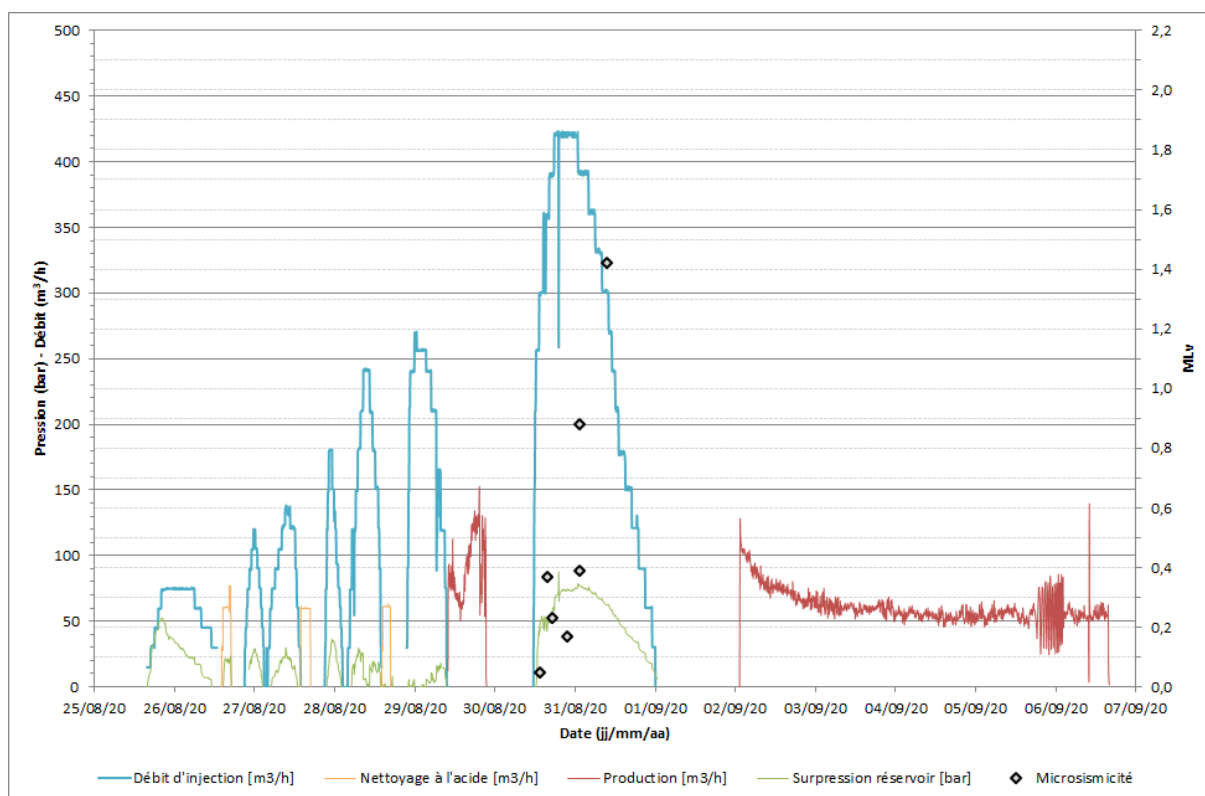


Figure 10 - Opérations menées dans GT1 en août-septembre 2020 et magnitude des événements sismiques enregistrés. Figure extraite du fichier FG_DT_F05-1b_2021-04 de FG.

L'opération d'acidification est réalisée en suivant une stratégie de pré-flush/post-flush, où de l'eau est injectée avant (pré-flush) et après (post-flush) l'injection de l'acide. Selon FG, le pré-flush sert à refroidir le réservoir avant l'injection de l'acide de manière à éviter une réaction trop rapidement (au droit du puits) et donc permettre le nettoyage des failles à distance du puits. Le post-flush, réalisé après un temps d'arrêt d'environ 4 heures pendant lequel l'acide réagit à puits fermé, sert à pousser l'acide dans la formation.

Techniquement, pour réaliser l'acidification aux trois profondeurs différentes le long du puits, FG injecte l'acide à travers les tiges de forage en exerçant simultanément une contre-pression dans l'espace annulaire par une injection d'eau, pour empêcher l'acide de remonter vers le haut. Le débit d'injection pour chacune des trois étapes de l'acidification est augmenté progressivement d'environ 120 m³/h à plus de 250 m³/h.

Selon FG, l'indice de productivité suite à la phase d'acidification est très satisfaisant sur GT1, avec des retombées de pression très rapides témoignant d'un système ouvert. La lecture de FG sur la base de cet essai est que la 3^e jambe a bien été connectée avec la 1^{ère} jambe de GT1 et que le système bénéficie de l'effet cumulé des trois acidifications réalisées successivement dans les trois jambes de GT1.

Suite à l'acidification, FG réalise une phase de dégorgeur du puits suivie par une nouvelle injection de 1,5 jour pour un volume de 10 086 m³ avec un débit maximal d'environ 430 m³/h. Ce débit très élevé s'expliquerait selon FG par le fait qu'il fallait reproduire les mêmes débits atteints pendant les précédentes injections de 2019 pour vérifier si l'IP était au moins équivalent à celui mesuré auparavant. FG estime que l'indice de productivité cible pour ce puits a été atteint et que GT1 est prêt pour travailler en mode « puits producteur » dans un schéma d'exploitation en doublet.

La phase finale de cette opération est constituée par le dégorgement du puits, ce qui a pour but, selon FG, de le nettoyer. A noter que le dégorgement est ici réalisé par artésianisme et non pas par air lift, contrairement à ce qui avait été fait auparavant. En effet, FG considère que l'air lift a eu une part de responsabilité dans le colmatage de la 2^e jambe de GT1 en déstabilisant les parois du puits, en particulier dans les zones de conglomérats.

■ **VDH-GT2 : 16 septembre 2020 – 11 octobre 2020 (deuxième faille - extension ST3),** (voir Figure 1

Il s'agit ici d'opérations menées dans l'extension de GT2, dont le forage s'est terminé en février 2020 (cf. section précédente 4.1.1). La portion ouverte accessible au fluide a plus de 1 500 m de longueur, et sa partie inférieure n'a pas encore été testée.

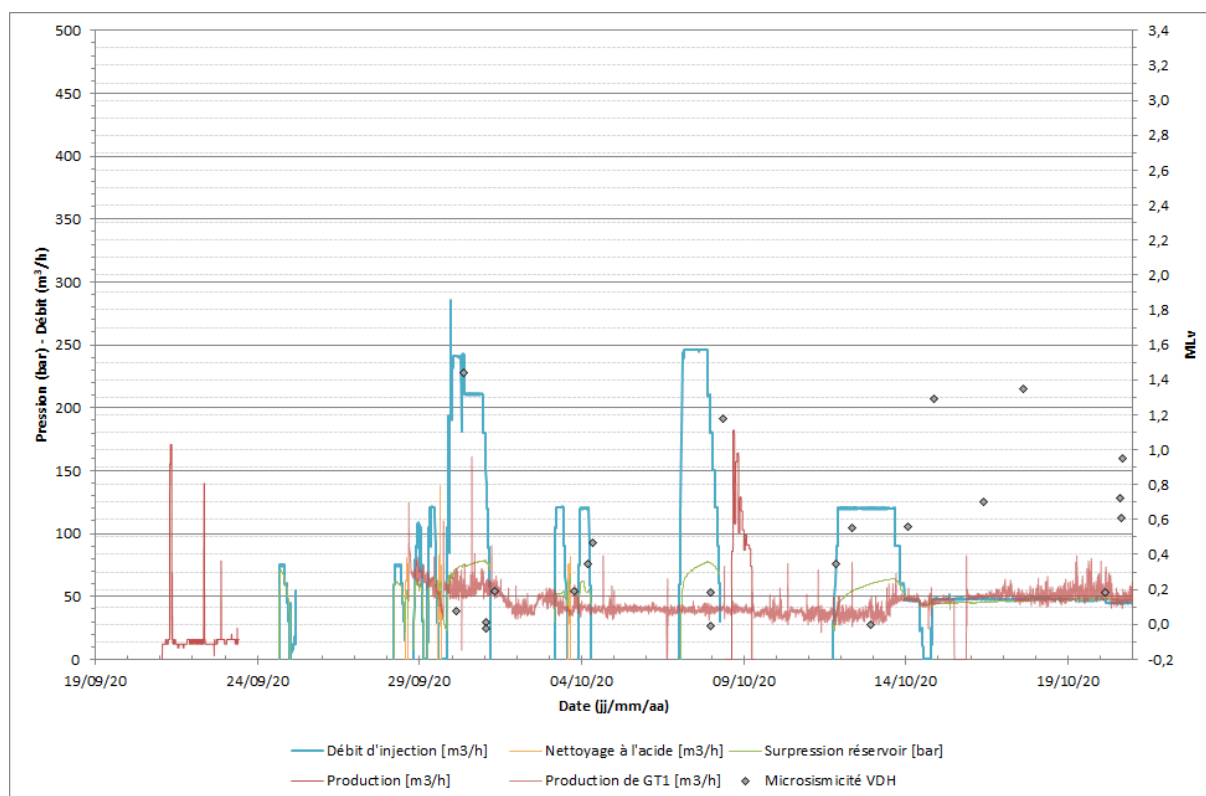


Figure 11 - Opérations entre septembre et début octobre en GT2 et magnitude des événements sismiques enregistrés. Figure extraite du fichier FG_DT_F05-2b_2021-04 de FG.

Selon FG, le réservoir de GT2 est différent de celui de GT1 car GT2 intersecte deux zones de faille dans le socle (la première déjà testée en 2019 et la deuxième plus à l'Est), distantes d'environ 600 m l'une de l'autre, ainsi que deux failles (Fv et Fw) traversées dans le Permien. Pour cette raison, l'idée initiale de FG était de ne pas réaliser l'acidification du prolongement de GT2 en suivant le même protocole appliqué sur GT1 (cf. opération d'août-septembre 2020 en GT1, c'est-à-dire par remontées successives du train de tiges et trois bouchons d'acide), mais plutôt, dans ce cas, de faire l'acidification sous packers. Cependant, la stratégie avec mise en œuvre de packers n'a pas fonctionné car le packer, retenu pour ses spécifications de haute température, s'est déchiré lors de sa descente à cause de la rugosité des parois du puits dans le socle.

FG décide donc finalement d'appliquer la même procédure d'acidification que celle réalisée pour GT1. Il démarre l'acidification en GT2 le 29 septembre 2020 (Figure 11). Même si le protocole d'acidification avec pré-flush et post-flush est similaire à celui utilisé en GT1, les

débites mis en œuvre sont plus faibles car, pour ce test dans GT2, FG applique les règles de prudence établies dans le cadre de la procédure de test de traçage qui imposent un débit maximal de 250 m³/h. FG estime que la deuxième faille de GT2 n'a pas été stimulée autant que sur le puits GT1. L'opération d'acidification se termine avec une nouvelle injection à 250 m³/h pour vérifier l'injectivité, s'en suivent le dégorgement du puits et un test de build-up.

Le 11 octobre, une injection, à 120 m³/h pour un volume de 6 419 m³ et une pression maximale en tête de puits de 93 bar est réalisée dans GT2 (Figure 11). Le débit est ramené à 0 le 14 octobre, l'injection reprend environ 5 heures plus tard, avec un débit d'environ 50 m³/h. Cette opération d'injection-arrêt-injection est réalisée, selon FG, pour simuler l'opération de vidange du bassin (qui sera effectuée avant le futur test d'interférence).

Pendant ce temps, à partir du 28 septembre, GT1 est en production en débit artésien (par seul effet densitaire, la colonne de production chaude étant allégée), entre 40 et 50 m³/h (Figure 11), car FG souhaite ne pas arrêter ce puits afin de ne pas prendre le risque d'avoir un nouveau colmatage.

■ *Circulation en mode doublet : 11 octobre 2020 – 29 octobre 2020, (voir Figure 1*

Suite au cycle d'injection-arrêt du puits GT2 entre le 11 et le 14 octobre, le fonctionnement en mode doublet démarre le 15 octobre avec une production constante de GT1 à environ 50 m³/h et l'injection en GT2 à 50 m³/h (Figure 12). La pompe LSP installée en profondeur commence à être testée sur GT1.

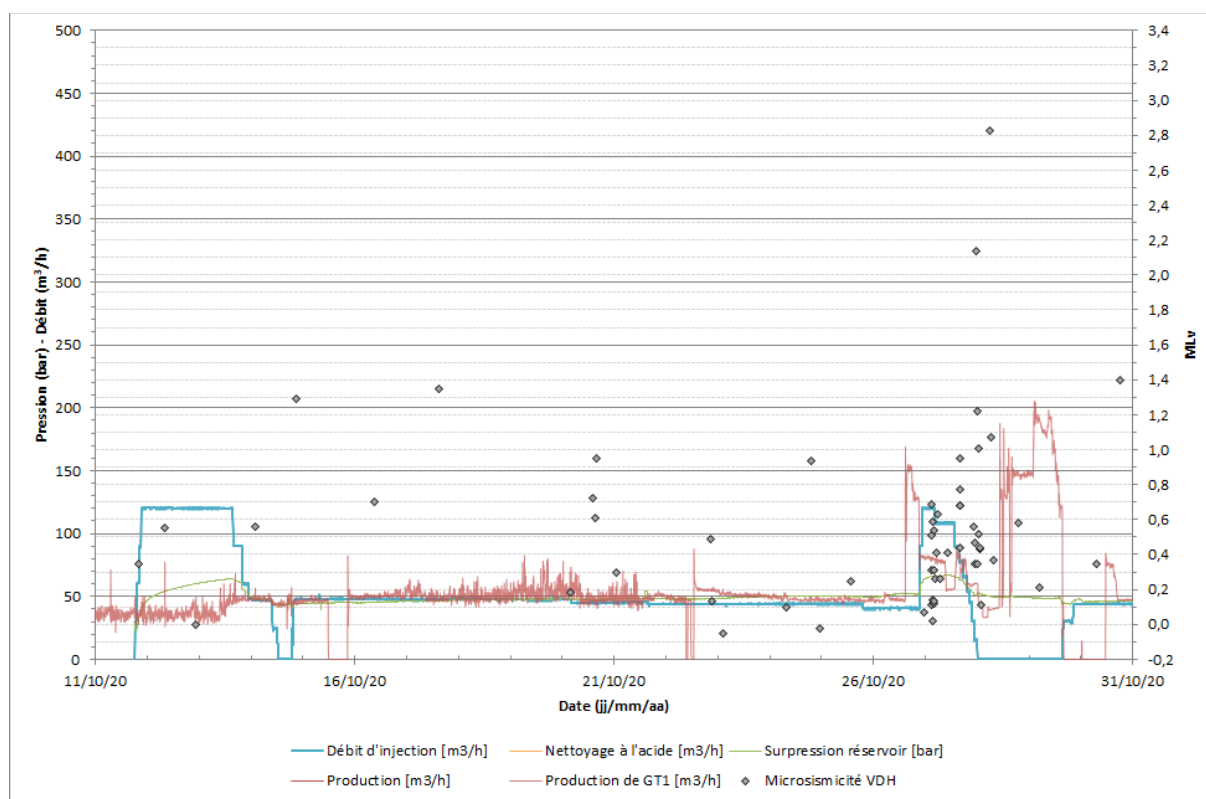


Figure 12 - Opérations entre le 11 et le 29 octobre sur le doublet de Vendenheim et magnitude des événements sismiques enregistrés. Figure extraite du fichier FG_DT_F05-2b_2021-04 de FG.

Vers le 20 octobre des événements sismiques de faible magnitude (MLv < 1) sont observés. FG ajuste les débits en production et injection pour garder une pression stable. Selon FG, les ajustements d'injection se font aussi pour piloter le niveau du bassin de surface : il est

possible d'injecter à un débit plus faible que le débit de production puisqu'il y a une partie du fluide qui s'évapore.

Pour FG, sur la période du 16 au 26 octobre, la pression sur GT2 est stabilisée, la sismicité reste acceptable avec un taux d'occurrence qui est relativement faible, le système est considéré prêt pour la réalisation du test d'interférence.

Le test technique de la pompe est fait le 26 octobre. Quand FG est certain que la pompe peut garantir un débit d'au moins 150 m³/h, une injection est réalisée en GT2, à partir du 26 octobre au soir, pour vidanger le bassin de surface en vue de pouvoir stocker le fluide qui sera produit lors du test à venir (Figure 12). Selon FG, la procédure de vidange (volume, durée, etc.) du bassin a été guidée uniquement par les volumes en jeu, à savoir, sur la base de la taille du bassin de surface et en considérant le volume qui allait être généré par la production de GT1 lors du test d'interférence.

A partir du 27/10 une sismicité persistante est enregistrée et localisée à proximité du puits GT2, avec l'occurrence de deux événements de Mlv 2,1 et 2,8, survenus respectivement le 27/10 à 23h33 et le 28/10 à 05h39.

Le test d'interférence en tant que tel démarre le 28 octobre vers 12h00 avec la mise en production de GT1. Le protocole de test prévoyait trois paliers de production à 150, 200 et 250 m³/h sur une durée d'environ 24h, cependant, suite à la sismicité enregistrée entre le 27 et le 28 octobre, FG décide de ne pas monter jusqu'à 250 m³/h (3ème palier) afin de ne pas générer un rabattement trop fort et donc une déstabilisation par différence de pression trop importante entre producteur et injecteur.

■ Circulation en mode doublet : 29 octobre 2020 – 4 décembre 2020

Suite à la sismicité de Mlv > 2 des 27 et 28 octobre, FG décide de continuer les opérations pour la réalisation du test de traçage, avec l'injection en GT2 et production en GT1 en utilisant un palier d'équilibre en débit artésien, qu'il évalue entre 50 et 80 m³/h.

FG estime que la sismicité du 27 et du 28/10 serait liée aux variations de pression induites lors de la vidange du bassin ce qui justifierait selon FG la décision de poursuivre l'injection à débit dit « d'équilibre artésien » et avec des variations limitées.

Le 29/10 le traceur est injecté dans GT2 et un premier palier d'injection à environ 45 m³/h est réalisé, puis il sera augmenté à 60 m³/h le 2 novembre, car pendant 3 jours à débit constant FG n'avait enregistré aucun événement sismique (Figure 13).

La sismicité reprend vers le 4 novembre avec plusieurs événements localisés autour du puits GT2 (cf. section 4.1.3) et une légère montée en pression. Le débit d'injection est alors à nouveau baissé à environ 50 m³/h le 5 novembre (Figure 13).

La sismicité autour du puits GT2 persiste, notamment avec l'occurrence d'un événement sismique de Mlv 2,3 le 5 novembre survenu juste après la baisse de débit à 50 m³/h (Figure 13). FG indique qu'à ce moment-là cette sismicité est interprétée comme des répliques de l'événement de Mlv 2,8 du 28/10. Le débit d'injection continue à être maintenu à 50 m³/h, puis le 8 novembre, FG observe une montée de la pression d'environ 2 à 3 bars.

Cette montée en pression, ainsi que la sismicité persistante, et la survenue d'un événement de Mlv 2,3 le 8 novembre, conduit FG à commencer des paliers de descente du débit d'injection, qui se poursuivront le 9 novembre, avec pour but de stabiliser la pression.

Le 9 novembre au soir, un événement de Mlv 1,9 est observé, suivi d'un événement de Mlv 2,2 le 11 novembre au matin ; le débit d'injection est alors légèrement supérieur à 40 m³/h.

FG indique que la pression baisse légèrement à partir du 11 novembre, puis elle se stabilise autour du 13 novembre.

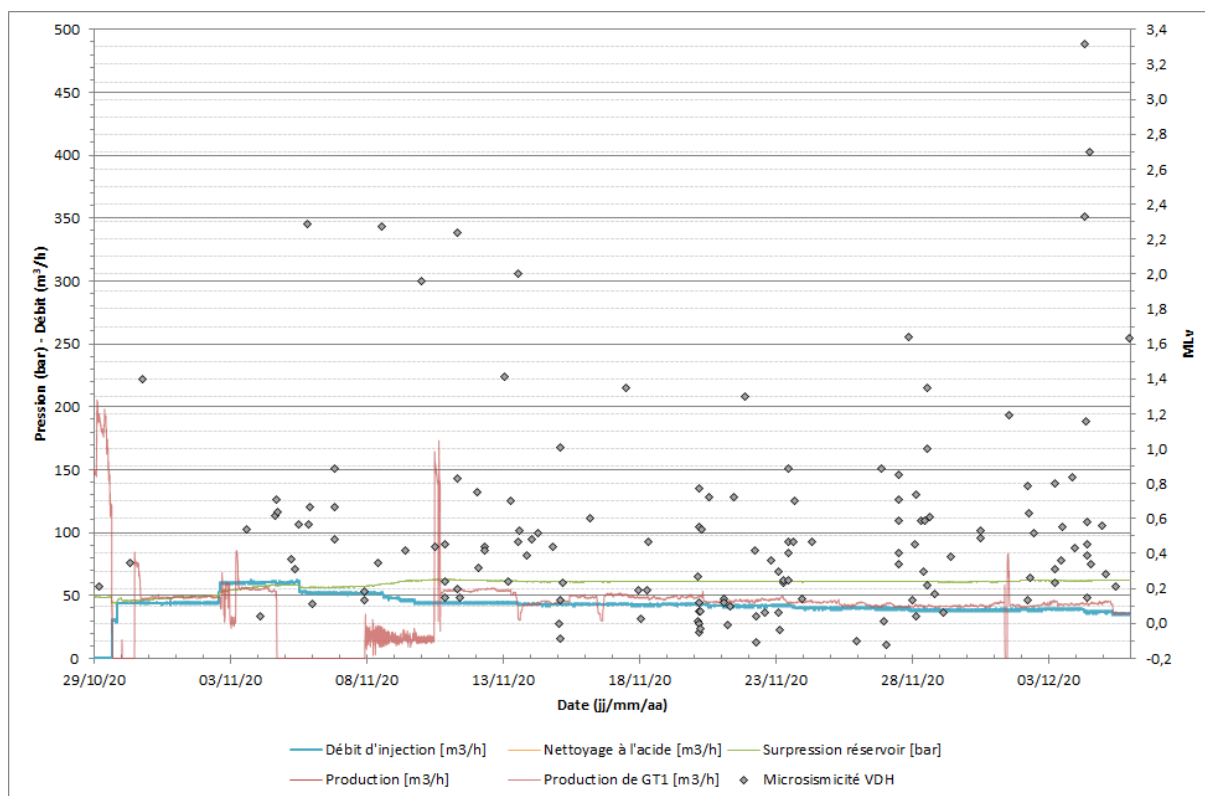


Figure 13 - Opérations en GT1 et GT2 et magnitude des événements sismiques enregistrés entre fin octobre et début décembre 2020. Figure extraite du fichier FG_DT_F05-2b_2021-04 de FG.

Le 13 novembre, un nouvel événement de M_{lv} 2 est observé. Le débit d'injection est alors de $40 \text{ m}^3/\text{h}$. Suite à ces 5 événements sismiques de M_{lv} comprise entre 1,9 et 2,3, entre le 5 et le 13 novembre, FG décide de piloter les opérations d'injection sur la base de certains paramètres d'intensité de la sismicité. Plus précisément, des paliers de descente de $1,5 \text{ m}^3/\text{h}$ étaient prévus pour le débit d'injection en cas d'occurrence de : 1) deux événements sismiques par heure, ou, 2) s'il y avait plus de quatre événements, avec une magnitude inférieure à 1,8, sur 24 heures, ou 3) dès qu'il y avait deux événements entre 1,5 et 1,8 en magnitude et en cas de survenue d'événements de $M \geq 1,8$.

En suivant ce protocole, à partir du 15 novembre et jusqu'au 4 décembre, 4 paliers de descente sont réalisés ; pendant ce temps on observe une sismicité significative en termes de nombre d'événements sismiques mais qui reste de $M < 1,8$ et une surpression sur le réservoir qui semble stabilisée autour de 60 bars selon FG.

Ainsi étant donné la stabilisation de la pression et la baisse de la magnitude des événements sismiques, FG suppose avoir retrouvé le même comportement observé en GT2 lors des stimulations de 2018 et 2019 avec une sismicité rapprochée dans le temps mais dont les magnitudes sont relativement faibles.

■ Arrêt progressif du doublet : 4 décembre 2020 – 2 janvier 2021

, Le 4 décembre un événement de M_{lv} 3,6 est enregistré, suite à quoi la décision est prise d'arrêter l'injection en GT2 en baissant graduellement le débit d'injection, et par conséquent le débit de production, respectivement en GT2 et GT1.

Le protocole d'arrêt de la boucle géothermale, qui est appliqué à partir du 4 décembre, prévoit des paliers de baisse du débit de 1,5 m³/h toutes les 24h qui sont conditionnés par le taux de sismicité et la magnitude des événements enregistrés et notamment :

- 2 événements microsismiques par heure avec $0,5 \leq M < 1,8$
- 4 événements microsismiques sur 24 h avec $0,5 \leq M < 1,8$
- 2 événements microsismiques sur 24 h avec $1,5 \leq M < 1,8$
- 1 événement de $M \geq 1,8$

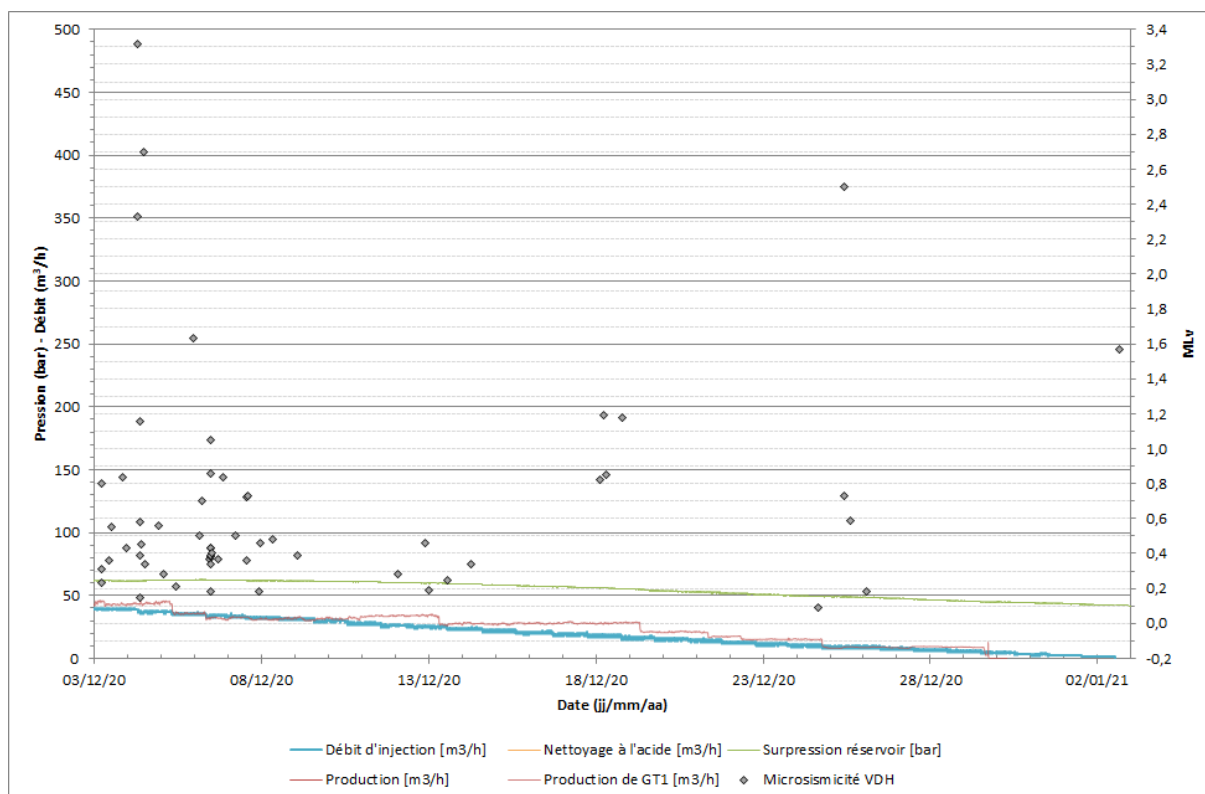


Figure 14 : Débit d'injection (en GT2), débit de production (en GT1), surpression sur le réservoir et magnitude des événements sismiques observés entre le 3/12/20 et le 02/01/21. Figure extraite du fichier FG_DT_F05-2b_2021-04 de FG.

Dans les cas susmentionnés, les paliers de débit sont stabilisés et une nouvelle baisse est possible seulement après 24h avec une sismicité inférieure aux seuils imposés.

En suivant ce protocole, le débit d'injection est définitivement ramené à 0 m³/h le 2 janvier 2021 (Figure 14). Du 4 décembre au 2 janvier, la sismicité reste relativement faible avec l'occurrence d'un seul événement de $M > 2$ le 25 décembre.

4.1.3. Résumé des observations de FG sur la sismicité d'octobre à décembre 2020

Sur la base des localisations des événements sismiques (Figure 15) enregistrés entre octobre et décembre 2020, FG indique les observations suivantes :

- Avant le 26/10/2020 la sismicité se localise principalement en fond de puits GT2, dans une zone appelée essaim 1 par FG (en bleu en Figure 17)
- A partir du 26/10, la sismicité se localise à des profondeurs moins élevées, toujours dans le socle, dans une zone qui est interprétée par FG comme l'enracinement dans le socle des failles sédimentaires FV et FW. Cette zone est appelée par FG essaim 2

(en vert en Figure 15). C'est dans cette zone que se localise l'événement de M_{lv} 2,8 enregistré le 28/10/20, ainsi que celui de M_{lv} 2,1 du 27/10.

- A partir de début novembre la sismicité se localise à la fois dans l'essai 1 et 2. Les événements de $M_{lv} \geq 2$ observés entre le 5 et le 11 novembre sont tous localisés dans l'essai 2 (voir Figure 17 en bas), en fond de puits GT2.
- A partir de la mi-novembre, un nouvel essaim, dit essaim 3 par FG (en rouge en Figure 17), est observé en fond de puits GT2, légèrement au-dessus de la zone de l'essai 1.
- FG identifie un quatrième essaim (en orange en Figure 17) qui se localise entre les essais 2 et 3 et qui s'active en particulier entre le 10 et le 15 novembre.
- Début décembre la sismicité se localise en fond de puits GT2, dans la zone des essais 1 et 3, ainsi qu'au toit du socle, dans la zone de l'essai 2 (Figure 17 en bas). Les séismes de plus forte magnitude observés en décembre, notamment l'événement de M_{lv} 3,6 du 04/12/2020 et celui de M_{lv} 2,5 du 25/12, sont tous localisés dans la zone de l'essai 1 (Figure 17) en fond de puits GT2.

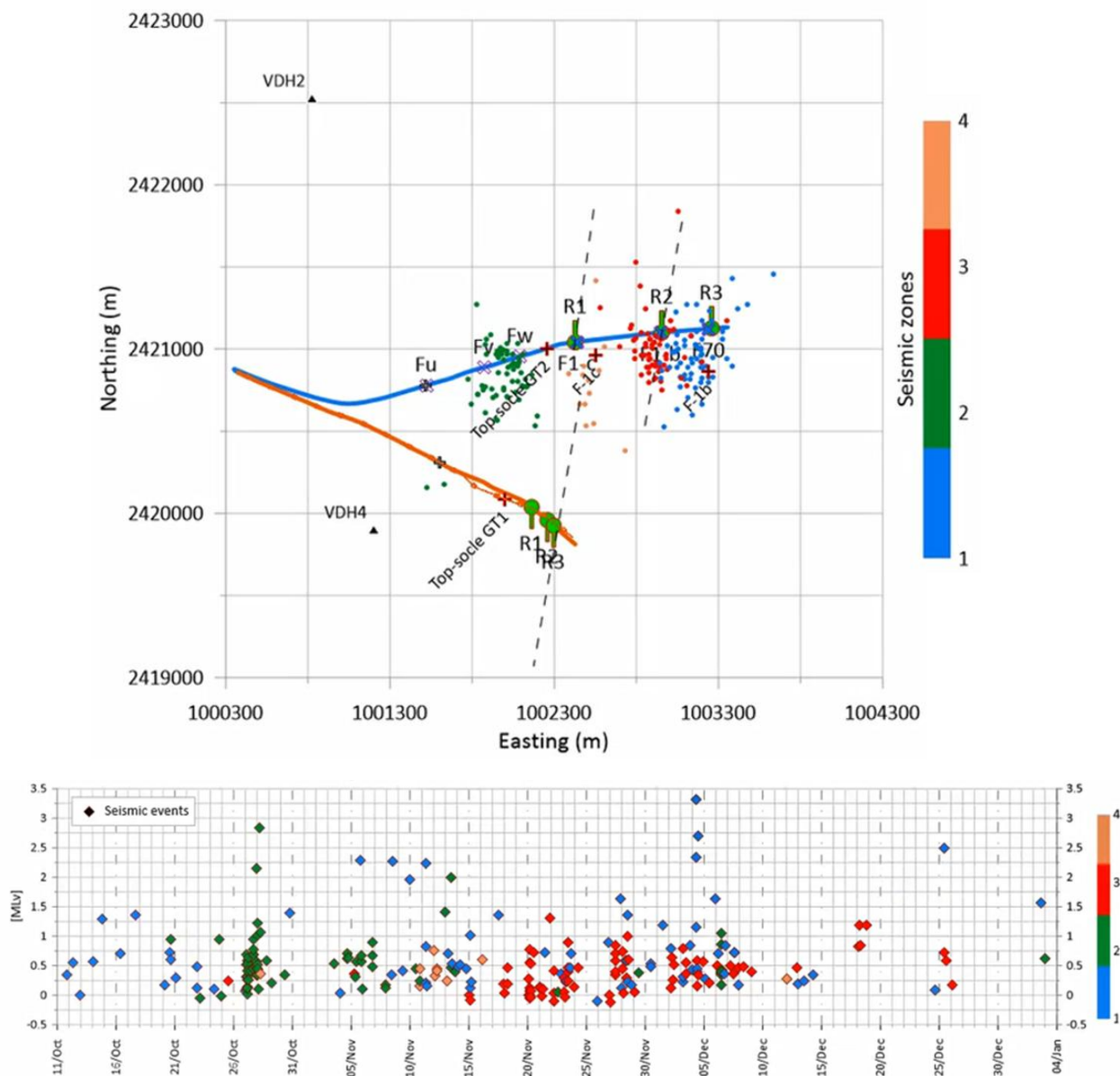


Figure 15 : Identification d'essais sismiques par FG sur la base de la localisation de la sismicité. Image du haut : distribution spatiale des essais sur le plan horizontal. Image du bas : distribution temporelle des essais. Images montrées par FG lors de l'audition du 9 juin 2020.

Sur la base de l'analyse des mécanismes au foyer calculés pour les événements sismiques de magnitude parmi les plus élevées, FG indique que ces séismes mobilisent des failles d'orientation N40 quel que soit l'essai sismique.

4.2. Avis préliminaire du CE

4.2.1. Discussion sur les essais hydrauliques d'août 2020 en GT1

Les essais hydrauliques réalisés entre août et septembre 2020 en GT1 sont présentés par FG comme des opérations de nettoyage des puits et indiqués comme des tests intermédiaires préalables à la réalisation du test d'interférence et de traçage.

Compte tenu des débits (jusqu'à 430 m³/h) et des volumes injectés (~10 000 m³), cette opération constitue pour le CE 'une stimulation chimique et hydraulique massive de GT1, de la même envergure que celles réalisées entre 2018 et 2019. Clairement, il ne peut s'agir, d'une opération de nettoyage en préparation du test d'interférence.

Les débits et les volumes injectés lors de ces essais d'août 2020 auraient plutôt pour but d'entraîner une nouvelle transformation du réservoir. Cela ne peut rentrer dans le cadre d'une préparation au test d'interférence, ce dernier ayant pour objectif d'évaluer la connexion hydraulique entre les puits dans un réservoir préalablement stabilisé dans un régime hydraulique proche de l'état permanent.

4.2.2. Discussion sur la vidange du bassin et le test d'interférence d'octobre 2020

Avant la réalisation du test d'interférence, qui démarre le 28 octobre, FG réalise des opérations préliminaires (voir Figure 16 ci-après) :

- Concernant GT1, le 26/10, débit à 150 m³/h, il s'agit d'un test de la pompe LSP (ce test n'était pas indiqué dans le protocole FG).
- Le 26/10, à minuit environ, vidange de la fosse, et injection dans GT2, avec un débit qui passe soudainement de ± 40,8 m³/h à ± 85 m³/h puis 120 m³/h. GT1 est en production avec une pression de ± 80 bar.
- On constate que l'augmentation du débit d'injection (courbe bleue, sur la Figure 16) pour GT2 le 26/10/2020 vers 21h, passée de 40,8 m³/h à 120 m³/h en ±2 heures, a été suivie, environ 3 heures après, d'une augmentation du taux de sismicité, avec l'occurrence de 16 événements microsismiques de faible magnitude (Mlv < 1) sur une période de 4 heures environ (voir Figure 16).
- La réduction du débit d'injection le 27/10/2020 à 13h, de 108 m³/h à 0 m³/h en 12 heures, a conduit à une nouvelle hausse de la sismicité, ainsi qu'à l'augmentation des magnitudes, avec 5 événements sismiques de 1 < Mlv ≤ 2,8. Les événements de magnitude maximale, Mlv 2,1 et Mlv 2,8, se sont produits respectivement le 27/10/2020 à 23h33, quand le débit en GT2 était à 15 m³/h, et le 28/10/2020 à 05h39, soit plus de 5 heures après l'arrêt de l'injection et la fermeture de GT2 (voir Figure 16).

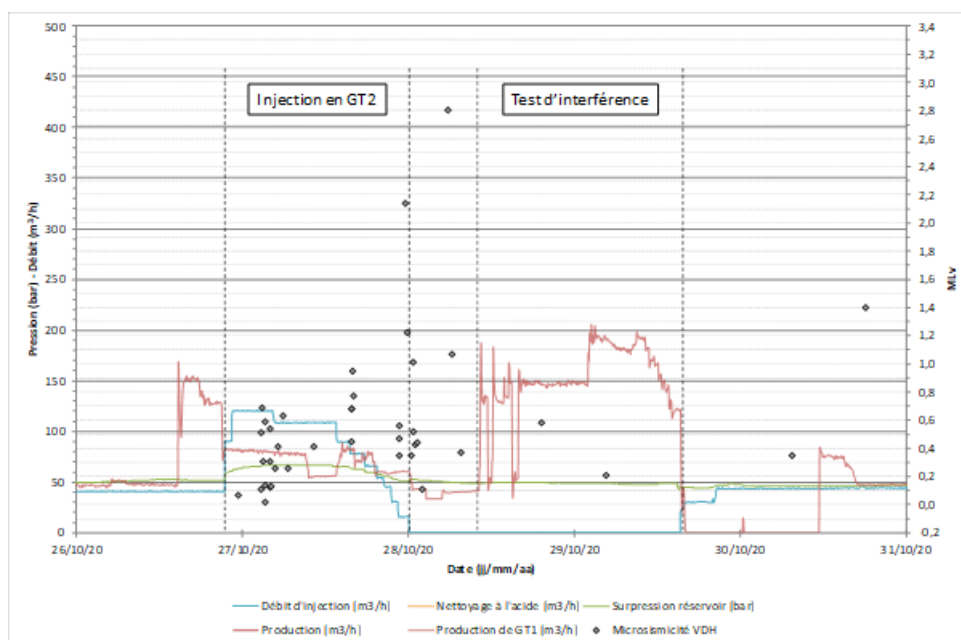


Figure 16 : Mesures des débits d'injection (GT2, courbe bleue) ou production (GT1, courbe rouge), surpressions réservoir (en GT2, courbe verte) et microséismes enregistrés sur la période du 26 au 31 octobre 2021 (figure de FG)

Il convient de remarquer que l'opération d'injection en GT2 pour la vidange du bassin préalablement au test d'interférence avait été très peu détaillée dans la note de Fonroche Géothermie FG_NT_F01-b_2020-10, datée du 8 octobre 2020.

Il est à noter aussi que l'injection en GT2 ne suit pas le protocole de test établi par FG dans la note sous-mentionnée qui indiquait : « Afin de conserver le niveau de 6000 m³ (soit une marge de sécurité par rapport au 7000 m³ de contenance du bassin d'eau géothermale), le surplus sera vidangé par filtration dans VDH GT2, à un débit qui n'excédera pas le débit artésien, estimé entre 10 et 30 l/s [soit 36 m³/h et 108 m³/h]. Le débit sera éventuellement régulé sur VDH GT2 en injection pour rester en débit de perte naturelle, sans surpression sur le réservoir ». Pendant la phase de vidange du bassin, FG a injecté avec une pression en tête de puits allant jusqu'à 85 bars et avec un débit maximal de 120 m³/h, qui dépassent les limites annoncées dans le protocole.

Le CE se questionne également sur le choix de la vitesse d'arrêt de l'injection, ainsi que de la durée des paliers de descente du débit. En effet, environ 2 400 m³ de fluide sont injectés en GT2 entre le 26/10 à 22h et le 28/10 à 00h, soit en 26 heures. L'injection est montée à 120 m³/h. La descente de 110 m³/h à 0 m³/h a duré 8 heures. Une opération similaire avait déjà été réalisée par FG entre le 11/10 et le 14/10 (voir Figure 17) en injectant au même débit (120 m³/h), pendant 68 heures environ ; la descente avait été plus progressive, de 120 m³/h à 0 m³/h, réalisée en presque 24 heures. Cette dernière opération n'avait pas engendré une sismicité significative, tant en fréquence d'événements qu'en valeur de magnitude (voir Figure 17). Par ailleurs, du point de vue du bilan en eau dans le réservoir profond à cette date, le CE souligne qu'en complément des injections réalisées en octobre sur GT2, il est aussi nécessaire de tenir compte des 10 930 m³ encore présents dans GT1 dans le cadre d'un nettoyage à l'acide réalisé par FG le 30-31 août 2020 (source FG_DT_F05-1_2020-08.xls).

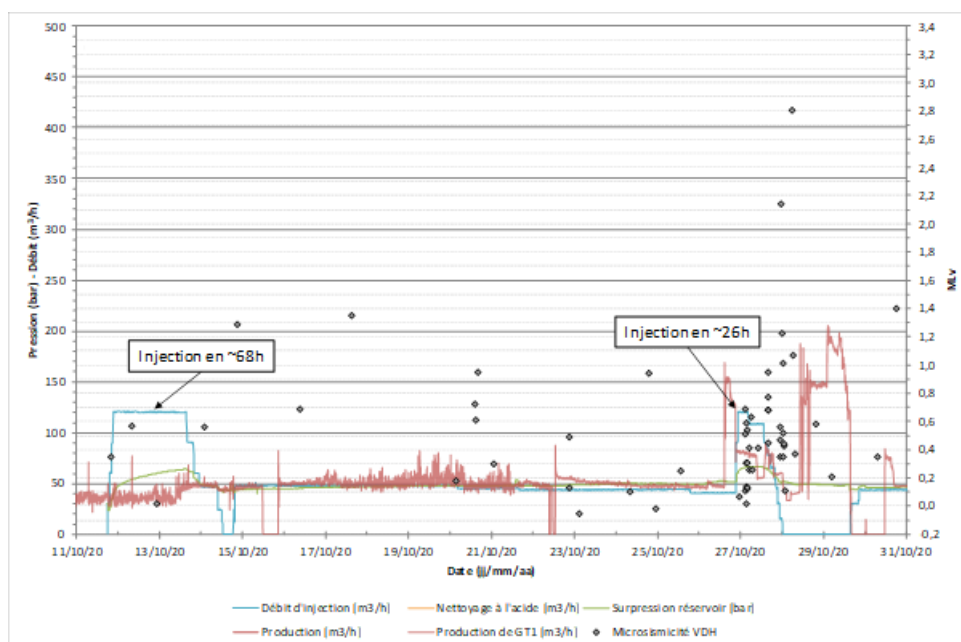


Figure 17 : Mesures des débits d'injection (GT2, courbe bleue) ou production (GT1, courbe rouge), surpression réservoir (en GT2, courbe verte) et microséismes enregistrés sur la période 11 au 31 octobre 2021 (figure de FG)

Concernant le test d'interférence proprement dit on observe les points suivants :

- Le 28/10, mi-journée, redémarrage de la pompe LSP, il s'agit du premier palier prévu dans le protocole du test d'interférence, avec un débit minimum à 150 m³/h (Figure 16). Le CE reproduit en détail cette séquence, sur la base des données de GT1 transmises par FG, en Figure 18. La courbe de production sur GT1 est très chaotique. Le rabattement se fixe autour de 260 m, pour l'extraction de 150 m³/h (41 l/s), alors qu'il était de 160 m pour extraire 40 m³/h (11 l/s). Dans le même temps, il n'y a pas d'injection sur GT2, et la pression n'est pas stabilisée sur GT1 après 12 h.
- Le 29/10, c'est le second palier prévu dans le protocole du test d'interférence, avec un débit minimum de 200 m³/h. Ce palier de 200 m³/h n'est pas vraiment atteint. La pompe LSP fournit 185 m³/h (51 l/s) et la phase ne dure que 8h. En fait, pour augmenter la production de 10 l/s, un rabattement supplémentaire de 210 m est nécessaire (Figure 20). Tout se passe comme si le réservoir n'était pas capable de produire le débit maximal prévu de 200 m³/h. Néanmoins, l'arrêt rapide du 29 novembre à 12h provoque une remontée brusque de la pression dans le puits, d'environ 240 m (24 bars) en moins de 3h. L'étude de la propagation vers GT2 d'une telle perturbation n'a pas été engagée en dépit de son amplitude élevée.
- Le CE s'interroge sur la nature du signal que FG a choisi comme observable en GT2 dans ce test d'interférence et des moyens préparés pour suivre cette observation. Pour rappel, une caractérisation similaire a été menée sur le site de Rittershoffen, le 14 septembre 2014. Un palier d'injection suivi d'un arrêt sur le puits GRT2 a entraîné un saut de pression de 4 bars. Cette perturbation a été détectée quelques heures plus tard sur le puits GRT1, à l'arrêt depuis plusieurs semaines, grâce à un capteur de fond. La sensibilité de ce capteur était supérieure à 0,01 bar. A Vendenheim, le puits GT2 venait d'être perturbé les jours précédents le test d'interférence. Le CE se demande si FG espérait voir en GT2 une perturbation (déphasage, amplitude) sous l'effet d'un rabattement par pompage dans GT1 pendant 3 jours à 150 puis 200 m³/h. Le CE remarque que dans ce cas, une opération de cette nature s'est déjà déroulée du 24 au 24 octobre 2019 (Cf. pendant une stimulation de GT1 suivie d'un test de

production par air lift, alors que GT2-ST2 était fermé depuis plusieurs semaines. L'enregistrement en pression en tête de GT2 était disponible (avec le suivi surpression calculée par FG), montrant en première analyse une décroissance régulière et monotone. Ce suivi n'a pas encore été étudié en détail par le CE (mais il est possible qu'il contenait déjà, une partie de la réponse cherchée en 2020).

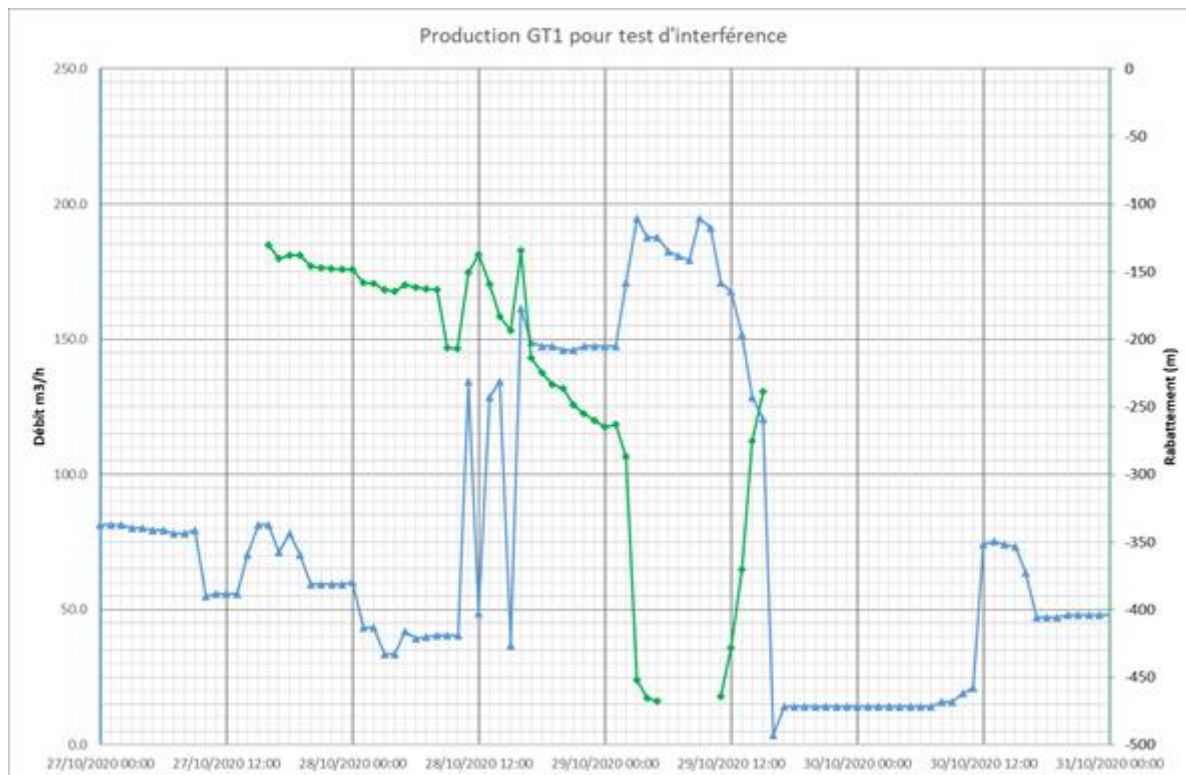


Figure 18 : Production dans GT1 pour le test d'interférence, le 28 et 29 octobre 2020 : débit de production (courbe bleue) en [m³/h] et rabattement dans le puits (courbe verte) en [m]

4.2.3. Discussion sur la sismicité d'octobre 2020

Le CE constate que l'intensification de la sismicité, en termes de nombre et magnitude des événements sismiques, observée entre le 27 et le 28 octobre 2020, a eu lieu pendant la phase d'injection dans GT2 (voir Figure 16) qui avait pour objectif de vidanger le bassin en prévision de l'augmentation du débit de production en GT1 pour le test d'interférence. Suite à la densification des événements sismiques le 27 octobre autour de 4h du matin lors de l'injection à 120 m³/h, on note que FG a diminué le débit à 108 m³/h, puis a entamé un processus d'arrêt de l'injection à partir de 13h, en diminuant de façon rapide le débit injecté, celui-ci passant de 108 m³/h (jusqu'au 27/10 13h) à l'arrêt (le 28 octobre à 1h) en 12 heures. Cet arrêt s'est traduit par une augmentation du nombre et de la magnitude des événements sismiques induits (jusqu'à M_lv 2,1 à 23h30, soit quelques dizaines de minutes avant l'arrêt complet de l'injection, et M_lv 2,8 à 5h39, soit 4h30 après l'arrêt de l'injection).

La sismicité d'octobre 2020, qui a vu l'occurrence de deux séismes de M ≥ 2, n'est donc pas une conséquence du test d'interférence car elle intervient avant le démarrage de ce test et pendant la phase de vidange du bassin, préparatoire au test. Les causes de cette sismicité sont probablement à rechercher dans le mode opératoire de la vidange du bassin réalisée le 27/10, et notamment aux fortes variations de débit d'injection (d'abord en montée puis en descente) réalisées sur un temps très court, mais aussi en prenant en compte l'ensemble des opérations d'injection réalisées dans l'extension de GT2 (ST3) qui ont mené à l'injection

de 85 127 m³ de fluide entre le 16 septembre et le 29 octobre 2020. Ces volumes importants de fluide injecté ont aussi probablement impacté la sismicité enregistrée autour du doublet à partir d'octobre 2020.

4.2.4. Discussion sur les opérations menées depuis le 29 octobre et jusqu'à début novembre 2020

Après l'occurrence de plusieurs séismes de $M > 2$ entre le 27 et 28 octobre, FG poursuit les opérations d'injection en GT2 le 29/10 pour la réalisation du test de traçage, en utilisant un débit d'injection entre 45 et 60 m³/h que FG estime être un débit d'équilibre. Dans ce contexte, le CE s'interroge sur le choix de poursuivre les opérations d'injection ainsi que sur le protocole d'injection mis en œuvre par FG à partir du 29/10. En effet, il aurait été plus prudent selon le CE d'arrêter au moins temporairement les opérations sur les puits après la sismicité des 27 et 28 octobre, afin d'analyser et interpréter à la fois le test d'interférence qui venait d'être réalisé, ainsi que la sismicité occasionnée. Une telle analyse aurait permis d'évaluer si et dans quelles conditions une reprise des opérations était envisageable.

Par ailleurs et compte tenu des observations précédentes, le modèle de mise en sécurité du doublet choisi et mis en place par FG depuis le 29/10 est discutable. En effet, FG fait le choix de piloter l'injection sur la base d'un débit dit d'équilibre qui vise donc à équilibrer les volumes produits en GT1 avec ceux injectés en GT2. L'intérêt de cette pratique pour FG est de pouvoir envisager un fonctionnement sur le long terme compatible avec un test de traçage, puisqu'elle résout le problème de stockage en surface dans les bassins tampon de capacité limitée.

Cette approche est discutable car, en premier lieu, elle se base sur un simple équilibre de masse en surface. En second lieu elle ne repose pas du tout sur l'existence d'un régime hydraulique permanent en profondeur, seul à même de garantir un fonctionnement sur la durée. Or cette stabilisation n'est qu'apparente et n'a pu être obtenue que par des ajustements à la baisse des quantités injectées dans GT2. Ceci montre que les transferts éventuels de pression entre les deux puits, ou entre les puits et le champ lointain, ne sont pas assez rapides pour que ce régime quasi permanent soit atteint dans le cadre de cet essai. L'équilibre comptable des masses sortie et entrée en surface ne correspond pas à un équilibre mécanique en termes de pression exercée sur le réservoir. Ce concept d'équilibre de masse adopté par FG aurait été valide si une connexion hydraulique de qualité avait existé entre chacun des puits et le champ lointain, ou entre les deux puits, ce qui au moment de la réalisation de ces essais restait encore à vérifier. Cela représentait en effet l'objectif du test d'interférence et du test de traçage.

4.2.5. Discussion sur la sismicité de novembre et décembre 2020

Sur la base des données mises à disposition par FG, et notamment les localisations des événements sismiques enregistrés (document FG_DT_F06-6e_2021-07-01), nous constatons que la sismicité survenue à partir de début novembre se localise toujours autour de GT2, comme pour la sismicité d'octobre, mais les événements, y compris ceux de magnitude maximale du 5 novembre au 4 décembre, sont en grand partie observés dans une zone plus profonde du réservoir par rapport à la sismicité enregistrée entre le 26 et le 30 octobre 2020 (voir Figure 19).

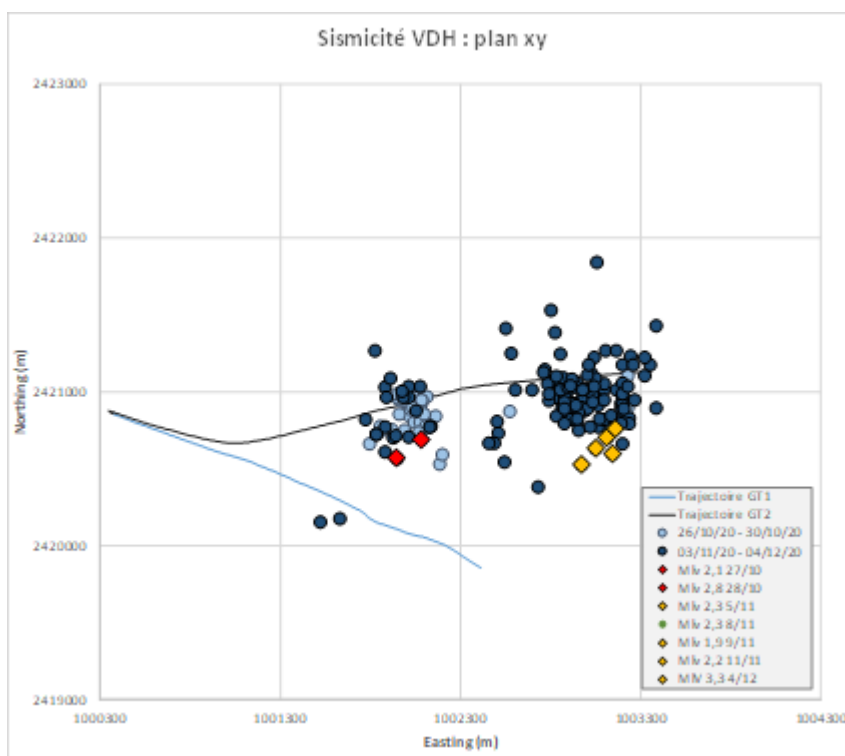


Figure 19 : Localisation des événements sismiques de fin octobre (cercles en bleu clair) et entre début novembre et début décembre 2020 (cercles bleu foncé). Les événements sismiques de magnitude maximale sont indiqués en rouge pour la période de fin octobre et en jaune pour la période novembre-décembre. Figure produite sur la base des localisations fournies par FG dans le fichier FG_DT_F06-6e_2021-07-01.

Cette différence marquée dans la localisation des événements d'octobre et novembre suggère que ces deux séquences sismiques ont mobilisé des segments de failles différents et distants, et que, par conséquent, les événements de novembre ne peuvent pas être classés comme de simples répliques de la sismicité d'octobre.

Les événements sismiques localisés par FG montrent clairement une migration de la sismicité vers le fond de puits GT2 à partir de début novembre 2020. Dans cette zone, du 5 au 13 novembre, la sismicité est régulière, avec plusieurs événements de magnitude $Mlv > 2$ sur quelques jours d'intervalle. Cette instabilité en cours est soutenue par la mise en pression continue du fond du puits GT2 due à l'injection. En d'autres termes, même en injectant à débit constant, la surpression appliquée sur le réservoir était telle que les critères de stabilité des structures en fond de puits étaient dépassés, entraînant une dynamique de faille avec des glissements (i.e. sismicité) répétés dans le temps. Le maintien de l'injection dans la deuxième moitié de novembre n'a fait qu'augmenter ce phénomène d'instabilité en conduisant à l'occurrence du séisme de magnitude 3,6 survenu le 4 décembre dans la même zone sismique que celle du 5 au 13 novembre (cf. note de l'EOST du 11 nov 2020).

L'occurrence de ce phénomène d'instabilité était déjà visible lors des événements sismiques survenus dans la première quinzaine de novembre, par conséquent nous constatons qu'il aurait été plus prudent d'arrêter les injections après la sismicité de début novembre et questionnons le choix de FG de maintenir l'injection.

De plus, il convient de remarquer que la sismicité de novembre, localisée en fond de puits GT2, a lieu dans une zone qui n'était pas sismiquement active auparavant, contrairement à la sismicité d'octobre qui a lieu dans une zone du réservoir qui avait déjà produit des séismes lors des stimulations en 2019. Cette observation est probablement en relation avec

l'effet dit de Kaiser, selon lequel une zone ayant subi un premier dommage au cours d'un chargement mécanique restera inactive tant qu'elle ne se trouve pas sollicitée par un chargement supérieur. Ainsi la séquence qui a abouti à l'événement du 28 octobre, démarre le 27 octobre lorsque la surpression dépasse la valeur de 70 bar (sur la figure 19 selon Fonroche), valeur qui correspond à des niveaux de pression déjà atteints en 2019 sur GT2-ST2 (voir aussi les figures 13 et 25). Les deux nouveaux événements majeurs de cette séquence se localisent à la marge de l'essaim de 2019, en partie haute du réservoir à proximité des failles FV et FW.

- Pendant la période de fin septembre 2020, puis du 12 au 26 octobre, la partie supérieure du réservoir a à nouveau expérimenté ce niveau de pression, avec un volume moindre qu'en 2019 : elle est donc peu sismogène.
- En même temps (fin septembre 2020), la nouvelle partie profonde ST3 est soumise, pour la première fois, au même scénario de surpression que dans la partie supérieure : elle devient sismogène (figure 1g et figure 17, essaim 1), les événements sont toutefois de faible magnitude.
- Entre le 12 et 26 Octobre, ~22000 m³ sont injectés sans que l'on connaisse la répartition entre la partie supérieure et profonde de GT2.
- La phase du 27-28 Octobre a suffi à ce qu'un critère conjuguant volume et pression soit atteint en partie supérieure du réservoir, provoquant alors l'événement du 28 Octobre. Cette partie haute ne sera plus le siège d'une activité majeure par la suite.

Par conséquent, nous soulignons que les événements profonds enregistrés depuis novembre 2020 sont aussi une conséquence de l'approfondissement et du prolongement du puits GT2 qui a atteint 5 000 m de profondeur en février 2020. Nous soulignons aussi que les éléments de fractures ou failles en partie profonde de GT2 en lien directe avec la jambe ST3 du puits GT2 ont été capables de supporter mécaniquement un volume (inconnu) de fluide associé à des surpressions de plusieurs dizaines de bar jusqu'à la date du 28 Octobre 2020. Par la suite, les événements majeurs seront tous localisés dans cette zone.

4.2.6. Localisation relative de la sismicité et analyse des mécanismes au foyer par FG

Les techniques avancées de relocalisation des événements sismiques (hypoDD) doivent permettre d'obtenir des images haute-résolution de la sismicité avec, s'il y a lieu, la mise en évidence d'alignements de séismes, et donc, indirectement, la position et l'orientation du (ou des) plan(s) de faille(s) sollicité(s). FG a procédé à ce type de traitement pour ce qui concerne la sismicité de fin 2020 (Figure 20). Leurs résultats sont très similaires aux localisations absolues : il n'y a pas d'alignement visible. En dépit de ce traitement a priori plus sophistiqué des données, ces résultats n'apportent aucune valeur ajoutée à l'interprétation de la sismicité. N'y a-t'il en effet aucun alignement qui se détache ? ou doit-on revoir les traitements appliqués par FG ?

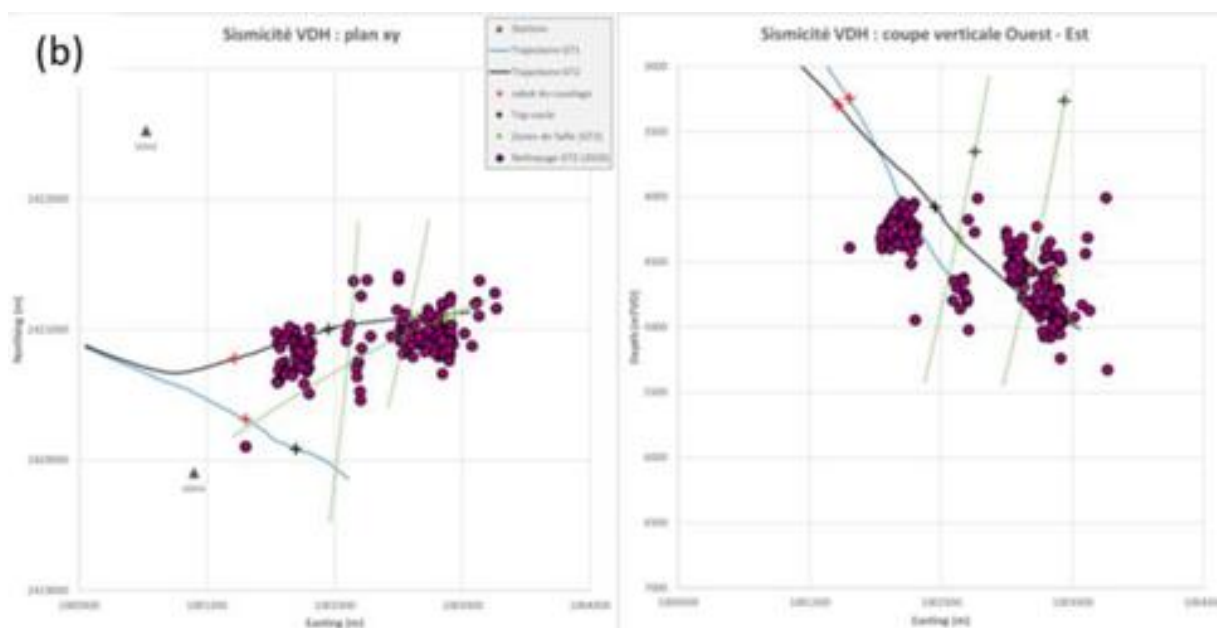


Figure 20 : Résultats de FG sur la relocalisation relative réalisée avec hypoDD pour les événements de fin 2020 (Figure de FG).

Indépendamment des logiciels utilisés, l'estimation du mécanisme au foyer d'un séisme conduit généralement à l'obtention de deux plans de glissement possibles qui sont respectivement le plan principal et le plan auxiliaire. Il s'agit des deux plans nodaux, ils sont perpendiculaires entre eux). Le choix du plan le plus probable (i.e. principal) est basé sur les connaissances du régime de contraintes local ainsi que sur l'orientation des failles (lorsqu'elles sont connues).

Concernant le calcul des mécanismes au foyer des séismes, FG indique utiliser deux logiciels (Focmec et Fpfit), ces derniers utilisent comme données d'entrée les informations sur la polarité des ondes P, le pendage ainsi que l'azimut entre la source et la station. Dans les résultats obtenus, quel que soit le séisme considéré, FG a choisi le plan d'orientation NE-SW (N40) comme plan de faille possible pour les événements de fin 2020. L'hypothèse que ces séismes puissent avoir eu lieu le long d'un plan de direction NW-SE (N130) n'a pas été retenue par FG.

L'EOST a produit une note d'information en date du 11 novembre 2020 avec l'analyse de la sismicité de novembre 2020 enregistrée par le réseau du RéNaSS. Comme indiqué dans cette note, les résultats de relocalisation de la sismicité montrent un alignement des événements les plus forts observés entre le 5 et le 11 novembre le long d'une structure d'orientation N140. Par ailleurs, l'EOST indique que les mécanismes aux foyers de ces événements sont tous cohérents et montrent un plan possible de glissement dans cette direction. Le CE observe que FG n'a pas pris en compte ces éléments pour réévaluer ses interprétations. Cela aurait probablement permis de mieux appréhender les phénomènes en cours et de mieux évaluer le risque associé.

A noter de plus qu'en se référant à l'analyse de l'état de contrainte local (ou régional ?), l'orientation NW-SE des failles semble moins stable que celle NE-SW (voir Figure 22). Or FG a retenu non seulement un seul plan nodal mais, en plus, probablement le plus stable des deux. Ceci démontre une insuffisance dans l'analyse de stabilité des failles et dans le choix du plan nodal.

4.2.7. Discussion sur les modèles géomécaniques du réservoir

La compréhension de la sismicité de $M_{lv} > 2$ autour de GT2 (fin 2020 et juin 2021) nécessite de bien cerner les interactions entre l'état de contrainte in situ, la géométrie des failles de taille suffisantes pour héberger des séismes de magnitude $M_{lv} > 2$ et des surpressions injectées lors des opérations en forages.

Dans ce contexte, trois rapports ont été effectués par la société Q-Con mandatée par FG visant à produire des analyses de slip tendency sur les failles du modèle structural de FG. Notons que le slip tendency est le rapport contrainte cisailante sur contrainte normale, reflétant la capacité à faire glisser une faille et donc permettant d'évaluer le risque de glissement (i.e. sismicité). Le premier rapport de 2014 fait état du slip tendency sur les failles modélisées dans le premier modèle structural d'exploration (Figure 7 dans le rapport Q-Con 2014, voir aussi Figure 23a de notre rapport d'expertise), et 2 autres rapports ont été édités fin 2020 faisant état des slip tendency et delta P (variation de pression) nécessaire pour faire glisser les failles du modèle révisé début 2020 (Figure 23b et c). Il est précisé que la géométrie du modèle, les valeurs et orientations des contraintes et la friction utilisée pour calculer les delta P ont été fournies par FG à Q-Con. Dans le rapport de 2014 l'état de contrainte utilisé est justifié sur la base des profils estimés à Soultz-sous-Forêts. Notons que l'orientation choisie pour S_H (contrainte maximale horizontale) n'est pas clairement précisée car il est fait référence à N150 pour l'échelle du Graben du Rhin et N170 pour Soultz-sous-Forêts. L'orientation N150 est globalement cohérente avec les données d'imagerie de puits <4500 m MD obtenues dans GT1, avec les orientations de fractures conductrices et de fracturation induite. On peut supposer que l'état de contrainte utilisé est celui de Soultz-sous-Forêts (N170) car le rapport Q-con détaille les équations issues de ce site. On pourrait aussi supposer que cet état de contrainte (andersonnien décrochant) et son orientation sont corrects car les mécanismes au foyer dans le socle (e.g. note de l'EOST du 27/06/2021) semblent en décrochement et cinématiquement cohérent avec cette orientation de contrainte. Enfin, notons que dans les rapports de 2020, peu de précisions sont données sur l'état de contrainte utilisé. Dans le premier rapport de 2020, il est juste précisé que les contraintes utilisées ont été fournies par FG. Dans le second rapport de 2020, il est mentionné que l'orientation de S_H est calculée en considérant un état critique sur la faille F040 (pour que les contraintes permettent la rupture sur cette direction de faille), dont la présence est discutable (voir section 3.4). Notons aussi que les calculs du delta P nécessaire pour activer les failles sont obtenus en négligeant la cohésion des failles.

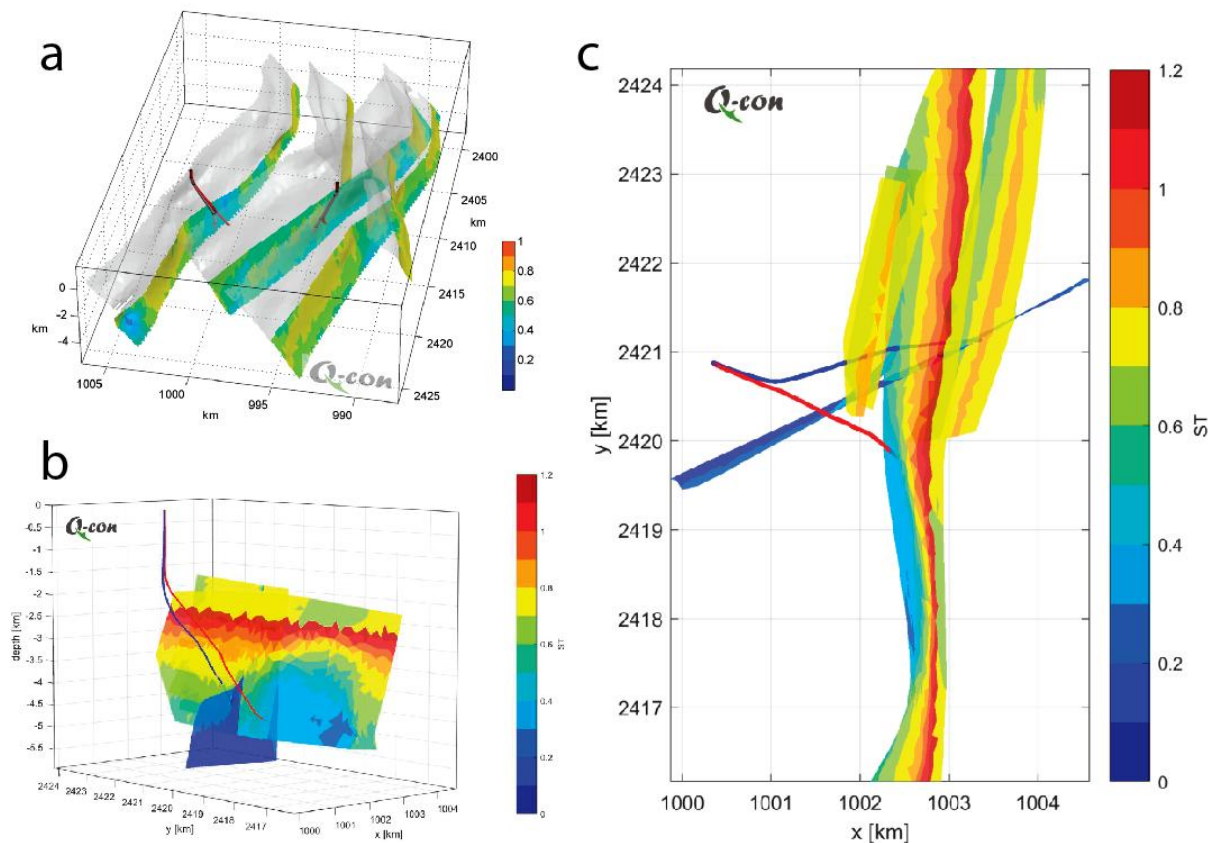


Figure 21 : Résultats du slip tendency (ST) modélisé par Q-Con sur les failles du modèle d'exploration de 2014 (a) et les failles du modèle révisé début 2020 (b et c).

Il ressort de ces analyses qu'avec la géométrie de faille et les contraintes utilisées, les slip tendency sont peu élevés sur les zones d'intersection entre les forages et les plans de failles (environ 0.4-0.6, Figure 23 issue du rapport Q-Con 2020). De ce fait, ces modèles ne permettent pas d'expliquer la sismicité observée car selon le modèle la zone en fond de puits est relativement stable. Dans cette zone, une instabilité mécanique serait possible selon le modèle Q-Con pour des surpressions sur le réservoir supérieures à 100 bars (voir le deuxième rapport de 2020), ce qui n'a pas été le cas car une forte sismicité s'est produite fin octobre et début décembre 2020 autour de GT2 alors que le niveau de surpression ne dépassait pas les 100 bars dans GT2 à ces périodes là (Figure 1).

Dans le premier rapport de 2020 (Figure 23b et c), le détail du slip tendency montré sur plusieurs failles et notamment la faille supposée être F1B (les noms de failles ne sont pas précisés) présente un gradient marquant une diminution du slip tendency avec la profondeur. Notons que la variation du slip tendency sur une surface de faille est due à l'orientation relative de la surface de faille par rapport aux contraintes, ainsi qu'à la magnitude et au rapport des contraintes appliqué en champ lointain. Les résultats du modèle de 2014 ne présentaient pas de tels gradients aussi marqués vers le bas, et concernaient pourtant des failles d'orientation et de pendage globalement similaires (la direction de pendage importe peu sur ces calculs en contexte décrochant). Aucune précision n'est donnée quant à la différence de résultats obtenus sur ce point entre le modèle de 2014 et les modèles de 2020 (Figure 23), sur l'origine de ce gradient avec la profondeur ou encore sur les choix d'une cohésion nulle. Rappelons par ailleurs qu'il n'existe pas de données précises issues des

forages GT1 et GT2 qui auraient pu servir à contraindre ces modélisations de possibilités de glissement des failles.

Les résultats obtenus par Q-con sont de nature imprécise et discutables car le modèle structural utilisé est globalement sous contraint, mais aussi car peu d'indications sont données sur l'origine des variations du slip tendency calculées sur les failles. A l'état actuel, ces modèles ne permettent pas d'expliquer l'occurrence de la sismicité en fond de puits GT2 observée fin 2020. Par ailleurs, il convient de remarquer que ces modèles n'intègrent pas la possibilité de glissement sur des failles optimalement orientées N130-N140, tel que discuté dans la section 3.4 et qui semble possible au regard de la distribution cartographique de la microsismicité enregistrée et relocalisée par l'EOST (voir aussi la Figure 24 et la section 7).

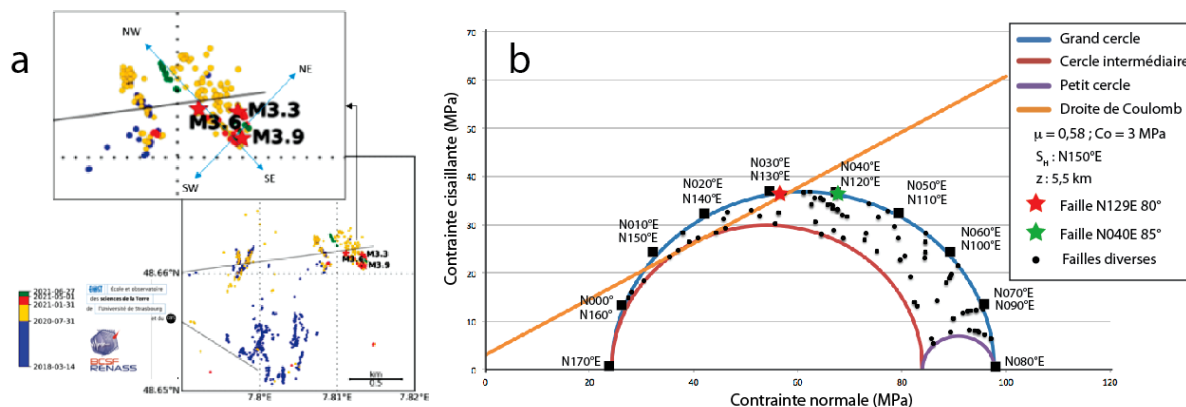


Figure 22 : Orientation de sismicité et stabilité des failles. (a) Orientation de la microsismicité mesurée et relocalisée par l'EOST entre mars 2018 et juin 2021. (b) stabilité des failles en fonction de leur orientation. Des valeurs d'azimut de failles verticales sont données le long du grand cercle, indiquant la sensibilité de la stabilité des failles et du slip tendency (rapport contrainte cisailant sur contrainte normale) en fonction de leur orientation. Deux exemples (étoile rouge et verte) sont choisis au regard des deux directions déduites des alignements présentés en (a). Cette figure suggère que les failles d'azimut compris entre N130 et N150 sont bien moins stables que des failles d'azimut compris entre N040-N070.

Au regard des données de forage, la faille principale ciblée est en segments, probablement avec un principal relai dont la disposition des principaux segments est en échelon dextre, i.e. le segment Nord est situé droite (à l'Est) du segment Sud (Figure 9). D'éventuelles failles de connexion cinématiquement cohérentes avec un tel relais, si elles existent telles qu'intégrées dans le dernier modèle 3D de FG, doivent être orientées N040 à E-W et donc optimalement orientées pour présenter une forte contrainte normale (voir Figure 24) et ainsi être hydrauliquement peu conductrices. Par contre, s'il existe des failles N130 dans cette zone de relais, comme cela semble être possible d'après les alignements de microséismes et la géologie régionale (Figure 24a), ces failles ne sont pas optimalement orientées pour connecter les deux segments principaux et les forages, mais sont par contre optimalement orientées pour générer des séismes et conduire les fluides dans une direction différente. Si la taille de ces failles est assez importante et que le différentiel de friction statique et dynamique est fort sur ces failles, cette configuration peut être propice à la génération de séismes de magnitude importante, tels que mesurés fin 2020 et en juin 2021.

4.3. Proposition d'analyses complémentaires

Afin de pouvoir davantage se prononcer sur la compréhension de la sismicité sur le site du doublet géothermique de Vendenheim, il est important de développer plusieurs approches qui seront détaillées dans les sections suivantes.

Modèles géologiques et hydrogéologiques alternatifs

Le modèle de FG n'intègre pas tous les éléments issus des analyses de microsismicité et de mécanismes au foyer en particulier ceux produits par le RéNaSS. Il sera donc nécessaire de produire de nouveaux modèles structuraux alternatifs basés sur une analyse des différents plans nodaux obtenus des mécanismes aux foyers, des alignements sismiques observés et des magnitudes locales pour estimer les dimensions minimales de surfaces de failles. Par ailleurs, les modèles devront être contraints par les données de forages en utilisant les lois d'échelle d'épaisseur, de segmentation et connexion aux relais, essentielles à utiliser pour contraindre plusieurs alternatives de modèle structural. Enfin, sur la base des modèles structuraux choisis et des analyses de stabilité (section 3.3.2), il semble important de ré-évaluer la perméabilité du réservoir et de proposer une ou plusieurs alternatives au modèle hydrogéologique 3D de FG. Des tests de simulation d'écoulement pourraient être comparés aux données de débits obtenues dans les puits.

Réévaluation des données pertinentes au modèle des contraintes

Les informations de présence et d'absence de rupture en puits ainsi que les chroniques de pression et les informations de mécanisme au foyer devraient être ré-évaluées afin de supporter et d'affiner le modèle local des contraintes.

Analyse fine des chroniques débit-pression-sismicité

Une analyse fine de la propagation de la sismicité et des évolutions de pression aux puits devrait permettre de mieux comprendre les mécanismes d'activation de la sismicité dans l'espace proche du puits GT2. Ces données pourront être comparées avec des lois empiriques et des séquences similaires d'autres projets de géothermie profonde afin d'évaluer les caractéristiques spécifiques du système de Vendenheim.

Analyse de la stabilité des failles sur la base de la synthèse de données de contraintes, pressions fluides, et de différents modèles structuraux.

Nous discutons ci-dessous les analyses complémentaires qui pourraient permettre d'évaluer la stabilité des failles dans la zone de Vendenheim. Ainsi il sera possible de tester quelles sont les géométries de failles et les mécanismes les plus probables en jeu à Vendenheim dans la génération de la sismicité de 2020 et 2021. Cela pourra permettre de mieux comprendre l'origine de la sismicité et les mesures de mitigation à prévoir pour les projets de géothermie électrogène sur faille (tel qu'à Vendenheim) en cas de faible injectivité mesurée dans les forages.

Une étape préliminaire consistera à effectuer des calculs simples de contraintes normales et cisailantes appliquées aux plans de failles des modèles alternatifs. Sur cette base, des slip tendency, closure tendency et des delta P (pressure to failure) seront calculés sur les nouveaux modèles alternatifs. Ces résultats seront comparés aux données de sismicité induite.

Une deuxième étape comprendra la modélisation numérique paramétrique de la stabilité des failles sur les différents DFN (*Discrete Fracture Network*) alternatifs construits préalablement. Elle débutera par une étude du choix des constantes et des intervalles de variables à considérer, contraints par données de forage, des contraintes régionales et données analogues bibliographiques. Ainsi, le calcul de slip tendency, closure tendency, delta P, de glissement et de contraintes quasi-statiques pourra être effectué directement sur les failles des modèles alternatifs, et les premiers calculs effectués aux préalables pourront servir de validation (benchmarks) des modèles. Les résultats issus d'études paramétriques à plusieurs variables seront comparés aux données sismiques mesurées afin d'identifier les

configurations les plus probables et les mécanismes ayant généré la sismicité. Une attention particulière sera accordée à la modélisation de l'effet des variations de pressions, sur la perturbation en orientation et magnitude des contraintes dans le réservoir, et de son impact sur la stabilité des failles.

4.4. Objectif N°1 – Principaux points à retenir

La sismicité d'octobre 2020, avec l'occurrence de deux événements de M_l 2,1 et 2,8, respectivement le 27 et le 28 octobre, n'est pas une conséquence du test d'interférence car elle intervient avant le démarrage de ce test et pendant la phase de vidange du bassin en surface. Les causes de cette sismicité sont à attribuer aux fortes variations de débit d'injection sur un temps très court, mais aussi aux volumes importants ($85\,127\text{ m}^3$) de fluide injecté depuis septembre 2020 dans l'extension de GT2 (ST3).

La sismicité de début novembre 2020 se localise, en grand partie, en fond de puits GT2, à des profondeurs plus importantes par rapport à l'activité sismique d'octobre 2020. Cela indique que les séquences sismiques d'octobre et novembre ont mobilisé des segments de failles différents et distants. Par conséquent, les événements de novembre ne peuvent pas être considérés comme des répliques de la sismicité d'octobre. Les causes de cette sismicité sont plutôt à rechercher dans la mise en pression en continue du fond du puits GT2 due à l'injection, qui a entraîné une instabilité des failles intersectées par l'approfondissement du puits GT2.

Le maintien de l'injection, même à débit réduit, après la sismicité de début novembre n'a fait qu'incrémenter ce phénomène d'instabilité avec un chargement continue du système, tant en volume qu'en pression, ce qui a ensuite conduit à l'occurrence du séisme de magnitude 3,6 du 4 décembre. Le CE constate qu'il aurait été plus prudent d'arrêter les injections dès la survenue des événements sismiques de $M > 2$ du 27 et 28 octobre et s'interroge sur la poursuite des injections même après les événements de début novembre 2020, alors que plusieurs séismes de magnitude supérieure à 2 avaient été enregistrés.

Pour ce qui concerne les opérations réalisées avant le test d'interférence, le CE considère que l'opération d'août 2020 sur GT1 (ST9), indiquée par FG comme étant une opération de nettoyage des failles, s'apparente plutôt à une stimulation hydraulique vu les volumes injectés et des débit atteints. Dans ce cas, cette stimulation n'avait pas lieu d'être dans le cadre de préparation des puits au test d'interférence. Sachant par ailleurs que dans ses recommandations, le BRGM/INERIS soulignait la prudence nécessaire en termes de débits, volumes injectés, temps de paliers, etc.

Il apparaît dans la procédure suivie par FG un enchaînement des tests réalisés de l'été à l'automne 2020 sans qu'il y ait eu un temps d'arrêt nécessaire et suffisant pour une analyse fiable et complète des données, ainsi que pour la prise en compte des risques de sismicité. L'enchaînement très rapide des tests serait justifié selon FG par l'instabilité du puits GT1 qui risquait de se colmater à nouveau en cas d'arrêt du débit de production. Le CE constate donc que c'est la programmation des tests successifs réalisés entre l'été et l'automne 2020, sans attendre des états de stabilisation des réservoirs, avec des volumes injectés importants, ainsi qu'une connaissance insuffisante du contexte structural et des conditions géodynamiques qui a conduit à la sismicité de fin 2020 et 2021.

Le CE observe que la recommandation, émise lors de la tierce-expertise BRGM/Ineris en février 2020, d'adopter une stratégie plus sécuritaire pour la reprise des opérations n'a pas été suivie dans la mesure où des volumes significatifs de fluides ont été injectés dans le réservoir à des pressions et débits souvent élevés, notamment lors de l'opération dans GT1 d'août 2020. Par ailleurs, FG a continué à guider les opérations sur la base de la surpression réservoir et non pas sur la mesure de la pression en tête de puits, comme suggéré dans le

rapport de tierce-expertise. Enfin, FG ne semble pas avoir adopté des scénarii alternatifs basés sur une mauvaise connexion hydraulique entre les puits. Au contraire les protocoles de mise en sécurité du doublet mis en œuvre par FG après la sismicité de fin octobre 2020 se sont basés sur l'hypothèse d'une connexion hydraulique entre les puits.

5. Objectif N°2 – Réévaluation du lien entre les opérations à Vendenheim et l'essai de Strasbourg (2019)

5.1. Synthèse de l'historique des opérations entre 2017 et 2019 selon Fonroche Géothermie

Dans cette section, nous synthétisons l'historique des opérations de foration et stimulation tel que décrit par FG lors des auditions du 4 mai et du 9 juin. Il s'agit ici des opérations menées en GT1 et GT2 entre 2017 et 2019, pour lesquelles un focus particulier sera fait sur les opérations de stimulation du deuxième semestre 2019.

5.1.1. L'évolution des puits entre 2017 et 2019

■ VDH-GT1 : 14 juin 2017 – 27 février 2018 (1^{ère} jambe - ST4)

Le forage du puits GT1 démarre en juin 2017 avec l'objectif d'atteindre la faille régionale cible d'orientation N20 (dite F1B par FG - voir Figure 8c). Des nombreuses difficultés techniques (problèmes de boue, d'orientation du puits, de mécanique des roches, de tenue du puits, de température, etc.) ont été rencontrées en atteignant les couches inférieures du sel triasique, en dessous de 2000 m de profondeur. Plusieurs side tracks (ST) ont donc été réalisés pour résoudre les problèmes techniques de forage (voir Tableau 2) et passer les coincements des outils. Après la traversée du Trias, le forage rencontre des niveaux permien, grès fins, argilites et conglomérats, non connus auparavant, ce qui nécessite une nouvelle adaptation des travaux de percement, notamment en termes d'outils de forage.

Le projet initial de FG prévoyait d'atteindre la faille cible à l'interface Permien-socle. Celle-ci est traversée dans le socle, 200 m à l'est de l'endroit initialement prévu et la géométrie de la faille cible s'avère plus complexe que prévu car la faille semble présenter une structure asymétrique (Figure 11). La température du réservoir (qui atteint environ 210°C sur GT1) est supérieure à celle attendue de 185°C. Les effets thermiques au fond du puits sont donc plus importants et induisent de nouvelles problématiques de forage, notamment de refroidissement des outils ainsi que de viscosité de la boue de forage. Le gradient thermique semble être « non linéaire » (i.e. non constant avec la profondeur). FG exclut l'occurrence de phénomènes liés à des boucles convectives telles qu'observées dans d'autres sites géothermiques, comme par exemple à Soultz.

La foration de GT1 se termine en février 2018 et un premier test hydraulique est réalisé dans le puits (voir section 0). Cependant, lors de cet essai un câble est perdu créant un bouchon à 5140m MD (TVD 4600m) dans le puits et il ne pourra pas être récupéré. Le bouchon sera traversé par un outil qui sera cassé à son tour. Un test d'acidification est mené. Une deuxième jambe est prévue pour contourner le bouchon. Après le bouchon, il y a une perte importante que FG considère comme la zone réservoir. Le puits atteint 5400 m (MD).

■ VDH-GT2 : 16 août 2018 – 05 février 2019 (phase 1 : « première faille »)

Le forage du puits GT2 commence en août 2018 mais les travaux sur GT2 sont surtout développés à partir de décembre 2018. D'après FG, il s'agit ici d'un réservoir avec deux failles (dites F1B et F1C), dont la première, plus à l'ouest, est choisie comme cible des opérations de forage. Quand la première faille à l'ouest est forée par GT2, FG s'aperçoit que celle-ci est moins épaisse que la faille cible de GT1 mais que ses caractéristiques pétrologiques sont similaires. FG arrête le forage de GT2 à cette première faille pour la tester.

■ VDH-GT1 : 16 février 2019 – 7 septembre 2019 (2ème jambe - ST7)

En février 2019, les opérations de foration de GT1 reprennent avec l'objectif de réaliser une deuxième jambe sur le puits pour contourner la zone où le câble avait été perdu et se reconnecter au réservoir.

5.1.2. Essais hydrauliques et chimiques entre 2018 et 2019

■ VDH-GT1 : 28 février 2018 – 17 mars 2018 (1ère jambe – ST4)

Cette opération prévoyait une phase d'acidification suivie par la stimulation hydraulique du puits. Cependant, suite à la perte du câble dans le puits lors de cet essai (voir section 5.1.1, la stimulation hydraulique n'a pas pu être mise en œuvre et le test s'est arrêté à la phase d'acidification.

■ VDH-GT2 : 27 avril 2019 – 16 mai 2019 (« première faille » - ST2)

Ce premier test sur GT2 consiste à réaliser une phase d'acidification, suivie par la stimulation hydraulique du puits. Un dégorgeement du puits à l'air-lift est ensuite réalisé avec le but de nettoyer le puits. Enfin, une nouvelle stimulation hydraulique est réalisée.

■ VDH-GT2 : 25 juin 2019 – 12 juillet 2019 & 29 juillet 2019 – 18 septembre 2019 (première faille - ST2)



Figure 23 : VDH-GT2 - Détail des trois stimulations thermiques de 2019 de GT2 - Evolution de la 'pression' (en fait surpression estimée non mesurée) en trait vert et du débit en trait bleu en fonction du temps. Les losanges de couleur représentent la magnitude (Mlv) des différentes phases de sismicité induite au voisinage du puits (Figure de Fonroche Géothermie). Cette figure contient des données relevant de la propriété industrielle et a donc été retirée de la version publique du rapport.

Après les stimulations chimiques et hydrauliques du puits VDH-GT2 au printemps 2019 (27/04/2019-16/05/2019), FG estime que l'injectivité du puits n'est pas suffisante. Après avoir interprété les résultats préliminaires des recherches et modélisations effectuées par des partenaires et sociétés extérieures (e.g. BESTEC, les différents partenaires du projet DeepEGS), FG conduit des tests thermiques pour essayer d'améliorer l'IP du puits selon trois protocoles différents (Figure 25).

- Le premier protocole (du 25/06/19 au 12/07/19) consiste à injecter de l'eau à 12°C pendant une période courte (2-3 j) puis d'arrêter l'injection pour relaxer la pression. Ce protocole est reproduit trois fois sans que la pression puisse être stabilisée. Suite à la deuxième tentative qui a généré beaucoup de sismicité avec des événements de magnitude proche de Mlv 2, le débit a été réduit lors de la 3^e tentative (de 120 m³/h à 90 m³/h). La pression ne s'étant stabilisée à aucune tentative, le test est considéré comme un échec et un autre protocole est testé.
- Le deuxième protocole (du 29/07/19 au 22/08/19) consiste à injecter une eau à 13°C à un débit très faible (30 m³/h) pendant des périodes plus longues (4 à 10 j). La pression dans le réservoir croît continuellement sauf peut-être en toute fin de test et la réponse sismique du réservoir est différente. Le test est aussi considéré comme un échec.
- Le troisième protocole (du 26/08/19 au 18/09/19) est une méthode encore différente. Il s'agit de l'injection de la même eau (13°C) mais par pulses. Les résultats sont considérés comme un peu meilleur avec une sismicité qui semble limitée, i.e. sans

produire d'événements importants. Les pentes de relaxation de la pression après les tests sont particulièrement regardées pour voir si elles augmentent avec les stimulations, ce qui traduirait une amélioration de l'injectivité, mais ce n'est pas le cas. Le puits est fermé le 18 septembre et la baisse lente de pression est observée jusqu'au 24 octobre. La pression est ensuite relâchée dans le puits le 27/10/19.

Il est conclu que la première faille traversée par le puits GT2 n'est pas la faille qui permettrait d'avoir une relation hydraulique telle qu'attendue avec le puits GT1.

- VDH-GT1 : 03 octobre 2019 – 27 octobre 2019 (2ème jambe – ST7)



Figure 24 : VDH-GT1 - Stimulations chimique et hydrauliques de la deuxième jambe de GT1 en 2019 - Evolution de la 'pression' (en fait surpression estimée non mesurée) en trait vert, du débit d'injection (en trait bleu) et du débit de production (en trait rouge) en fonction du temps. Les losanges de couleur représentent la magnitude (Mlv) des différentes phases de sismicité induite au voisinage du puits. (Figure Fonroche Géothermie) Cette figure contient des données relevant de la propriété industrielle et a donc été retirée de la version publique du rapport.

La deuxième jambe de GT1 a été finalisée en septembre 2019. Il s'agit dans cette période du 2^e semestre 2019 de tester les propriétés hydrauliques de cette deuxième jambe.

La première stimulation réalisée début octobre (du 9/10/2019 au 13/10/2019), Figure 24 est une stimulation chimique selon un protocole en trois phases d'acidification tel que décrit en section 4.1.2. Après l'acidification, des pulses d'injection sont réalisés avec l'objectif selon FG de vérifier l'amélioration de l'indice d'injectivité. Elles induisent une activité sismique avec des événements de magnitude jusqu'à Mlv 1,6.

Est menée ensuite une stimulation hydraulique de GT1 du 13/10/19 jusqu'au 15/10/19 (voir Figure 26). Le débit est monté à 450 m³/h à deux reprises. Une activité sismique plus importante est enregistrée (jusqu'à Mlv 1,9). Deux plus petites stimulations hydrauliques sont menées les 17 et 18/10/19. FG estime que l'indice de productivité (IP) est proche de 2 ce qui est considéré comme un résultat satisfaisant. Le puits est alors dégorgé et mis en production avec un test à l'air-lift (injection d'air comprimé dans le puits) de forte puissance pendant plusieurs jours. Ce test à l'air-lift sera identifié plus tard comme le test qui a détérioré le puits et nécessité la réalisation d'une 3^e jambe. Une nouvelle stimulation hydraulique importante à 330 m³/h est menée du 25 au 28/10/19 pour vérifier les propriétés d'injectivité du puits. La pression semble rester stable durant ce test (Figure 24).

- VDH-GT2 : 05 novembre 2019 – 07 novembre 2019 (première faille - ST2)



Figure 25 : VDH-GT2 - Dernière stimulation hydraulique de GT2 (ST2 - première faille) en Nov 2019 Evolution de la 'pression' (en fait sur-pression estimée non mesurée) en trait vert, du débit d'injection (en trait bleu) et du débit de production (en trait rouge) en fonction du temps. Les losanges de couleur représentent la magnitude (Mlv) des différentes phases de sismicité induite au voisinage du puits. (Figure Fonroche Géothermie) Cette figure contient des données relevant de la propriété industrielle et a donc été retirée de la version publique du rapport.

Avant la stimulation hydraulique de novembre 2019 (du 5/11/19 au 6/11/19), une centaine de stations sismiques autonomes sont déployées sur la zone entre les puits GT1 et GT2 pendant quelques jours avec le support de la société GALLEGRO. L'objectif était de suivre

finement la sismicité induite par la stimulation afin d'améliorer la cartographie structurale des failles dans le réservoir.

Dans GT2, le 5/11/2019 une injection à haut débit (450 m³/h) est réalisée (Figure 27). Rapidement la pression dans le réservoir atteint des niveaux élevés. En conséquence, le débit est abaissé puis arrêté après 24h. Aucune sismicité n'est enregistrée pendant ce test où 6861 m³ ont été injectés dans GT1 (cf FG_DT_I02e_2021-08-06.xlsx). Le puits est alors mis en production pour être dégorgé puis ouvert pour relâcher toute la pression. C'est la dernière opération menée sur GT2 en configuration 'première faille'. Ensuite le puits sera prolongé à la recherche de la « 2^e faille ». En effet, à la suite de cet essai et sur la base de tests de build-up, FG conclut que le puits GT2 est connecté à un réservoir de plus petite taille par rapport à celui de GT1. FG s'engage alors dans l'extension de GT2 pour intersecter la deuxième faille attendue du réservoir.

■ VDH-GT1 : 05 novembre 2019 – 08 novembre 2019 (2^{ème} jambe – ST7)



Figure 26 : VDH-GT1 - Dernière stimulation de GT1 (version ST7 - deuxième jambe) en Nov 2019 - Évolution de la 'pression' (en fait surpression estimée non mesurée) en trait vert, du débit d'injection (en trait bleu) et du débit de production (en trait rouge) en fonction du temps. Les losanges de couleur représentent la magnitude (M_{lv}) des différentes phases de sismicité induite au voisinage du puits (Figure de Fonroche Géothermie). Cette figure contient des données relevant de la propriété industrielle et a donc été retirée de la version publique du rapport.

Du 5 au 8 Novembre 2019 sont menées une série de stimulations hydrauliques dans GT1 (Figure 26) (en parallèle à celles menées dans GT2 entre le 5 et 6 novembre) dans le cadre de l'acquisition sismologique par le réseau dense (100 stations) disposé en surface entre les deux puits avec le support de la société GALLEGO. Les injections sont rapidement arrêtées, comme il a été fait sur GT2, car une décorrélation entre le débit et la pression est lue en tête de puits ce qui est interprété par FG comme un colmatage du puits. Les essais sont arrêtés le 8/11/19 et dès le 09/11/19 les travaux reprennent pour prolonger le puits GT2 et atteindre la deuxième zone de faille.

5.1.3. Synthèse des observations de FG sur la sismicité de Novembre 2019

FG identifie à partir de son catalogue de sismicité, trois types d'amas de sismicité (voir Figure 27) :

- un amas au voisinage des puits (amas de la Wantzenau ou de Vendenheim ou amas nord) que FG considère comme une sismicité induite liée à l'activité dans les puits GT1 et GT2,
- un amas dans la région au sud des puits, distante de 4-5km des puits (amas de la Robertsau ou de Strasbourg ou amas sud) que FG considère comme une sismicité naturelle. Dans cet amas il y a le séisme du 12 novembre 2019 (M_{lv} 3,1). Le principal argument de FG pour cette classification en séismes naturels est qu'il n'y a pas de continuité de la sismicité entre l'amas nord et l'amas sud. Un autre argument est évoqué se basant sur l'occurrence d'un séisme à la même période au Teil en Ardèche), à savoir une augmentation de la sismicité à cette période le long des fossés d'effondrement péri-alpins. Cependant, la démonstration d'une telle augmentation de la sismicité à l'échelle européenne n'est pas donnée par FG.

- Un troisième type de sismicité à plus grande distance des puits (amas d'Offendorf et Rhinau) est décrit (voir la carte structurale de FG sur la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** qui propose une zone de faille N60 qui relierait ce troisième amas à l'essai de Strasbourg).

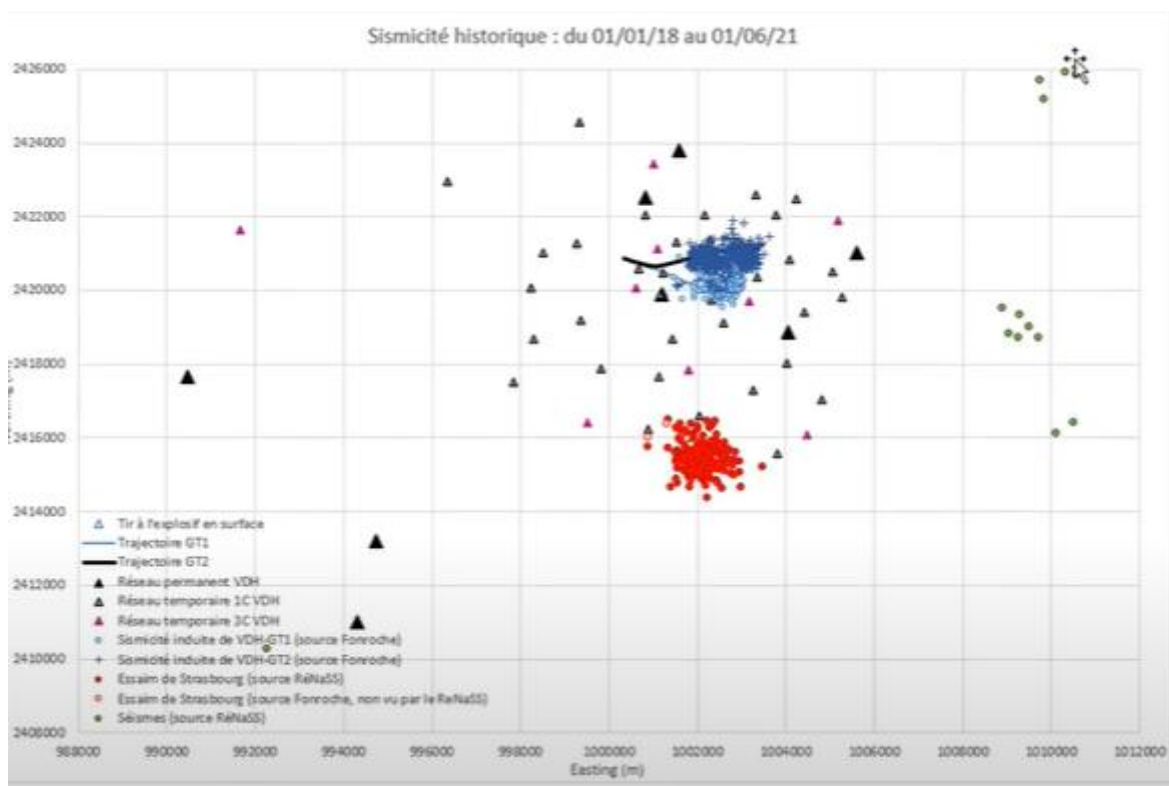


Figure 27 : Localisation géographique de la sismicité au voisinage des puits GT1 et GT2 à partir du catalogue de sismicité de FG: en bleu, amas de sismicité de la Wantzenau (amas nord); en rouge, amas de sismicité de la Robertsau ou de Strasbourg (amas sud); en vert, les amas de sismicité d'Offendorf au Nord-Est et de Rhinau à l'Est des puits GT1/GT2 . Les triangles représentent les stations sismologiques. (Figure FG)

Le réseau sismologique pour le suivi de la sismicité induite au voisinage des puits a évolué depuis 2019. Il était de 5 stations au début du projet, en novembre 2019. Il a été enrichi de 35 stations en 2020 suite aux recommandations de la tierce-expertise du BRGM-INERIS en février 2020. Il est argumenté par FG qu'avec ce nouveau réseau beaucoup plus sensible, aucun événement sismique n'a été localisé entre les deux amas, ce qui renforce la position de FG sur l'absence de lien entre l'amas nord et l'amas sud.

L'évolution temporelle de la sismicité est représentée sur la Figure 30. On y voit en particulier le début de l'essai de sismicité de Strasbourg (amas sud en rouge), et son développement jusqu'en avril 2021. Au-delà de coïncidences, aucun lien de connexion entre l'activité de l'amas Nord (Vendenheim) et l'amas Sud (Strasbourg) n'est retenu.

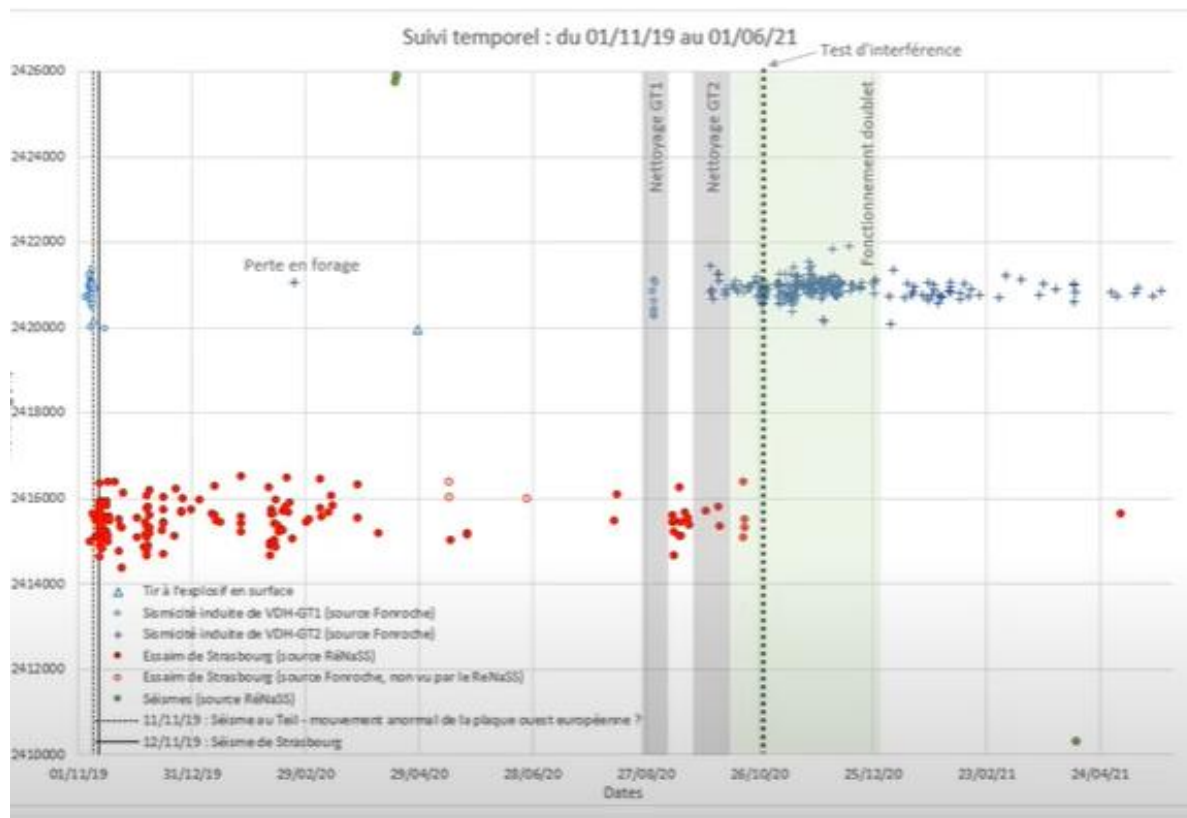


Figure 28 : Evolution de la sismicité au cours du temps depuis 01/11/2019 dans la région de la Wantzenau (en bleu), dans la région de la Robertsau (en rouge) et dans les autres régions en vert, à partir du catalogue de sismicité de FG. (Figure FG)

FG s'appuie également sur des éléments de modélisation géomécanique issus du projet TEMPERER (Géodénergies) réalisés par ARMINES pour conforter sa conclusion d'une non-interaction entre l'amas de Vendenheim et celui de Strasbourg. En effet, les modèles réalisés jusque-là ne semblent pas montrer de transfert de contrainte sans sismicité associée. FG justifie ainsi que si l'on n'observe pas de sismicité entre les amas, c'est qu'il n'y a pas eu de transfert de contrainte et donc qu'il y a bien indépendance entre les deux zones.

5.2. Avis préliminaire du CE

5.2.1. Discussion sur la temporalité de la sismicité au voisinage des puits GT1 et GT2 et dans la zone de la Robertsau/Strasbourg à partir des données de l'EOST

L'avis du CE s'appuie sur les travaux réalisés préalablement par l'EOST et reprend des éléments du rapport de l'EOST de février 2020 ainsi que de l'article publié dans CRG, 2021 (Schmittbuhl et al., 2021 - accessible à partir du lien : <https://comptes-rendus.academie-sciences.fr/geoscience/articles/10.5802/crgeos.71/>).

La Figure 29 montre le déroulé de la sismicité dans chaque zone : la zone de la Wantzenau/Vendenheim au voisinage des puits GT1 et GT2 et la zone de la Robertsau/Strasbourg, depuis 2018, en utilisant le catalogue de sismicité de l'EOST. La Figure 31 Figure 30 montre le même déroulé selon les données de FG. Globalement les deux

figures montrent un même historique de la sismicité. A noter que les données de l'EOST mettent en évidence une activité plus importante dans l'essai de Strasbourg/La Robertsau en particulier en 2020 suggérant que la magnitude de complétude dans cette région est différente entre les deux catalogues.



Figure 29 : Évolution temporelle de l'activité sismique à proximité du site de Geoven en utilisant les données de l'EOST jusqu'au 31/1/2021. L'échelle est : 0,01° en latitude correspond à 1111 m ; 0,01° en longitude correspond à 734 m. Les événements sismiques sont représentés par un cercle dont la taille et la couleur sont fonction de leur magnitude. Les lignes rouges épaisses montrent les périodes d'activités opérationnelles dans les puits géothermiques (forage ou tests hydrauliques).

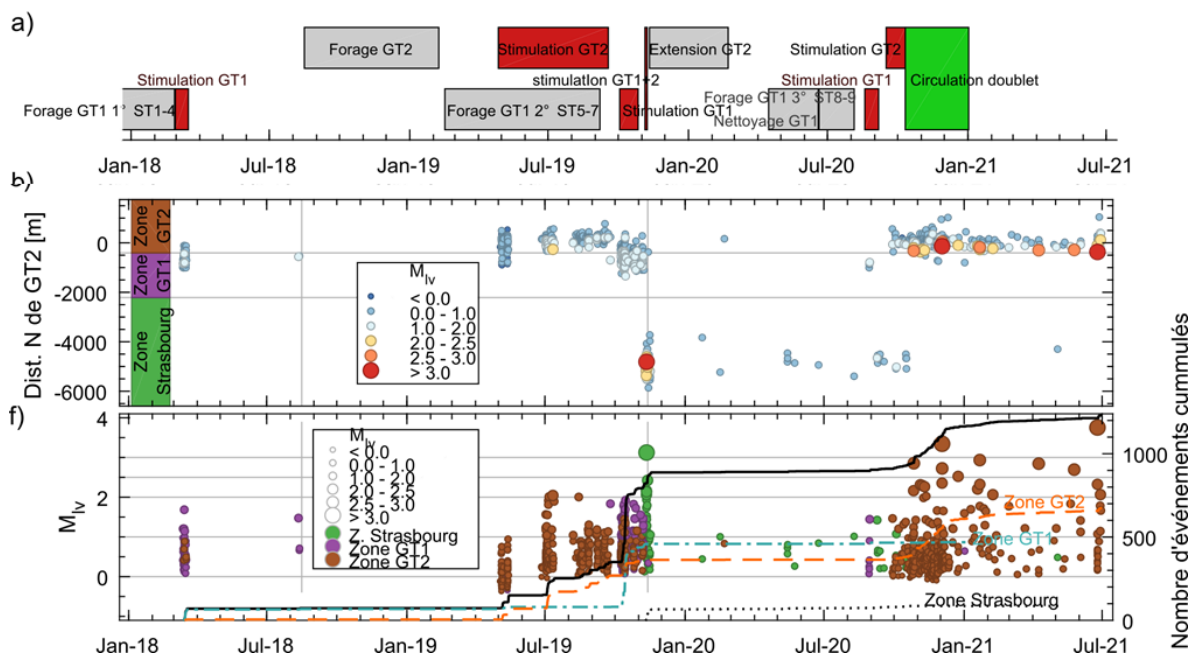


Figure 30 : Évolution temporelle de l'activité sismique à proximité du site de Geoven en utilisant les données de FG (extrait de la figure 1).

Concernant l'objectif 2, à savoir la réévaluation du lien entre les opérations à Vendenheim et l'essai de Strasbourg (2019), la figure montre une forte coïncidence temporelle entre une sismicité marquée dans la zone de la Wantzenau, en particulier dans la zone GT1 et l'initiation de la sismicité dans la zone de la Robertsau, en novembre 2019. La Figure 31 détaille ce déroulé à cette période de novembre 2019 avec le catalogue de l'EOST. Il est mis en évidence qu'il y a eu une coexistence de l'activité sismique entre les deux zones. C'est en particulier dans les jours qui suivent la forte activité sismique au voisinage du puits GT1 que la sismicité dans la zone de la Robertsau se produit.

La Figure 31 permet également une **comparaison de l'initiation de la sismicité dans l'amas de Strasbourg/La Robertsau, entre novembre 2019 et septembre 2020, cette dernière période est choisie car elle suit une stimulation hydraulique de GT1 le 27/08/2020**. Dans les deux cas, la sismicité dans l'amas de Strasbourg/La Robertsau est initiée après des injections importantes dans GT1 et une période de 10 jours est mise en évidence entre l'activité dans GT1 et l'initiation de la sismicité dans l'amas de Strasbourg/Robertsau.

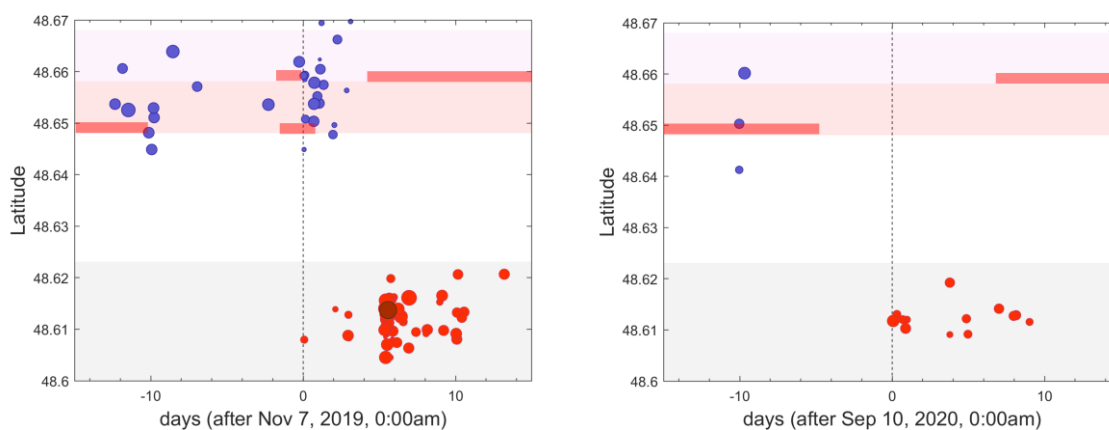


Figure 31 : Comparaison de l'évolution en temps (jours) de la sismicité dans la région des puits GT1/GT2, amas de Vendenheim/La Wantzenau (en bleu) et dans la région de l'amas de Strasbourg/Robertsau (en rouge) (données de l'EOST). Les lignes épaisses rouges décrivent les périodes d'activité dans les puits. A gauche, période autour du 7 novembre 2019 ; A droite, période autour du 30 août 2020 (extrait de Schmittbuhl et al, 2021).

La faille de la Robertsau (faille F1B) relie l'amas de La Wantzenau/Vendenheim et l'amas de la Robertsau/Strasbourg (Figure 32). Les séismes se situent globalement à une profondeur d'environ 5 km. Les deux groupes nord et sud sont situés sur la même faille (faille de la Robertsau) avec une orientation d'environ N010° E au nord du groupe sud et N025° E au sud de celui-ci.

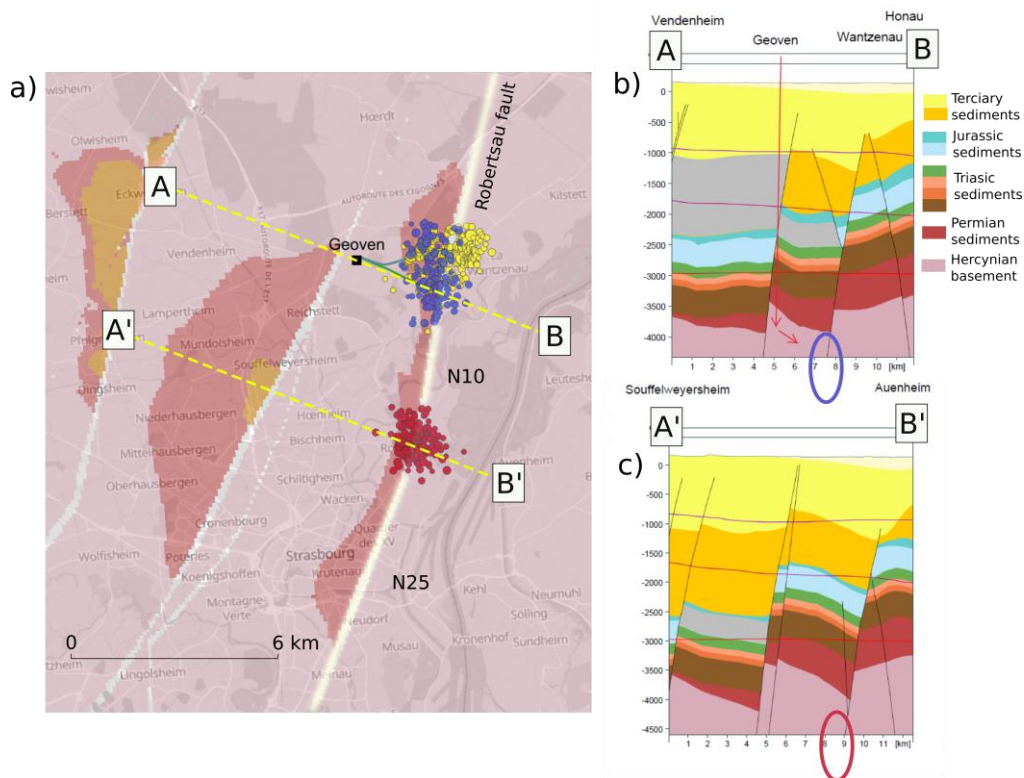


Figure 32 : (a) (gauche) Localisation des amas de sismicité nord (Vendenheim/La Wantzenau) et sud (Strasbourg/La Robertsau) à partir du catalogue BCSF-Rénass par rapport à la géologie structurale locale. En bleu, les séismes de l'amas nord avant le 1er août 2020. En jaune, la sismicité de l'amas nord après le 1er août 2020. En rouge, l'amas sud. La position des puits de Geoven est représentée par les lignes vertes. Le fond coloré représente la géologie à une profondeur de 4 km (extrait de la base de données GEORG : <http://maps.geopotenziale.eu>). En blanc sont indiquées les positions des principales failles à 4000 m de profondeur. (b) (en haut à droite) Coupe transversale le long du profil A-B. L'ellipse bleue montre l'emplacement de l'amas nord à la racine de la faille de la Robertsau. Les flèches rouges donnent un croquis des puits de Geoven. (c) (en bas à droite) Coupe transversale le long du profil A0-B0. L'ellipse rouge correspond à l'emplacement de l'amas sud, également à la racine de la faille de la Robertsau (extrait de Schmittbuhl et al., 2021).

La Figure 33 montre la **distribution en profondeur des séismes de l'amas de Vendenheim** et de l'amas de Strasbourg. On observe que les séismes de l'amas de Strasbourg sont à une profondeur similaire des séismes induits au proche voisinage des puits de Geoven. Ils sont moins profonds que les séismes naturels dans la région.

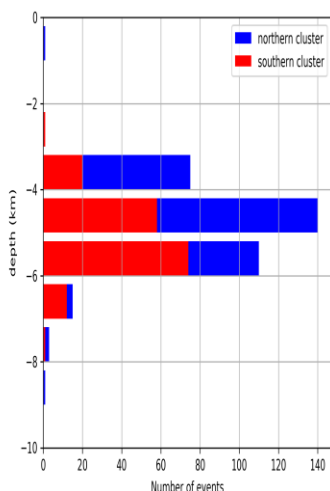
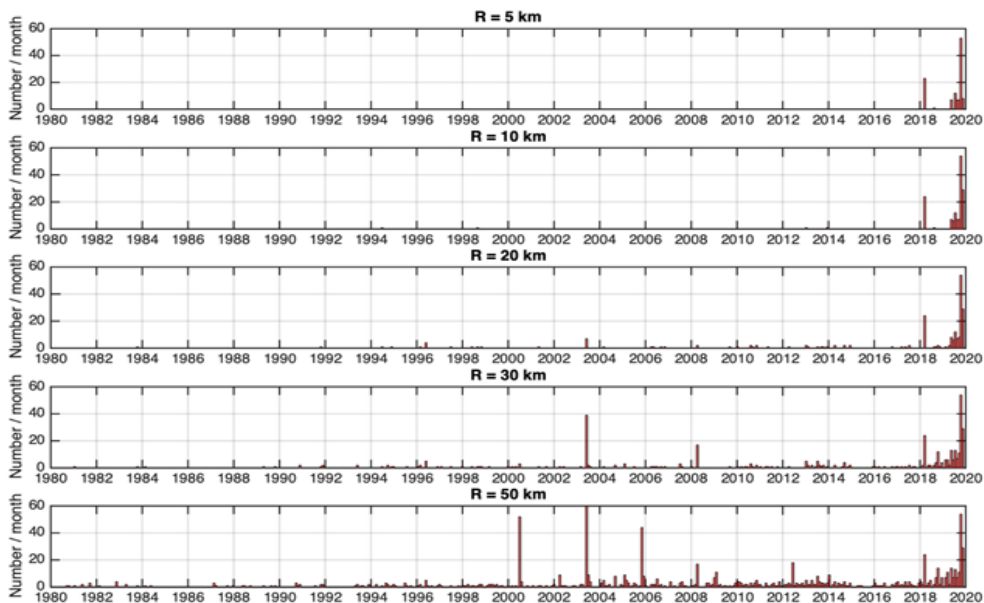


Figure 33 : Distribution de la profondeur des séismes à partir des localisations du Bcsf-renass : en bleu, les séismes du l'amas de La Wantzenau/Vendenheim ; en rouge, les séismes de l'amas de la Robertsau/Strasbourg (extrait de Schmittbuhl et al., 2021).

Une information importante est **la sismicité préexistante au projet Geoven dans la région**. Pour caractériser ce point, la Figure 34 montre l'historique du taux de sismicité mensuelle depuis 1980 pour différentes zones concentriques toutes centrées sur la position de la tête de puits de Geoven (lat : N48.661686 ; long : 7.773534E) en utilisant le catalogue BCSF-Rénass (Schmittbuhl et al, 2021). Les tirs de la carrière ont été supprimés. La plus petite zone a un rayon de 5 km. Dans la limite de l'évolution de la magnitude de complétude au fil des années du fait du développement du réseau régional, la figure montre que la sismicité a commencé dans la région de 5 km autour des puits, avec le projet Geoven en 2018. Ce n'est que lorsque le rayon atteint 20 km que l'on commence à enregistrer la sismicité de fond naturelle. A 30 km, l'augmentation du taux au cours des années 2000 est liée aux stimulations hydrauliques à Soultz-sous-Forêts. Même à une échelle de 50 km, qui est de l'ordre de la largeur du Fossé Rhénan, l'activité sismique de Geoven reste importante par rapport à l'histoire locale de la sismicité naturelle.



RéNaSS-BCSF catalog – circles centered on the GEOVEN well

Figure 34 : Évolution temporelle du taux de sismicité mensuel depuis le 01/01/1980 pour différentes régions centrées sur la position de la tête de puits de Geoven, mais en utilisant différents rayons : (de haut en bas) R = 5, 10, 20, 30 et 50 km (Données du BCSF-Renass) (extrait de Schmittbuhl et al., 2021).

L'EOST a utilisé des outils de détection basés sur une approche d'intelligence artificielle ('template matching') pour permettre la détection de petits événements qui ne sont pas détectés par les algorithmes classiques de détection. La technique permet ainsi d'identifier au moins deux fois plus d'évènements (voir Figure 35). Il s'agit néanmoins d'outils pour la rétro-analyse des évènements sismiques qui sont plutôt utilisés dans le cadre de projets de recherche qu'en phase opérationnelle sur les sites géothermiques.

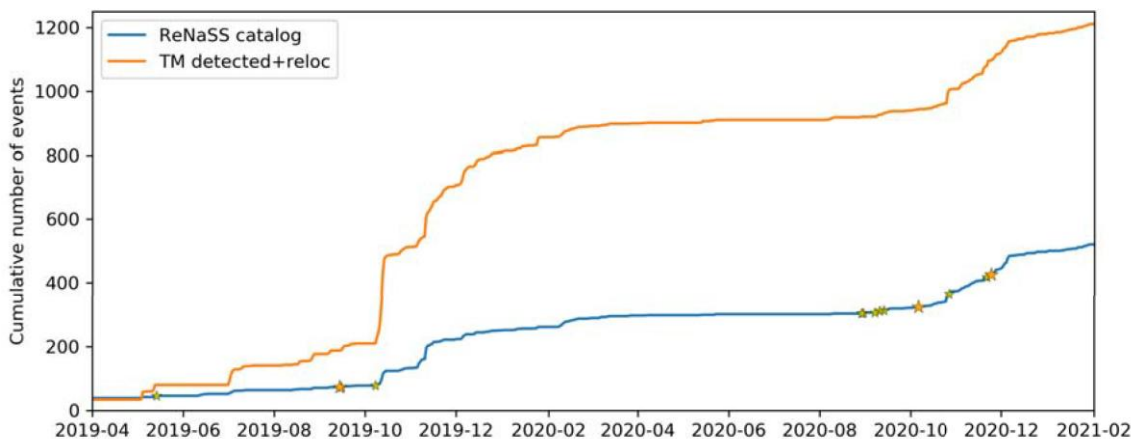


Figure 35 : Détail de l'évolution en 2019 du nombre de séismes du catalogue de sismicité BCSF-Rénass (en bleu), ainsi que ceux détectés par template matching (en orange) (extrait de Schmittbuhl et al., 2021).

La Figure 36 montre l'apport de technique de relocalisation fine (type hypoDD avec corrélation des formes d'ondes) pour obtenir des images haute-résolution de la sismicité dans la région en intégrant l'ensemble des données des réseaux locaux, régionaux et nationaux. La figure montre en particulier les deux orientations principales des failles de

l'amas de Strasbourg/Robertsau : N015 qui correspond à la direction de la faille F1B et N140 qui constitue une direction conjuguée qui n'a pas été utilisée dans l'analyse de risque de FG.

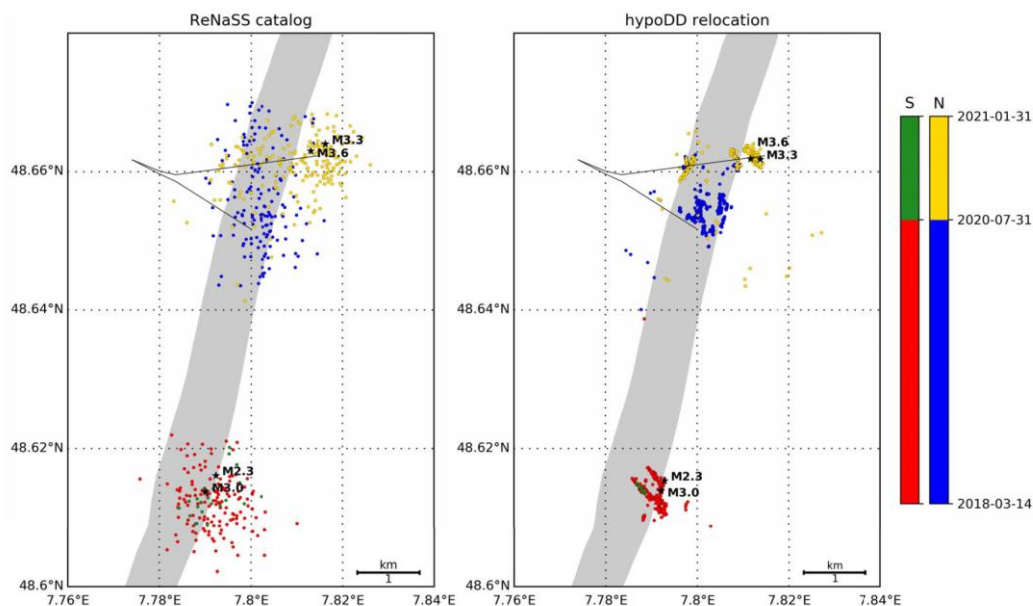


Figure 36 : Localisation de l'amas de sismicité nord (Vendenheim/Wantzenau) et sud (Strasbourg/Robertsau): (gauche) carte des localisations absolues à partir du catalogue BCSF-Rénass ; (droite) carte des localisations relatives utilisant HypoDD. En gris, la trace de la zone de faille (F1B/faille de la Robertsau) entre 4 et 6 km de profondeur, décrite dans le modèle géologique GEORG (<http://maps.geopotenziale.eu>). Les couleurs correspondent aux deux périodes différentes dans les deux amas de sismicité : avant et après le 31 juillet 2020. et après le 31 juillet 2020 (extrait de Schmittbuhl et al., 2021).

5.2.2. Discussion sur l'utilisation de la 'surpression réservoir' calculée à la place d'une réelle mesure de pression

Les Figure 23 à Figure 26 et les fichiers de données de FG associés laissent supposer que la pression affichée est une donnée mesurée alors qu'il s'agit d'une valeur calculée de la surpression réservoir intégrant des paramètres souvent non accessibles (cf section 2.2.1). L'analyse quantitative des figures d'évolution de pression par le CE nécessiterait de reconstruire les figures après avoir reformulé la pression en utilisant la pression en tête de puits mesurée. En effet, l'estimation de surpression réservoir qui vise à estimer la différence entre la pression naturelle dans le réservoir et la pression en fond de puits lors d'injections est fondée sur plusieurs hypothèses, pour certaines non vérifiées ou difficilement vérifiables, et ne peut pas être considérée comme robuste en l'état des connaissances.

Concernant l'objectif 2, la Figure 1 montre la valeur de la pression en tête de puits pendant la période de novembre 2019 et non la surpression réservoir comme rapportée sur les figures 27 et 28. On constate que la pression en tête des puits a atteint des niveaux de près de 150 bars dans le puits GT1 et de 120 bars dans le puits GT2. Ces valeurs, au-delà du niveau prescrit de 100 bars, sont à comparer à d'autres sites (Zang et al, 2014). Elles sont comparables aux valeurs maximales utilisées à Soultz (140 bars pour le puits GPK2, 180 pour les puits GPK3 et GPK4) mais loin des valeurs maximales relevées sur d'autres sites (e.g. 300 bars à Bâle, 890 bars à Pohang). Dans le cadre d'un processus de diffusion quasi-1D le long de la faille (même profondeur), une surpression d'une centaine de bars entretenue pendant plusieurs jours a pu se propager à grande distance et participer au déclenchement de la sismicité dans l'amas de Strasbourg à 5 km des puits. C'est un des

mécanismes possibles d'initiation de la sismicité dans la zone de Strasbourg (cf. développements possibles en phase 2).

5.2.3. Discussion sur le colmatage de GT1 et le rôle de l'air-lift

L'air-lift du 20/10/2019 sur GT1 est analysé par FG comme responsable d'un fort endommagement du puits (2^e jambe) par remplissage de particules fines et de fait une chute de l'injectivité du puits lors des essais de novembre 2019. Plusieurs tests ont été menés début novembre 2019 dans GT1 pour essayer de décolmater le puits mais sans succès. Cet endommagement a justifié aussi la réalisation d'une nouvelle jambe (3^e jambe) qui fera l'objet de tests fin août 2020. Cependant il est apparu au CE que les arguments pour justifier ce colmatage n'étaient pas clairs. La stimulation hydraulique du 25/10/19 dans GT1, donc juste après l'air-lift du 20/10/2019, ne semble pas montrer une augmentation sensible de la pression pour des débits d'injection comparables. Les augmentations plus rapides de la pression sont plutôt observées à partir du 7/11. Par ailleurs, il n'y a plus de mesures de pression entre le 19 et le 24/10 ou entre le 29/10 et le 6/11. Selon FG, l'utilisation de la surpression réservoir semble masquer un tel effet de colmatage cependant la raison n'en est pas claire. Il semblerait que la confirmation soit venue plus tard en avril 2020 lors du 'nettoyage' de GT1 : problème de descente dans le puits mais sans données explicites fournies par FG.

5.2.4. Discussion sur les très grands volumes cumulés injectés

Le Tableau 4 décrit le bilan des volumes injectés dans GT1 et GT2 de 2018 à 2020. La Figure 1 illustre l'évolution de ces volumes au cours du temps. On constate que le volume net total injecté (volume injecté - volume produit) dans le réservoir soit par GT1 ou par GT2 en 2019 est très fortement positif (GT2 Avr-Mai : 10 805 m³ ; GT1 Oct : 30 658 m³ ; GT2 Jul-Sep : 51 069 m³ ; total : 92 532 m³) (courbe noire épaisse de la Figure 1d). Cette injection massive a été possible grâce à l'utilisation de l'eau de la nappe du Rhin à travers le rabattement qui est fait dans la zone de l'ancienne raffinerie de Reichstett. A titre de comparaison, le volume du bassin en surface était de 6 000 m³ ; le volume net injecté en 2019 représente donc l'équivalent de 15 bassins. Le volume total net a cru d'abord par des injections massives dans GT2 (courbe rouge épaisse de la Figure 1d) pour environ les 2/3 (61 874 m³) d'avril à septembre 2019, en particulier lors des stimulations thermiques de l'été 2019. Le volume net total injecté dans GT1 en 2019 (30 658 m³) est d'environ 1/3 du volume net total (92 532 m³). A noter que la température d'injection entre 12 et 13°C pendant l'été traduit l'utilisation en direct de l'eau de la nappe. Les injections dans GT1 à l'automne 2019 après celles dans GT2 montrent une croissance du volume net injecté avec un taux moyen de l'ordre de 20 m³/h pendant 6.5 mois (voir Figure 1d). Ce débit est à comparer aux 8 m³/h maximum de prélèvement dans la nappe, mentionnés dans l'arrêté préfectoral du 24 mars 2016 (Article 16.2) pour la confection des boues de forage.

Il est intéressant de discuter ces volumes nets injectés en lien avec les travaux de McGarr (2014 ; Zang et al, 2014) qui compilent les magnitudes maximales observées pour différents cas d'injection de fluide dans des réservoirs profonds (voir Figure 37). L'approche basée sur l'estimation du volume déformé élastiquement par l'injection du fluide, propose la loi suivante : $M_0(\max) = G V_{inj}$ avec M_0 le moment sismique relié à la magnitude M par : $\log(M_0) = 9,05 + 1,5M$, G le module élastique de rigidité (typiquement $G = 3e10$ Pa) et V_{inj} , le volume injecté.

En conséquence, selon cette loi, pour le volume net injecté de 92 532 m³ en 2019, la magnitude maximale serait a priori d'environ $M_{\max} \sim 4,2$. Si les réservoirs de GT1 et de GT2 sont considérés comme indépendants, les magnitudes max pour les injections de 2019 seraient avec cette loi alors respectivement de 3,9 (pour les 30 658 m³) et 4,1 (pour les

61 874m³). Il est intéressant de comparer ces valeurs aux plus grands séismes observés dans chaque réservoir : 3,0 pour le réservoir sud si l'amas de Strasbourg/Robertsau est connecté à GT1 en novembre 2019 et 3,9 pour GT2 en juin 2021.

La loi empirique de McGarr montre que pour des volumes nets injectés similaires à ceux mis en œuvre par FG, des précédents de génération de séismes induites de magnitude comparable ont existé. La cohérence des volumes de fluide injectés et des magnitudes sismiques de Strasbourg/Vendenheim avec cette loi de McGarr suggère que les volumes injectés par FG pourraient être responsables de la sismicité. La prise en compte de ces volumes injectés est donc importante dans la maîtrise du risque sismique. **L'accès à l'eau de la nappe pour les stimulations hydrauliques des puits a potentiellement joué un grand rôle dans l'initiation de ces événements.** Sans cet accès et utilisation de l'eau de la nappe, il aurait été difficile d'avoir de tels volumes de fluide à disposition.

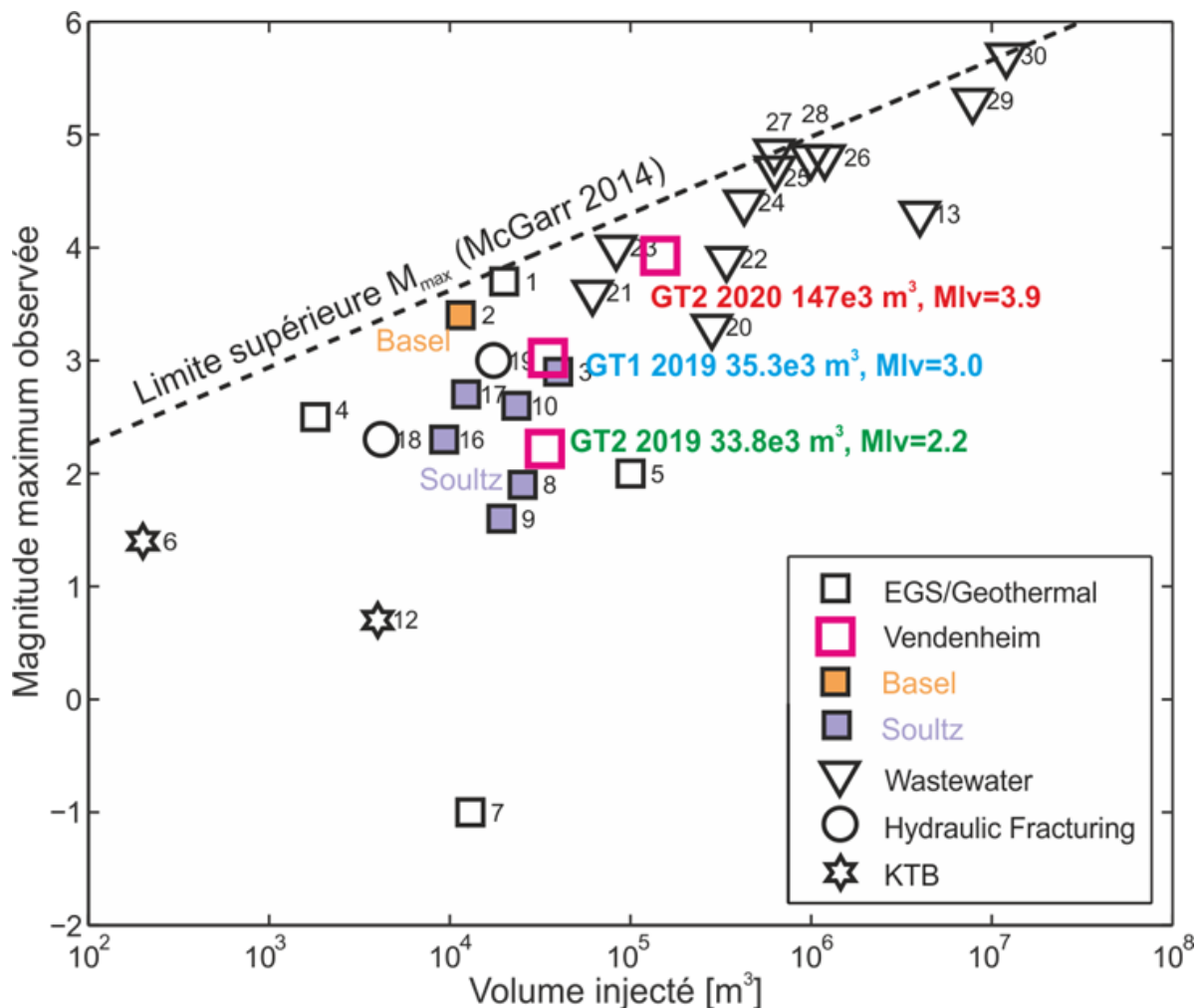


Figure 37 : Magnitude maximale observée en fonction du volume injecté dans des opérations de géothermie profonde (carrés), d'injections d'eau usée (triangles), de fracturation hydraulique pour les gaz de schistes (rond) et du projet de forage profond KTB (étoile) [extrait de Zang et al, 2014]. La loi de limite de magnitude maximale vient des travaux de McGarr, (2014).

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

Bien qu'il y ait eu une amélioration du réseau sismologique en 2020, aucun événement sismique n'a été détecté entre les deux zones de sismicité, renforçant l'observation qu'il n'y a pas de sismicité entre les deux amas (Figure 27) le long de la zone de faille F1B (Figure 7).

FG conclut que l'absence de sismicité entre les amas de Vendenheim/Wantzenau et de Strasbourg/Robertsau démontre qu'il n'y a pas de lien entre les puits GT1 et GT2 et la zone de Strasbourg/Robertsau vers le sud, le long de la faille F1B (faille de la Robertsau). 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, et sont donc très sensibles à cette hétérogénéité. Se pose aussi la question de l'homogénéité des propriétés mécaniques le long de la faille, en particulier sa résistance à la rupture. Il peut difficilement être démontré sur la base des données existantes que ces propriétés sont homogènes à l'échelle de plusieurs kilomètres, que la distribution de contrainte tectonique initiale (i.e. naturelle) est uniforme, que la friction et la cohésion le long de la faille ne varient pas. La résistance à la rupture peut varier spatialement le long de la faille surtout pour des failles régionales qui sont proches de l'instabilité. De fait, une même perturbation de contrainte peut générer dans certaines zones des séismes (zones à faible cohésion ou friction) et pas dans d'autres (zone à forte cohésion ou friction). On peut aussi penser à la dualité des modes de déformation des failles qui a été bien mise en évidence à Soultz-sous-Forêts, à savoir l'existence d'une déformation asismique à côté de la déformation sismique pour un même chargement mécanique (Cornet et al, 2007). La même zone de faille peut ainsi se déformer sans séismes. En conséquence, l'hypothèse d'une sismicité comme un traceur "parfait" des perturbations de contraintes le long de la faille est une conjecture restant à étayer. Aussi la non-observation de sismicité entre les deux amas, n'est pas une démonstration d'un non-transfert de contrainte. Une zone de faille peut transmettre une perturbation de contraintes sans se déformer irréversiblement et si cette perturbation de contraintes génère une déformation irréversible, celle-ci n'est pas forcément sismique.

En d'autres termes, **la non-sismicité n'est pas une manifestation d'une non-perturbation de contrainte**. Un transfert de contrainte sans sismicité pourrait impliquer un glissement asismique sur la faille F1B (faille de la Robertsau) sur plusieurs kilomètres. Ce glissement ne peut être exclu mais est également difficilement démontrable sans données supplémentaires. Il nécessiterait l'absence d'aspérité génératrice de sismicité le long de la faille. Un transfert de pression sans sismicité nécessite lui un segment de faille plus résistant (friction et ou cohésion) ce qui est envisageable, mais le signal de pression serait fortement atténué par les processus diffusifs à une distance plurikilométrique s'il est dans l'ensemble du volume, moins si la propagation est quasi-unidimensionnelle le long un chenal particulier le long de la faille.

En conclusion, l'absence d'événements entre les deux essais est un aspect particulier de cette séquence qui nécessite des avancées scientifiques sur les mécanismes de déclenchement à distance de la sismicité où plusieurs pistes sont à envisager: variabilité spatiale de la résistance le long de la faille, glissement asismique et leur couplage avec les circulations de fluide, déclenchement dynamique initié pas les ondes sismiques, diffusion de pression de pore, couplage poro-élastique, etc (Freed, 2005). Le CE considère que les multiples incertitudes concernant l'origine des mécanismes responsables de cette absence de sismicité ne peuvent pas autoriser FG de conclure à ce stade à une absence de causalité entre les activités dans les puits et l'amas de Strasbourg.

5.2.6. Discussion sur la sismicité dans la zone de Strasbourg en septembre 2020

La Figure 1 décrivant l'évolution de la sismicité au cours du temps depuis le 1/11/19 au 24/04/21, montre une information intéressante suite au 'Nettoyage GT1' le 27/8/20. En effet, on y voit une intensification de la sismicité dans l'essaim de Strasbourg dans les jours qui suivent, après une injection importante dans GT1. Cette situation est à comparer à la situation de novembre 2019 et pourrait être vue comme un test de reproductibilité de la connexion entre les activités du puits GT1 et la sismicité dans l'essaim de Strasbourg/Robertsau. La Figure 10 détaille le chargement hydraulique lors de la stimulation du 27/08/20 : montée par palier à 450 m³/h pour un volume total net injecté de 9 171 m³ à comparer aux 8 387 m³ lors de la stimulation du 25-27 octobre 2019 et aux 6 375 m³ du 6-8 novembre 2019 avec des débits jusqu'à 390 m³/h (Figure 24). La stimulation du 27/8/20 permet alors d'estimer un temps de transfert de la zone des puits à la zone de Strasbourg/Robertsau de l'ordre de 10 jours. Ce point est également discuté dans la publication de l'EOST (Schmittbuhl et al, 2021).

S'il est admis que ces deux tests reproduisent un mécanisme similaire de transfert de l'effet de surpression dans GT1 vers la zone de Strasbourg, cela constitue un argument fort pour établir le lien entre les injections dans GT1 et l'activation de la zone de Strasbourg. Néanmoins cela pose également des questions car la nature exacte du mécanisme de transfert demeure inconnue : l'atténuation associée avec une diffusion d'une perturbation de pression dans le fluide sur 10 jours et sur 4-5 km serait telle que la perturbation de pression atteignant la zone de Strasbourg serait probablement de très faible magnitude si elle est homogène dans le volume mais pourrait être sensible s'il y avait une forte chenalisation le long de la faille. D'autres mécanismes de transferts sont également envisageables telle qu'une réponse poroélastique. Une considération plus approfondie de ces processus et une simulation de leurs effets potentiels pour des fourchettes de paramètres plausibles seraient nécessaires pour évaluer autant que possible leur rôle potentiel dans l'activation de sismicité distante.

Cette discussion des mécanismes de transfert va nécessiter des analyses plus approfondies pour discriminer le mécanisme dominant parmi les processus possibles, qui pourraient être menées en phase 2 de la mission du CE. Néanmoins, malgré le fait que les mécanismes sont incertains, la répétition de la temporalité entre les activités sur GT1 et l'activation de l'essaim de Strasbourg constitue un argument fort supportant leur causalité.

5.2.7. Discussion sur la question de la classification des événements

L'EOST a été beaucoup questionné en 2019 sur ses critères de classification des événements sismiques. Le Tableau 5 suivant résume les critères utilisés (Davis et Frohlich, 1993 ; Schmittbuhl et al, 2021). A partir des observations détaillées précédemment ainsi que le rapport de l'EOST et l'article associé (Schmittbuhl et al, 2021), il ressort que tous les

critères pour les "séismes clairement induits" (colonne de droite dans le Tableau 5) sont remplis tant pour l'amas nord (Vendenheim/Wantzenau) que pour l'amas sud (Strasbourg/Robertsau). Pour l'amas sud, cinq critères étaient établis dans les minutes après l'événement de magnitude M_{lv} 3.0 du 12 novembre 2019, et une analyse plus détaillée a été nécessaire dans les semaines suivantes pour obtenir une connaissance précise des deux autres : "structures géologiques qui peuvent canaliser l'écoulement vers les sites de séismes", à savoir l'existence de la faille de la Robertsau, ou pour la modélisation géomécanique de l'effet des "changements de pression des fluides aux hypocentres des séismes". Concernant ce dernier point, le rapport de l'EOST montre que la contrainte de Coulomb est négative dans la zone de Strasbourg sans cohésion, un contexte qui est suffisant pour initier de la sismicité avec de très faibles perturbations de pression. Cependant le mécanisme dominant permettant le déclenchement à distance d'une sismicité significative reste à identifier.

	Questions	Earthquakes clearly NOT induced	Earthquakes clearly induced
	Background seismicity		
1	<i>Are these events the first known earthquakes of this character in the region?</i>	No	Yes ✓
	Temporal correlation		
2	<i>Is there a clear correlation between injection and seismicity?</i>	No	Yes ✓
	Spatial correlation		
3	<i>Are epicenters near wells (within 5 km)?</i>	No	Yes ✓
4	<i>Do some earthquakes occur at or near the injection depths?</i>	No	Yes ✓
5	<i>If not, are there known geologic structures that may channel flow to sites of earthquakes?</i>	No	Yes ✓
	Injection practices		
6	<i>Are changes in fluid pressure at well bottoms sufficient to encourage seismicity?</i>	No	Yes ✓
7	<i>Are changes in fluid pressure at hypocentral locations sufficient to encourage seismicity?</i>	No	Yes ✓
	TOTAL 'Yes' answers	0	7 ✓

Tableau 5 : Les sept critères opérationnels pour classer les séismes induits ou non induits [d'après Davis et Frohlich, 1993]. Les critères 1-4 et 6 ont été remplis rapidement après les occurrences des principaux séismes. Les critères 5 et 7 ont été remplis après des investigations approfondies suite au séisme du 12 novembre 2019 (extrait de Schmittbuhl et al, 2021).

5.2.8. La question de séismes induits à grande distance

L'article de Goebel et Brodsky en 2018 documente la distribution de la sismicité avec la distance au puits d'injection pour de nombreux sites dans le monde (18 sites analysés dont 3 dans le fossé rhénan). Les auteurs montrent que certains sites présentent une distribution exponentielle de la sismicité, avec une distance caractéristique au puits au-delà de laquelle la sismicité disparaît (comportement en bleu sur la Figure 38). Cette distance est de l'ordre de quelques centaines de mètres. La sismicité à Soultz semble suivre ce comportement. Les auteurs interprètent ce comportement par un rôle dominant de la diffusion de pression du fluide dans le réservoir. Les auteurs montrent également qu'un autre comportement existe

qu'ils attribuent à la réponse poro-élastique du massif. Dans ce cas, la sismicité se propage beaucoup plus loin du puits du fait de l'interaction entre la pression du fluide avec l'élasticité de la matrice rocheuse induisant une dépendance avec la distance au puits selon une loi de puissance en particulier à Landau ou Bâle. Ils montrent que des précédents de déclenchement de la sismicité à plusieurs dizaines de kilomètres de distance des puits existent. Dans ce dernier cas, de très faibles perturbations de pression ont un effet sur le déclenchement de la sismicité à très grande distance.

La question de savoir dans quel cas nous sommes à Vendenheim, à savoir si la sismicité est liée à des phénomènes poro-élastiques ou de diffusion de pression du fluide, reste ouverte à ce stade. Des investigations supplémentaires des mécanismes en jeu (modélisations THM - voir 5.2.10) sont nécessaires pour voir dans quels comportements se rapportent les situations de la sismicité à la Wantzenau au proche voisinage des puits (quelques centaines de mètres), à la Robertsau (4-5km), à Rheinau ou à Offendorf, encore plus éloignés.

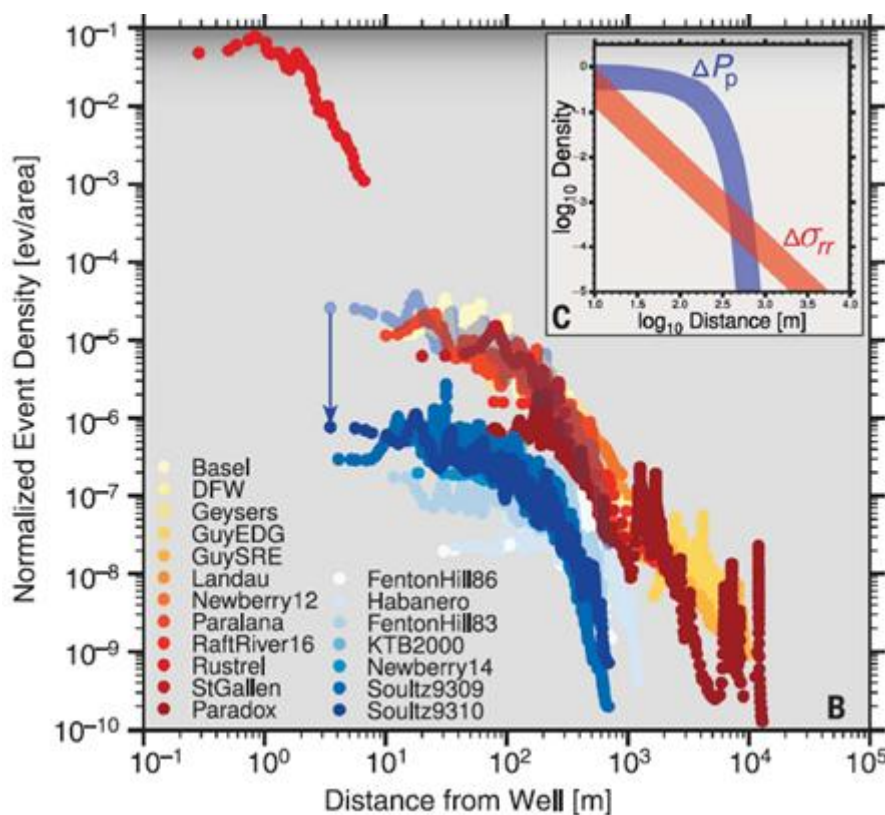


Figure 38 : (B) Décroissance spatiale depuis le puits d'injection de la densité de sismicité induite. En nuances de bleu, des décroissances rapides (exponentielles) et en nuances de rouge, des décroissances lentes (loi de puissance). Les courbes bleues ont été décalées vers le bas selon la flèche verticale bleue pour permettre une meilleure visualisation. (C) Prédictions théoriques de la baisse de la densité spatiale avec la distance au puits ; la courbe bleue montre la décroissance abrupte dans un cas de diffusion de pression dans le fluide, et la courbe rouge montre une décroissance en loi de puissance pour les sites présentant un fort couplage poroélastique au sein de la matrice rocheuse (Extrait de Brodsky & Goebel, 2018).

5.2.9. Discussion sur l'hypothèse d'un changement régional voire européen du taux de sismicité naturelle en novembre 2019

FG propose que la sismicité de novembre 2019 dans l'essai de Strasbourg est une sismicité naturelle indépendante de l'activité dans les puits et liée à une augmentation de la sismicité naturelle régionale voire européenne à cette période, dont le séisme du Teil le 11

Nov 2019 (Cornou et al, 2020) serait la manifestation. Il s'agit de la question du déclenchement distant des séismes du fait de la perturbation statique ou dynamique du champ de contrainte. Le CE considère cette conjecture comme devant être démontrée car il n'y a pas à ce stade d'observations publiées dans la littérature (e.g. Doubre et al, 2021) montrant une augmentation de l'activité sismique récente. Un corollaire de cette conjecture est qu'il serait nécessaire que le site de Strasbourg soit sensible à des interactions avec des séismes à plusieurs centaines de kilomètres sans être sensible aux perturbations de contraintes liées au voisinage des puits sur des échelles de quelques kilomètres.

Cette conjecture souffre du fait qu'il n'existe pas de base physique à un tel phénomène : comment propager un couplage mécanique à grande distance (>500 km) vers le site de Strasbourg sans qu'il soit sensible à des perturbations de contraintes à courte portée (5 km) et ce d'autant plus que les interactions mécaniques en général élastiques décroissent très rapidement avec la distance ($1/r$ ou $1/r^2$) (Freed, 2005) ? L'autre corollaire serait que les sites de Vendenheim/Wantzenau et de Strasbourg/Robertsau se comportent très différemment vis à vis d'une perturbation de contrainte à grande distance (>500 km), ces deux sites étant pourtant très proches par rapport à l'échelle d'interaction considérée, à la même profondeur et sur la même structure de faille. Si un mécanisme de type déclenchement dynamique suite à la propagation des ondes sismiques était envisagé, alors les deux sites en étant distant de 5 km devraient réagir quasiment en même temps. Or on ne note peu d'augmentation d'activité synchrone sur les deux sites. Enfin, un dernier point important à considérer est que l'amas de sismicité de Strasbourg est à une profondeur qui est faible pour des séismes naturels qui sont observés en général à des profondeurs plus importantes.

5.3. Proposition d'analyses complémentaires

Analyse de données de déformation de surface en 2018-2021 (InSAR, GNSS - figure 38) pour apporter des informations nouvelles et complémentaires sur l'extension de la déformation dans la région de Vendenheim/Strasbourg.

Un ensemble de données important n'a pas été considéré jusqu'à présent dans l'analyse de l'évolution de la région autour des puits de Vendenheim. Il s'agit des données de déformation de surface qui sont acquises par la station GPS sur le site de GEOVEN ainsi que le suivi par imagerie satellitaire radar (InSAR). Ces données pourraient apporter des éléments de réponse sur les questions suivantes :

- quelle est l'extension de la déformation en surface au voisinage du puits ?
- la déformation, apparaît-elle en surface, si oui, à partir de quand ?
- la déformation, se développe-t-elle sur une zone confinée au proche voisinage des puits ou s'étend à distance en particulier le long de la faille de la Robertsau (faille F1B) ?
- il y avait-il des signes précurseurs à la sismicité ?
- la déformation reste-t-elle active encore aujourd'hui ?
- une déformation poro-élastique, est-elle une approximation pertinente connaissant l'histoire des volumes injectés ?
- etc.

Toutes ces informations seront très utiles pour la modélisation géomécanique du réservoir.

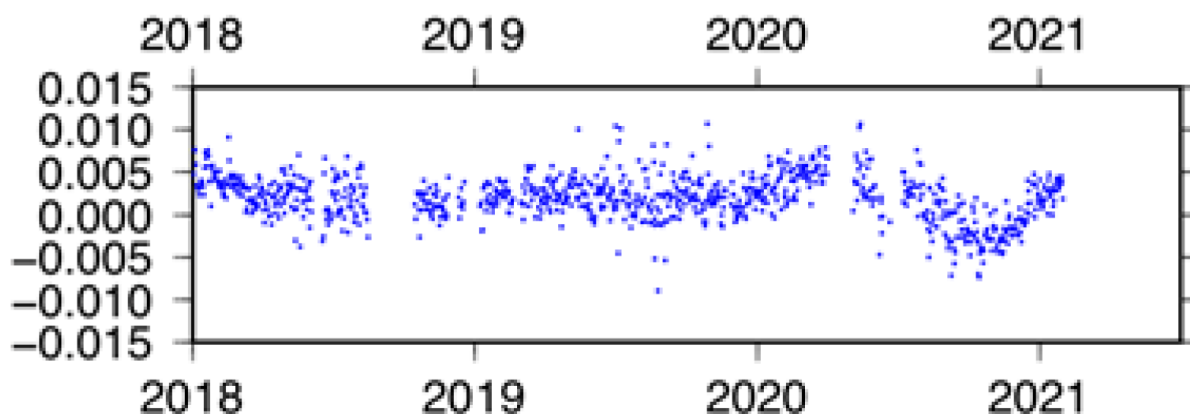


Figure 39 : Suivi GPS de la station REIC située près du site de GEOVEN : différence de la composante horizontale nord par rapport au mouvement du site montrant un comportement anormal en 2020 (oscillation) [Extrait de Schmittbuhl et al, 2021 - Suppl. Material].

Analyses sismiques complémentaires

La sismicité a été largement utilisée pour imager la structure des failles dans le réservoir et suivre l'évolution du réservoir. Beaucoup d'informations ont été obtenues de l'analyse de cette sismicité mais des travaux complémentaires pourraient être menés.

- des travaux complémentaires sur l'analyse de la source sismique des plus grands séismes : caractérisation de la source sismique (analyse spectrale, étude du moment sismique et de la magnitude de moment M_w qui est plus représentative de l'énergie radiée par chaque séisme et moins dépendante des effets locaux de site comme la magnitude locale (M_l) et permet ainsi une meilleure comparaison des séismes); modélisation des formes d'ondes pour comprendre les effets azimutaux de la radiation, des effets 3D de bassin du fossé rhénan, des effets de site à l'origine d'amplification locale responsable de différence d'effets sur les bâtiments selon leur position relative par rapport aux puits; pour mieux contraindre le modèle local de vitesse sismique qui montre des anomalies de vitesse en proche surface.
- Les catalogues de sismicité ont été affinés mais ils pourraient être encore améliorés par l'intégration des données des réseaux sismiques installés par FG en 2020 (environ 35 stations). Des techniques récentes d'intelligence artificielle d'identification automatique des phases sans pointés pourront être utilisées pour un traitement massif des données. Ceci permettrait en particulier d'affiner l'analyse de la sismicité entre la zone de Vendenheim et de la Robertsau. Il sera aussi possible de mieux identifier les signatures sismiques spécifiques de chaque stimulation. Ces catalogues améliorés devraient également permettre d'aborder une nouvelle information : l'imagerie du réservoir et de son évolution par tomographie 4D (e.g. tomoDD). Si la localisation fine de la sismicité renseigne précisément sur la structure des failles, la tomographie donnera des informations sur la structure du réservoir entre ces zones de failles. La vitesse sismique étant sensible à la présence de fluide, cette tomographie peut donner des éléments nouveaux sur la migration des fluides dans le réservoir.
- Dans le signal sismique enregistré en continu pendant toute la durée du projet pour le suivi de la sismicité, une autre partie du signal peut être utilisée avec grand intérêt : le bruit sismique entre les séismes, à savoir l'essentiel du temps. L'analyse de ce bruit et plus particulièrement son évolution au cours du temps peut donner des informations nouvelles sur la structure du réservoir, à la fois à partir de technique

d'interférométrie (CIV) mais aussi par tomographie. Ce seront alors aussi des informations importantes sur l'analyse de la migration des fluides dans le réservoir.

- Une autre information devrait être explorée à partir des mécanismes au foyer des plus gros événements : les estimations des tenseurs de contraintes associés à ces mécanismes. Ces estimations pourront être comparées aux mesures déduites de l'analyse des diagrapies de puits (breakouts, fentes de tension, etc.).

Analyse de l'instabilité des failles régionales

- poursuite des analyses initiées dans le rapport de l'EOST de février. 2020 sur l'existence ou non d'essaims de sismicité naturelle en Alsace le long des failles du bassin dans des configurations similaires à celle de La Robertsau/Strasbourg, en particulier l'étude de l'essaim de Sélestat en 2005)
- développement de modèles numériques de réservoirs indépendants (3DEC, GOLEM, FRACAS, ...) en s'appuyant sur les travaux réalisés dans le cadre du projet Temperer (Armines). Il est important pour le CE de pouvoir disposer de modèles de réservoir indépendants afin de pouvoir mener des études indépendantes avec ces modèles. La construction de tels modèles intégrant tous les aspects (thermo-hydro-chemo-mécanique, sismicité) est un travail à moyen-long terme (3-5 ans) qui ne pourra être finalisé dans un délai compatible avec la phase 2. Cependant, lancer ces travaux pendant la phase 2 est pertinent en particulier en définissant les outils, les conditions aux limites, les géométries, les propriétés constitutives des différentes structures, les rhéologies à intégrer, les scénarios à tester en priorité, en réalisant des premiers tests sur quelques cas simples.
- analyse géomécanique (étude contradictoire des travaux de QCon et Schlumberger) ; Quantification de l'état de stabilité des failles au voisinage du réservoir ; Quantification des perturbations de contraintes et de pression de pore du fluide à distance des puits dans la zone de La Wantzenau et dans la région de Strasbourg pour les différentes stimulations hydrauliques réalisées; Rétro analyse des scénarios ; Prédiction de l'évolution du réservoir; Evaluation du risque.

5.4. Objectif N°2 – Principaux points à retenir

- Les éléments factuels d'observations rassemblés convergent vers la conclusion que le déclenchement de la sismicité de Strasbourg en Novembre 2019 est lié à l'activité dans les puits de GEOVEN. Ces éléments symptomatiques s'appuient sur une critérisation consensuelle et documentée dans la littérature scientifique des critères pour considérer un séisme comme induit ou pas (Davis et Frohlich, 1993).
- En complément, il a été observé que fin août 2020, une configuration similaire à celle de novembre 2019, a eu lieu, constituant une sorte d'essai de reproductibilité de la crise de novembre 2019. En effet, à ces deux périodes, GT1 a été l'objet d'injections importantes liées aux tests hydrauliques ou au nettoyage du puits qui dans les deux cas, ont été suivies par une intensification de la sismicité au niveau de l'amas de Strasbourg une dizaine de jours plus tard. Pour le CE, cette corrélation est cohérente avec un processus de déclenchement entre les deux zones (amas de Vendenheim et amas de Strasbourg) avec un temps de transfert de plusieurs jours.
- La situation du déclenchement à grande distance (5 km) est une situation peu classique qu'il était difficile d'anticiper par FG sur la base de l'exploration réalisée. Elle est cependant documentée dans la littérature (e.g. Goebel et Brodsky, 2018). Elle constitue un point d'intérêt scientifique pour lequel des études doivent être poursuivies par des investigations supplémentaires afin de préciser et quantifier les processus impliqués, notamment par une modélisation des mécanismes de déclenchement de cette sismicité à longue distance le long d'une faille régionale.

- Les tests réalisés sur les puits de Vendenheim en 2019 se distinguent des autres sites par de grands volumes injectés. Ainsi, en 2019, le volume total net injecté (GT1 + GT2) est de l'ordre de 92 000 m³ (à comparer à la taille du bassin en surface d'environ 5000m³). Une telle injection a été possible par un accès à haut débit à la nappe d'Alsace grâce aux installations de dépollution du site de l'ancienne raffinerie de Reichstett (EcoPark). Pour le CE, les conditions d'usage de cette source de fluide auraient dû être plus prudentes.
- La relation empirique de Mc Garr (2014) basée sur une compilation d'un ensemble de sites d'exploitation de fluides du sous-sol, et bien qu'elle présente certaines limites, indique que pour de tels volumes injectés, la magnitude maximale possible des plus gros séismes serait de l'ordre de 4. Pour le CE, les séismes du 12/11/2019 (Mlv 3,0, amas de Strasbourg), du 4/12/2020 (Mlv 3.6, amas de Vendenheim), du 22/1/2021 (Mlv 3.3, amas de Vendenheim) et du 26 juin 2021 (Mlv 3,9, amas de Vendenheim) sont cohérents avec cette relation prédisant la taille maximale des séismes induits. En conséquence, le CE estime que FG aurait dû suivre avec plus de précaution les volumes cumulés injectés en 2019 dans la perspective de limitation du risque sismique.
- Les évènements de Nov. 2019 dans l'amas de Strasbourg/La Robertsau à 5 km des puits, ont donné lieu à une réévaluation sensible, à la hausse, de la taille du réservoir géothermique. En effet, initialement la taille du réservoir (défini comme la zone d'influence du doublet) avait été estimée selon des critères classiques pour des régions géologiquement simples, à 1 - 2 km autour du doublet sans tenir compte de l'extension de la faille régionale (faille F1B). Il en ressort que l'analyse du réservoir et des perturbations hydrodynamiques introduites par l'exploitation des puits, doit tenir compte d'un contexte structural et hydrodynamique plus large lorsque des failles régionales sont présentes. Dans le cas présent, il est important de l'étendre au moins jusqu'à la zone de l'essaim de Strasbourg.
- Les séismes du Teil (Ardèche) et de Strasbourg (amas de Strasbourg) ne sont pas liés. Il n'y a pas d'observations qui permettent de démontrer le déclenchement du séisme de Strasbourg par le séisme du Teil. Cet argument avancé par FG est réfuté par le CE car un mécanisme de déclenchement à si grande distance mais induisant des réponses différenciées et non synchrones sur les deux zones (Vendenheim et la Robertsau), ne semble pas réaliste. Par ailleurs il n'y a pas non plus de structures tectoniques liant les deux, découpant ainsi l'ouest de l'Europe depuis le fossé rhénan jusqu'au Rhône. Si une structure existait, elle serait marquée par une sismicité plus régulière sur son tracé, et des séismes beaucoup plus profonds et de plus forte magnitude y seraient enregistrés. Pour le CE il ne s'agit pas d'un argument scientifique plausible.
- Pour le CE, l'absence de séisme entre Vendenheim et l'amas de Strasbourg ne constitue pas la preuve d'une discontinuité structurale entre les deux zones. Les deux amas se trouvent sur la même structure régionale (faille de Robertsau, indiquée F1B au niveau de Vendenheim). Plusieurs mécanismes sont compatibles avec un déclenchement de la sismicité de Strasbourg par l'activité des puits et une zone sans sismicité. Parmi eux, la possibilité d'un segment asismique entre les deux amas est une des hypothèses retenues par le CE. D'autres mécanismes sont possibles comme un transfert de contrainte et/ou des effets poroélastiques. Des études complémentaires doivent être menées pour identifier le mécanisme dominant.

6. Objectif N°3 – Identification d'éventuels indices d'alerte

L'objectif 3 de la mission a été discuté avec FG lors des réunions du 9 et 23 juin 2021. Ce point n'a pas été traité uniquement vis-à-vis d'éventuelles observations sur les données qui auraient pu indiquer l'occurrence d'événements sismiques significatifs, mais aussi en discutant les moyens mis en place par FG pour l'évaluation et la maîtrise de l'aléa sismique tout au long du projet.

6.1. Synthèse des observations de Fonroche Géothermie

Pour ce qui concerne le pilotage des injections, lors des opérations menées entre 2018 et fin 2019, FG indique avoir réglé les débits d'injection en fonction des magnitudes des événements enregistrés et analysés en temps réel. Concrètement, en cas d'événements sismiques de $1,5 \leq M < 2$ (niveau 2) les opérations continuent sans augmenter le débit, au contraire, si $M \geq 2$ (niveau 3), l'injection est progressivement arrêtée après échange avec la DREAL.

Ce protocole est légèrement modifié à partir de 2020, suite à l'occurrence de la sismicité de novembre 2019 sur la zone de la Robertsau à Strasbourg. Dans le nouveau protocole, FG baisse la magnitude maximale, qui passe de 2 à 1,8, pour les niveaux 2 et 3 de vigilance, relativement aux événements sismiques localisés en proximité des puits, et intègre des critères pour surveiller l'occurrence d'activité sismique dans la zone de la Robertsau. Plus précisément, en cas d'occurrence d'événements sismiques à distance (1,5 km) des puits, le niveau 2 de vigilance est atteint, alors que le niveau 3 est atteint si cinq événements de $1,5 \leq M < 2$ sont observés par le RéNaSS sur la zone de la Robertsau ou si un événement de $M \geq 2$ est enregistrée sur la même zone.

Lors des tests démarrés en septembre 2020 et suite à la sismicité de $M > 2$ survenue fin octobre 2020, FG indique avoir appliqué des mesures prudentielles ultérieures qui prévoient la diminution du débit d'injection de $1,5 \text{ m}^3/\text{h}$ dans les cas suivants :

- plus de 2 événements sismiques par heure, ou
- plus de 4 événements sismiques sur 24h avec $1,5 \leq M < 1,8$, ou
- en cas d'événements de $M \geq 1,8$.

Le débit pouvait alors être augmenté à nouveau de $1,5 \text{ m}^3/\text{h}$ si aucun des critères listés ci-dessus n'était observé pendant plus de 96 h consécutives.

En parallèle des critères de vigilance décrits avant, FG indique qu'un travail de rétro-analyse sur les données sismiques était réalisé au quotidien par l'équipe géoscience de FG. Cela impliquait l'analyse de statistiques sismiques sur les données ainsi que la cross-corrélation des formes d'onde et la relocalisation relative des événements sismiques.

Enfin, FG a indiqué que les outils décrits dans cette section et mis en place à Vendenheim pour piloter les opérations vis-à-vis de la sismicité enregistrée n'ont pas permis d'anticiper l'occurrence d'événements sismiques ressentis, cela notamment pour ce qui concerne la sismicité survenue depuis octobre 2020 et jusqu'à juin 2021.

6.2. Avis préliminaire du CE

6.2.1. Discussion sur le niveau d'aléa sismique attendu pour le site de Vendenheim

Le projet de Vendenheim, présente une situation favorable à l'occurrence de sismicité à la fois induite et déclenchée. En premier lieu, le site de Vendenheim vise un réservoir très profond (4,5 à 5 km) à proximité d'une grande faille régionale. Si la faille régionale est

apparue comme une cible intéressante pour sa forte perméabilité attendue, elle reste une structure majeure d'hébergement de séismes. En effet, au contraire de la sismicité induite, la sismicité déclenchée se caractérise par une contribution importante du chargement tectonique naturel, la perturbation humaine apparaissant comme un phénomène déclencheur d'un processus dont l'ampleur est surtout contrôlée par l'histoire géologique de la région. Du fait de la présence de cette faille régionale, le projet de Vendenheim présentait dès le départ un niveau d'aléa de sismicité anthropique élevé, en particulier en termes de sismicité déclenchée.

Par ailleurs, les puits de Vendenheim atteignent des profondeurs significatives : 4510 m (TVD) pour GT1 et 4877 m (TVD) pour GT2. Étant donné que la contrainte augmente avec la profondeur, à des profondeurs élevées il est plus fréquent d'intercepter des structures déjà soumises à des contraintes critiques où des faibles variations de la contrainte locale, due aux injections, peuvent être suffisantes pour induire un glissement.

Un autre élément qui implique un niveau élevé d'aléa sismique attendu pour le site de Vendenheim est à rechercher dans les volumes de fluide injectés dans le réservoir au cours des opérations. En effet, comme déjà discuté au chapitre 5.2.4 et en suivant les travaux de McGarr (2014), la magnitude maximale attendue pour les événements sismiques induits augmente avec le volume net (différence entre volume injecté et volume produit) injecté dans le réservoir. En utilisant massivement l'eau provenant du rabattement de la nappe phréatique sur la zone de l'ancienne raffinerie de Reichstett, FG a eu accès à de grands volumes de fluide "externes" qui ont pu être injectés dans le réservoir de Vendenheim. Le bilan des volumes injectés et produits sur le site entre 2018 et 2020 (Figure 1 et Tableau 4) montre que 100 764 m³ de fluide sont restés piégés dans le sous-sol si on considère l'effet cumulé sur GT1 et GT2. Cela représente un volume net significatif, qui fait augmenter le risque d'induire des événements sismiques de magnitude plus élevée. A titre comparatif, on a ici un facteur 10 supérieur au volume mis en œuvre pour développer le puits GRT1 du site de Rittershoffen en 2013 (Maurer et al., 2020), ou un facteur 5 sur les volumes utilisés à Soultz-sous-Forêts sur chaque puits profond, sachant par ailleurs que les puits de ces deux derniers sites ont été développés séparément avec de grands intervalles de temps entre chaque opération (Figure 40). On note aussi en Figure 41 que la magnitude des événements sismiques atteinte à Vendenheim est tout à fait comparable aux relations volume-magnitude observées sur d'autres sites similaires. Le comportement de site de Vendenheim ne consiste ainsi pas en une exception concernant ces relations volume-magnitude. On constate a posteriori, que ces relations magnitude-volume auraient pu être utilisées pour piloter l'opération d'injection à Vendenheim et aurait probablement permis d'anticiper les magnitudes atteintes, mais il faut reconnaître que ces approches restent très simplifiées et débattues dans la communauté scientifique

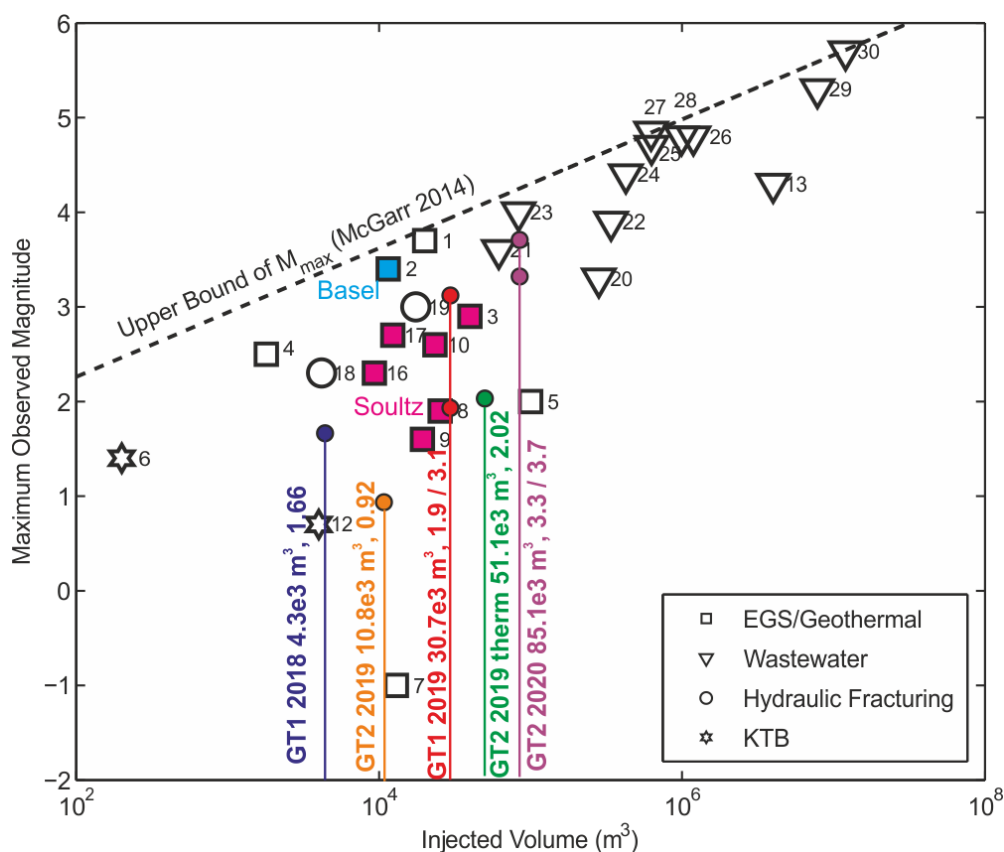


Figure 40 : Relations volumes-magnitudes maximales modifiées d'après Zang et al. (2014). Les carrés correspondent à des projets de géothermie profonde. Les données correspondant à des sites dans le Graben du Rhin sont colorées (Bâle en bleu et Soultz en rouge). Les volumes injectés à Vendenheim lors de différentes opérations d'injection sont ajoutés sur la figure (lignes verticales et ronds colorés) avec indication du puits et de l'année concernée, du volume injecté et de la magnitude maximum déclenchée par l'injection. Lorsque deux magnitudes sont indiquées, la plus faible correspond à un événement prenant place pendant l'injection et la plus élevée après l'arrêt de l'injection (sismicité différée).

Également, un élément qui aurait dû attirer l'attention de FG sur l'aléa sismique potentiel pour le site de Vendenheim, est lié aux valeurs d'indice de productivité (IP) ou d'injectivité (II) estimées pour les deux puits (voir section 2.2.2). La valeur d'IP était globalement comprise entre 0,5 et 2 l/s/bar sur les deux forages aux différentes périodes de sa mesure, et donc plutôt faible (Figure 2). Lors des opérations de 2020, il est important de noter que sa valeur est particulièrement faible sur GT2 (Figure 3, graphique de droite), où elle est globalement inférieure à 0,5 l/s/bar, et n'atteint pas la valeur de 1 l/s/bar. La Figure 41, issue de la synthèse publiée par Zang et al. (2014), montre bien la possibilité accrue d'occurrence de séismes de forte magnitude (jusqu'à 5,4) dans les cas de faible injectivité. Une injectivité faible traduit la plus forte pression nécessaire au sein du réservoir pour un débit d'injection donné, donc de la plus faible contrainte normale effective présente sur tous les plans de failles hydrauliquement connectés au forage. Une plus faible contrainte effective est classiquement associée à un risque accru de génération de séisme. Cette injectivité, au-delà d'un indice d'injection, doit aussi être considérée comme un indicateur possible de sismicité. Il est donc clair que les pressions et débits de fluide mesurés dans le réservoir n'étaient globalement pas favorables à la production géothermale mais plutôt favorables à la génération de sismicité. Ce point pouvait déjà être appréhendé sur les premières mesures effectuées dans GT1 en 2019 et plus particulièrement lors des opérations de 2020 autour de GT2.

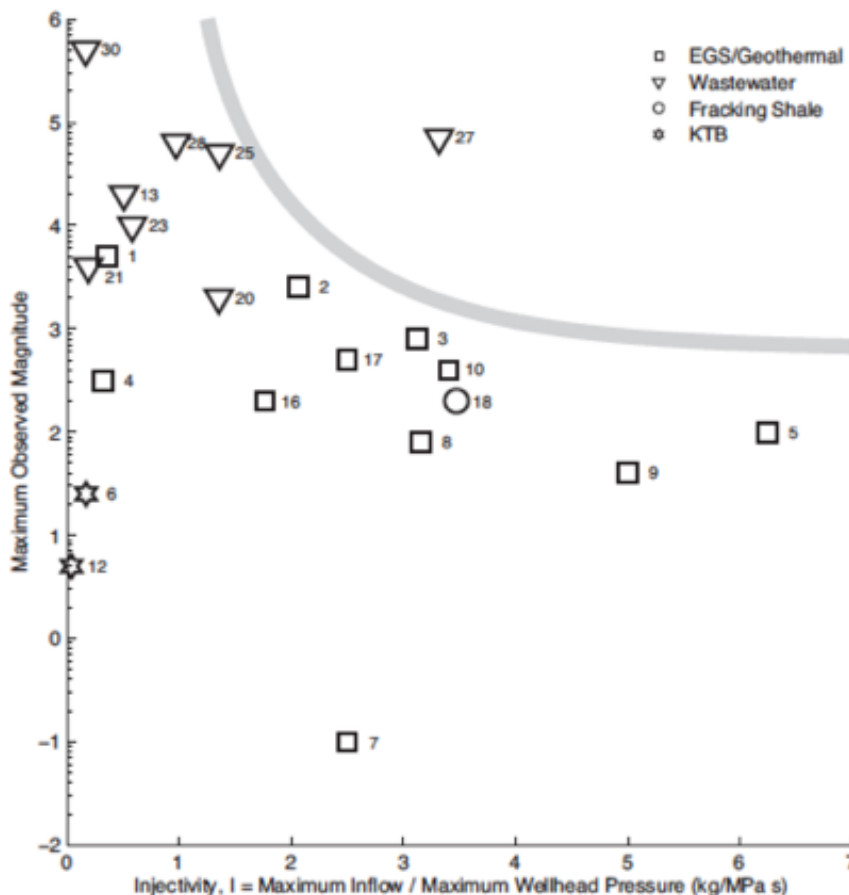


Figure 41 : Relation entre magnitude sismique et injectivité (Zang et al., 2014).

Enfin, la sismicité de 2019 à grande distance des puits aurait dû être considérée avec plus de précaution par FG. Les deux scénarios, à savoir une sismicité induite ou une sismicité naturelle posaient tous les deux, de sérieuses questions en termes d'aléa sismique. Dans le cas d'une sismicité induite, ces événements montraient que le réservoir était sensiblement plus grand que prévu et donc que le modèle géologique et hydro-géologique prédictif pour le projet était à revoir profondément. Dans le cas d'une sismicité naturelle, la question de l'aléa et donc du risque était encore plus importante. Ces événements sismiques montraient alors que la faille visée était beaucoup plus proche de l'instabilité que prévu puisqu'en situation de générer naturellement de la sismicité. Ainsi l'émergence d'une zone de faille particulièrement instable entre la Wantzenau et la Robertsau, soit sur 5 km, aurait nécessité une analyse de risque d'un séisme majeur sur cette zone, à savoir une zone de rupture compatible avec un séisme de magnitude de l'ordre de 5 dont les conséquences auraient pu être catastrophiques.

Ces éléments auraient dû conduire FG à s'interroger sur le niveau de sismicité attendu pour le site de Vendenheim et à prendre plus de précautions dans la conduite des opérations sur le site.

6.2.2. Discussion sur la conduite des opérations

Les opérations ont toujours été réalisées en supposant que les puits du doublet étaient en connexion hydraulique entre eux. Cette hypothèse, qui aurait dû être vérifiée à travers les tests d'interférence et de traçage de 2020, a des implications importantes sur les volumes de fluide injecté qui peuvent rester piégés dans le sous-sol, avec des conséquences sur la mise en pression du réservoir au droit des puits, voire à distance. Cet aspect est particulièrement pertinent à évaluer notamment vis-à-vis du protocole de mise en sécurité du doublet adopté par FG fin octobre 2020, suite aux séismes de M 2,1 et 2,7. Comme déjà discuté en section 4.2.4, afin de minimiser la sismicité lors de la circulation du doublet, FG a continué les injections en appliquant un débit d'injection qui soit à l'équilibre (ou équivalent) avec le débit artésien du puits producteur, sans agir sur la pression appliquée sur le réservoir. Ce protocole de mise en sécurité implique nécessairement que les réservoirs au droit des puits soient en connexion hydraulique entre eux et, au vu des événements déclenchés à partir de novembre 2020, il s'est révélé inefficace pour la maîtrise de la sismicité.

La prise en compte d'un scénario alternatif basé sur une mauvaise connexion hydraulique entre les puits aurait probablement permis d'adopter des stratégies plus sécuritaires pour la conduite des opérations. Également, la pression dite artésienne, estimée pour la circulation dite de sécurité, s'est avérée erronée (cf. Chap. 7.2.1), remettant en cause la stratégie de baisse de l'aléa.

De même, comme discuté en section 3.2.7, FG a interprété la sismicité observée en fond de puits GT2 depuis novembre 2020 comme ayant lieu le long d'un plan de faille d'orientation NE-SW (N40) qui était en fait un des plans nodaux des mécanismes au foyer mais celui le plus stable vis-à-vis de l'état de contrainte local et un critère de rupture type Coulomb. L'autre plan nodal des mécanismes au foyer (orientation NW-SE) n'a été considéré ni dans les analyses, ni dans les modèles géologique et géomécanique, ce qui a conduit FG à sous-estimer l'aléa sismique potentiel et de ce fait à suivre des protocoles opérationnels de mise en sécurité inadaptés, en tous cas qui ne permettaient pas de maîtriser la sismicité. Cela est particulièrement vrai pour le protocole de mise en sécurité du doublet adopté par FG après la sismicité de début novembre 2020 qui visait à fixer des baisses de débit sur la base de certains paramètres d'intensité (nombre et magnitude) de la sismicité enregistrée (voir section 3.1.2). En effet, sur la base du modèle géomécanique réalisé par Q-con (sous la responsabilité de FG) qui ne prend pas en compte ces structures d'orientation NW-SE plus instables et qui n'indique pas d'instabilité potentielle pour les structures d'orientation NE-SW (voir section 4.2.7), FG écarte la possibilité que la sismicité soit due à la mise en pression des failles interceptées par le fond du puits GT2. FG suppose plutôt que la sismicité est due aux chutes de débit d'injection. C'est uniquement sur cet aspect que FG structure son protocole de mise en sécurité.

D'après les échanges et données mises à disposition par FG, il semble que les modèles (géologique, géomécanique et hydrogéologique) qu'il a pu réaliser n'aient pas ou très peu été utilisés pour élaborer, et adapter les protocoles de tests en fonction de la réponse du réservoir attendue (en termes de sismicité et de comportement hydraulique). Le premier modèle hydrogéologique paraît avoir été construit que fin 2020, de même le modèle géomécanique a évolué très tardivement et à la suite de la sismicité ressentie à partir d'octobre 2020.

Enfin, nous soulignons que le choix de FG de guider les opérations sur la base de la "surpression réservoir" et non pas sur la pression en tête de puits a biaisé l'interprétation des niveaux de pression effectivement exercés sur le réservoir, ce qui a porté à sous-estimer l'aléa. En effet, contrairement à la pression en tête de puits, la surpression au réservoir n'est pas une mesure directe mais une estimation qui repose sur plusieurs hypothèses et qui est de ce fait entachée d'incertitudes importantes (voir section 2.2.1).

6.2.3. Discussion sur l'interprétation de la sismicité

Une analyse a posteriori sur les indices d'alerte nécessiterait un travail approfondi sur les données hydrauliques et sismiques pour l'identification d'éventuelles variations spatio-temporelles (variations de la pression, de la sismicité enregistrée) qui auraient pu avoir lieu avant l'occurrence d'événements sismiques significatifs. Une telle étude implique la rétro-analyse des données brutes, ce qui va au-delà des travaux menés dans le cadre de la phase 1 de la mission. Toutefois, dans ce contexte, nous considérons que la sismicité survenue début novembre 2020, avec plusieurs événements de $M > 2$, aurait dû alerter sur l'occurrence d'un phénomène d'instabilité dans la zone du réservoir en fond de puits GT2. En effet, au-delà des interprétations sur les mécanismes au foyer des événements sismiques tel que discuté en section 6.2.2, de simples considérations sur la localisation de la sismicité qui montre une migration évidente vers le fond du puits GT2 déjà à partir du 5 novembre 2020, auraient permis de comprendre que les événements de novembre n'étaient pas de simples répliques de l'événement de $M 2,8$ du 28 octobre. Cela aurait dû mettre en cause le niveau de pression exercé sur le réservoir au vu des volumes de fluide injectés dans GT2 depuis la deuxième moitié de 2020, et aurait dû remettre en cause la poursuite des injections, sans attendre la survenue du séisme de $M 3,3$ du 4 décembre. Dans ce contexte, nous considérons que la non-maîtrise de la sismicité de $M > 2$, notamment celle observée à partir de novembre 2020, n'est pas à attribuer aux outils mis en place pour piloter les opérations vis-à-vis de la sismicité enregistrée (voir 6.1), comme affirmé par FG, mais plutôt aux interprétations erronées ainsi qu'aux choix opérationnels opérés par FG.

6.3. Proposition d'analyses complémentaires

- La recherche d'indicateurs sur les séries temporelles précédant les événements sismiques majeurs (e.g. pressions, débits, localisation des séismes et évolution des moments sismiques par rapport aux puits).
La première phase d'expertise s'est appuyée sur les analyses de FG et a permis une meilleure qualification des données. Ce projet de seconde phase doit permettre aux experts (voire la communauté scientifique) de s'approprier les données brutes pour analyser de manière approfondie les séries temporelles sur la base de leur propre expertise : représentation paramétrique, analyse multifactorielle (analyse en composantes principales), corrélations temporelles et spatiales, définition d'attributs, reconnaissance de patterns, développement d'approches par apprentissage machine supervisée, etc.
- La rétro-analyse du fonctionnement/dysfonctionnement du TLS de Fonroche.
- Les conditions d'application d'approches TLS alternatives (ATLS) sur les données de Vendenheim afin d'évaluer leur capacité prédictive dans ces conditions spécifiques. Analyse de l'énergie mécanique injectée dans le réservoir (intégration du produit volume * pression) et comparaison avec l'énergie radiée sismiquement lors des différents protocoles de stimulation. Recherche de comportements anormaux (cf. Bentz et al, GRL, 2020) et de signaux précurseurs.

6.4. Objectif N°3 – Principaux points à retenir

Au vu des grandes profondeurs atteintes, des faibles valeurs d'injectivité mesurées en GT1 et GT2, ainsi que des grands volumes de fluide injectés par l'utilisation de l'eau provenant du rabattement de la nappe phréatique sur le site industriel de Reichstett (nappe d'Alsace), le site géothermique de Vendenheim présentait, un niveau d'aléa sismique pouvant être considéré comme élevé. Ces observations auraient dû inciter à plus de précaution dans la conduite des opérations sur le site.

En termes de signaux d'alerte de la sismicité, la proximité de la faille de la Robertsau et les volumes injectés importants imposaient d'agir avec précaution, la structure géologique étant

favorable à la sismicité et les volumes injectés ayant dépassé des seuils pour lesquels des précédents de séismes importants avaient été observés. Cependant, l'amas sismique de Strasbourg/La Robertsau et de l'amas de Vendenheim/La Wantzenau sont différents. Il n'y avait cependant que très peu d'indices permettant de prévoir la localisation de l'amas de Strasbourg/La Robertsau à 5 km des puits. Par contre, les plus forts séismes de La Wantzenau ont eu lieu au proche voisinage des puits avec signaux d'alerte dont certains avaient été identifiés par l'EOST.

Les procédures opérationnelles mises en place par FG se sont toujours placées dans des scénarios favorables. Il s'agit en particulier de la présupposition d'une bonne connexion hydraulique entre les puits ce qui a eu des conséquences sur les volumes injectés, et donc sur la pression du réservoir et l'aléa sismique.

FG a retenu la valeur calculée de "surpression réservoir" plutôt que la pression lue en tête de puits pour la gestion des opérations. Il ne s'agit pas d'une mesure, mais d'une valeur calculée avec différentes hypothèses d'entrée généralement peu solides. Sur la base de ces considérations, les protocoles opérationnels de mise en sécurité du doublet adoptés par FG, en particulier à partir d'octobre 2020, sont discutables. Ils se sont révélés inefficaces pour la maîtrise de la sismicité.

Les modèles géologiques, hydrogéologiques, mécaniques auraient dû être réalisés et améliorés au fur et à mesure de l'avancée du projet. Ils auraient dû avoir un rôle prédictif, en permettant d'anticiper le comportement sismique du réservoir (y compris avec les incertitudes liées à la connaissance disponible) avant la mise en œuvre des opérations.

La non-maîtrise de la sismicité de $M > 2$, notamment celle observée à partir de novembre 2020, peut en partie être attribuée aux interprétations erronées ainsi qu'aux choix opérationnels opérés par FG. En effet, l'occurrence d'une sismicité persistante entre le 5 et le 13 novembre 2020 dans la même zone du réservoir, avec plusieurs événements de $M > 2$ qui s'enchaînent à quelques jours d'intervalle, aurait dû alerter sur l'occurrence d'un phénomène d'instabilité, soutenu par la mise en pression continue au fond du puits GT2, et aurait dû permettre un questionnement sur la poursuite des injections.

7. Objectif N°4 – Analyse de l'état post-opération du réservoir

7.1. Synthèse des observations de Fonroche Géothermie

Le sujet de l'état post-opérations du réservoir a été discuté avec FG en particulier lors de la réunion du 23 juin 2021. Pour ce qui concerne le puits producteur (GT1), FG a indiqué que la pression lue en tête était oscillante entre 1,2 et 1,3 bar, et en train de remonter doucement après l'arrêt du puits (le 2 janvier 2021), quand il montrait une pression variable entre 0,8 et 1 bar (voir Figure 42). Selon FG, ce puits (et non pas le réservoir géothermique à son voisinage) aurait été refroidi à cause de son arrêt progressif très lent (du 4/12/2020 au 2/01/2021, voir Figure 42). L'hypothèse avancée par FG est que la colonne de fluide dans le puits était en train de se réchauffer après l'arrêt suite à quoi la densité baisserait et par conséquent la pression en tête de puits remonterait. Au moment de la discussion, selon FG, ce puits n'était pas à l'équilibre, ni d'un point de vue thermique, ni pour ce qui concerne la pression, mais il était en train de se stabiliser lentement même si encore très loin de sa pression artésienne (entre 15 et 17 bar selon FG).

Quant au puits injecteur (GT2), lors de la discussion, FG a indiqué une pression lue en tête pour ce puits d'environ 13,3 bar (le 23 juin 2021, lors de notre entretien) qui était en baisse régulière avec une vitesse de descente stable d'environ 0,1 bar par jour (24 h) (Figure 42). Selon FG, le puits GT2 serait passé en dessous de la pression artésienne (estimée autour de 17 bar par FG) fin avril 2021. L'hypothèse faite par FG lors de la discussion est que ce puits n'était pas encore stabilisé car la pression continuait à diminuer mais que, vu la baisse continue et stable de la pression, il était probablement en train d'arriver vers une stabilisation.

FG indique que la pression continuait d'être suivie dans les deux puits, mais aucune mesure de température n'était en place. Pour ce qui concerne le suivi sismique, FG a indiqué que les stations temporaires étaient en place à l'époque de la discussion avec un relevé des données tous les 15 jours environ. En revanche, les stations permanentes continuaient à être suivies en temps-réel.

7.2. Avis préliminaire du CE

Nous souhaitons ici donner un avis préliminaire sur l'état post-opération du réservoir de Vendenheim sur la base des discussions tenues avec FG, ainsi qu'à partir des analyses menées par le CE sur l'occurrence, le 26 juin 2021, de l'événement sismique de M_lv 3,9 (selon le RéNaSS) et sur la base de la note rédigée à ce sujet par le CE en date du 30 juin 2021.

7.2.1. Point sur la pression mesurée en tête de puits

Il apparaît important d'évaluer l'état de pression sur le réservoir pour comprendre son état post-opération.

La chronique de la Figure 42 (haut) présente l'évolution de la pression en tête des puits depuis le début de la circulation en doublet (production GT1 / injection GT2), le 02/11/2020 jusqu'au 10 septembre 2021.

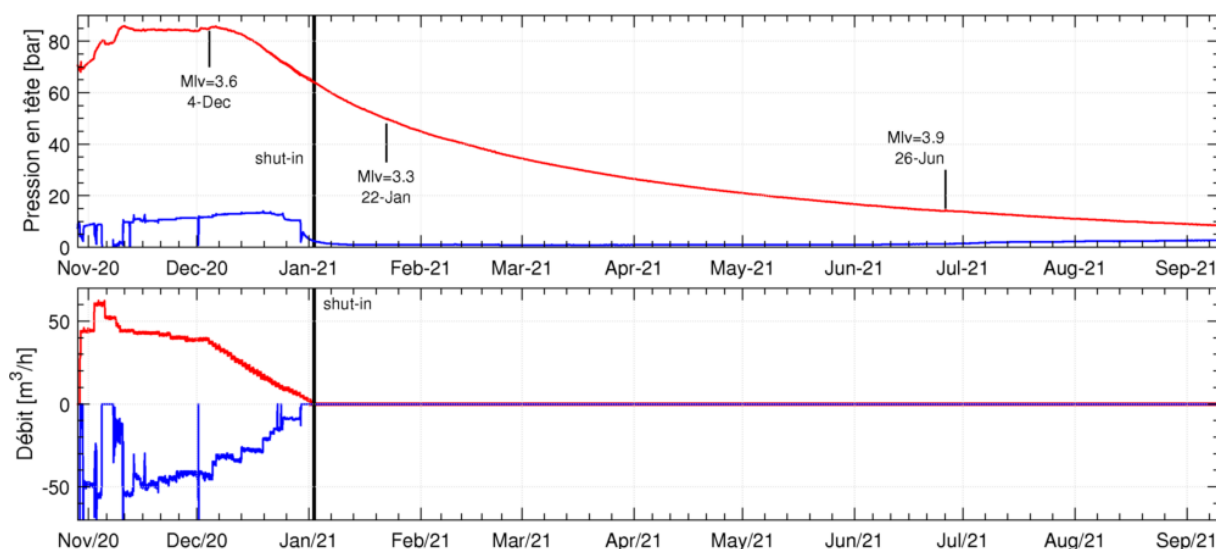


Figure 42 : A : Evolution de la pression en tête de puits de GT2 depuis le 1/11/20 (tracé rouge) ; B : chronique des débits produits et injectés dans GT1 (tracé bleu) et GT2 (tracé rouge) depuis le 1/11/20. Le shut-in a lieu le 2-jan-2021 à 12:35 (trait noir).

La Figure 42 (bas) montre l'évolution des débits pendant cette circulation jusqu'à la fermeture des puits (shut-in). Le doublet a globalement fonctionné en équilibrant approximativement l'injection et la production (~50 m³/h) jusqu'au séisme du 4/12/2020 à partir duquel injection et production ont été baissées progressivement jusqu'à l'arrêt. La pression atteint un maximum de 88 bar lors de la circulation de novembre 2020 puis dès le 6 décembre 2020, la pression n'a fait que descendre suite à la réduction du débit d'injection et à l'arrêt du puits (shut-in), le 2 janvier 2021 (Figure 42 du haut).

Une analyse de la descente de pression dans GT2 suivant le shut-in (arrêt) (Figure 43) indique une décroissance exponentielle de la pression p avec le temps t , ici exprimé en jours, de type $p(t) = p_e + \Delta p \exp\left(-\frac{t}{t'}\right)$ avec la pression d'équilibre $p_e = 2.6$ bar, un Δp lors du shut-in de 50.8 bar et un temps caractéristique $t' = 117$ j (~3.75 mois).

La régression proposée sur les données (par modélisation mathématique) s'attache à bien reproduire la fin de la courbe (>80 jours après le shut-in) alors que le début de la courbe est certainement influencé par l'historique complexe d'injection précédent le shut-in. Le choix de la période de régression va influencer légèrement les paramètres d'ajustement mais avec des pressions à l'équilibre toujours relativement faibles (<5 bar). La pression en tête de GT1 varie faiblement en très légère montée avec une pression de 2,7 bar le 10 septembre 2021 depuis un minimum à 0,8 bar atteint en février 2021. Il est intéressant de constater que la pression mesurée en tête de GT2 était déjà plus faible que les 17 bar de pression artésienne estimée par FG dès fin mai 2021 et continue de descendre. En première estimation et suivant la décroissance exponentielle mentionnée ci-dessus, il est probable que la pression se stabilise vers une valeur de 2,5 à 3,5 bar prédite par la modélisation de l'évolution de la pression $p(t)$ introduite précédemment. Pour GT1, la pression est déjà très stable et est dans la fourchette de pression à l'équilibre estimée pour GT2. Il est à noter que ceci remet en question le calcul de 'surpression réservoir' de FG.

Un log de pression et température dans les puits à l'équilibre fournirait une information complémentaire à cette analyse et permettrait de fixer définitivement la question de la pression artésienne estimée. Ces données permettraient également d'établir les caractéristiques du régime thermique aux alentours des puits de Vendenheim et ainsi de mieux comprendre les mécanismes de transport de chaleur actifs sur le site.

Cette analyse met également en évidence la lenteur d'équilibrage du puits GT2. Ceci est symptomatique de puits avec faible indice d'injectivité/productivité pénétrant un réservoir de transmissivité faible.

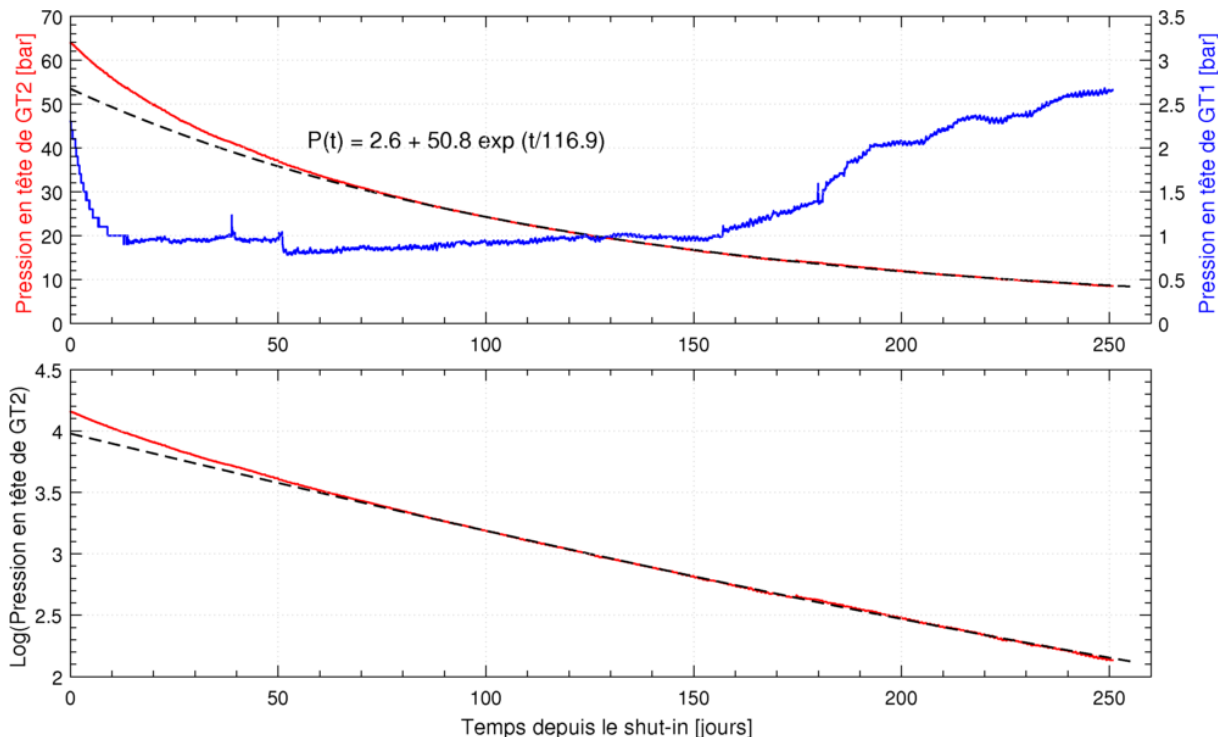


Figure 43 : Analyse préliminaire de la décroissance de pression postérieure au shut-in du 2-jan-2021 à 12:35. En rouge les données et en pointillé une régression exponentielle du type : $p(t) = p_e + \Delta p \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$.

7.2.2. Point sur l'occurrence du séisme du 26 juin 2021

Le séisme du 26 juin 2021 (M 3,9), localisé à 5 km de profondeur et à proximité directe du puits GT2 (Figure 44), montre que le système au voisinage de ce puits était encore fortement instable 6 mois après l'arrêt des injections (shut-in) qui a eu lieu le 2 janvier 2021.

Nous observons que le plan de glissement le plus probable pour ce séisme est un plan d'orientation NW-SE (N129) et non pas NE-SW (N40) (Figure 44) comme indiqué par FG. En effet, comme décrit plus en détail en section 6.2.3, les premiers calculs géomécaniques réalisés par le CE, indiquent que les structures orientées N129 apparaissent plus instables que celles d'orientation N40. Par ailleurs, l'orientation N129 est cohérente avec l'alignement de la sismicité enregistrée au NW du séisme du 26/06/2021 (Figure 44).

Le séisme du 26/06/2021 et ses répliques s'inscrivent dans la continuité de la sismicité enregistrée en fond de puits GT2 depuis octobre 2020. En effet, c'est dans cette même zone que se localisent tous les séismes de $M > 3$ (Figure 44), notamment le séisme du 04/12/2020 (Mlv 3,6) ainsi que celui du 22/01/2021 (Mlv 3,3) qui avait également eu lieu en phase de shut-in. Il convient de remarquer que cette zone devient sismiquement active après le prolongement et l'approfondissement du puits GT2 (d'environ 4 400 m à 5 000 m), démarré fin 2019.

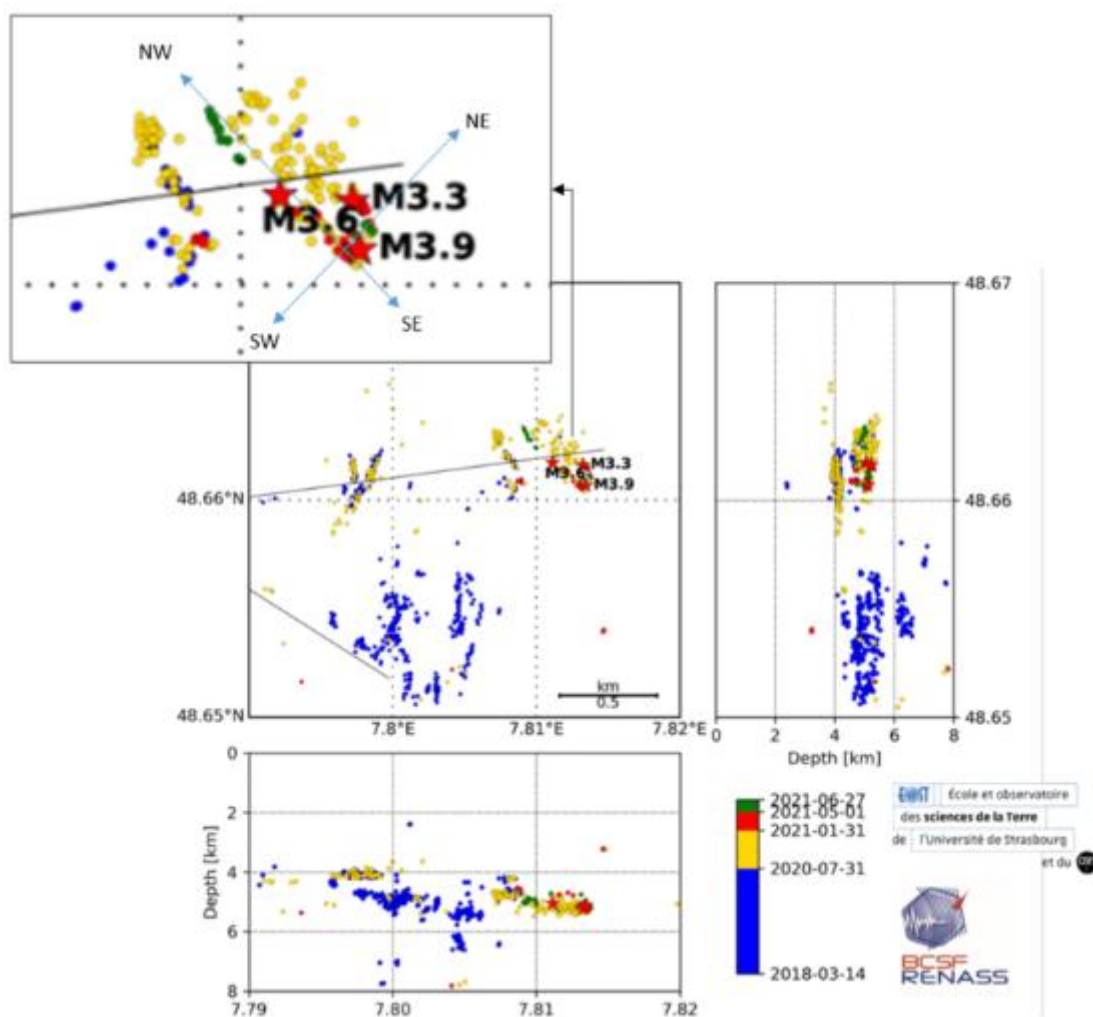


Figure 44 : Localisation relative de la sismicité sur le site de Vendenheim issue des analyses de l'EOST (voir note de l'EOST du 27/06/2021).

L'occurrence de ces événements sismiques en fond de puits GT2 est à attribuer en premier lieu aux surpressions de fluide, liées aux injections, qui restaient encore sensiblement élevées (14 bar) plusieurs mois après le shut-in (voir section 6.2.2). Par ailleurs, il est important de considérer que les surpressions de fluide sont confinées au proche voisinage de GT2 car il semble que GT1 et GT2 traversent ou atteignent deux réservoirs indépendants ou très faiblement connectés. Ainsi, le volume injecté dans GT2 depuis octobre 2020 jusqu'à début janvier 2021 serait resté en grande partie localisé autour de GT2 dans un volume pressurisé restreint, ce qui a pu modifier durablement la stabilité des failles à son voisinage. Enfin, il faut également ajouter à ces considérations que le plan de faille d'orientation N129, probablement responsable de l'occurrence de cette sismicité, a une direction mécaniquement instable (voir section 6.2.3). Par conséquent, de faibles variations de pression peuvent être suffisantes pour induire un glissement.

7.2.3. Point sur la stabilité mécanique des failles

La carte des séismes du 26 juin 2019, relocalisés par le RéNaSS (Figure 44), permet en première analyse d'identifier des directions d'alignement N160-N20, N40, N130, laissant supposer la présence de discontinuités actives dans le réservoir de Vendenheim après les opérations, selon ces directions. Comme dit précédemment, les séismes enregistrés en champ proche du puits GT2 montrent des alignements plutôt N129 que N40 (Figure 44).

Notons aussi que les mécanismes au foyer déterminés pour les séismes les plus importants ont des plans nodaux N130 et N40.

Les premiers calculs géomécaniques (Figure 22) indiquent une instabilité mécanique plus forte de la direction N129 par rapport aux directions N40 ou N70. Ces calculs géomécaniques préliminaires sont effectués en utilisant le tenseur de contrainte estimé à Soultz-sous-Forêts pour une profondeur de 5,5 km ($S_1 = S_H = 153$ MPa, $S_2 = S_V = 139$ MPa, $S_3 = S_h = 80,3$ MPa), une direction SH orientée N170 et une pression hydrostatique pour un fluide de densité 1000 kg/m^3 ($P_f = 55$ MPa). Ces calculs préliminaires, bien que susceptibles d'incertitudes et basés sur des hypothèses fortes quant aux données utilisées, permettent d'identifier au moins en première approximation les directions de faille les plus instables dans le champ de contrainte local.

Avec ces conditions de chargement et de pression, les directions des deux plans nodaux des mécanismes aux foyers (N129-E80 et N040-E85) calculés pour le séisme du 26 juin 2021 sont proches de la rupture (critère de Coulomb) car elles sont situées sur la partie à forte contrainte cisailante du grand cercle de Mohr et proches du critère de rupture (étoiles rouge et verte de la Figure 22).

De faibles variations de la cohésion (ici supposée à 3 MPa, i.e. 30 bar), de la friction (ici supposée à 0,58) ou de quelques MPa de la pression de fluides sont donc susceptibles d'affecter sensiblement la stabilité des failles identifiées lors des derniers événements sismiques (reconnus par les mécanismes au foyer et les alignements des séismes). Ces événements et premiers calculs suggèrent qu'il existe à l'état post opératoire des conditions géométriques et mécaniques dans le réservoir susceptibles de produire des séismes pour de faibles variations de pression, de contraintes ou de résistance des failles.

7.2.4. Point sur les actions à mettre en place sur le site de Vendenheim

Pour surveiller l'évolution du réservoir, le maintien du monitoring sur le site de Vendenheim, à la fois en termes d'enregistrements sismiques et géodésiques et de suivis des données dans les puits (pression, niveau, composition chimique, suivi des gaz), est indispensable.

Avant d'envisager une quelconque action sur le puits (réouverture, mise en production de GT2, autre ?), il s'avère indispensable de mieux connaître le réservoir, le cadre structural, local, les failles secondaires, leurs relations avec la faille régionale majeure N20, le relai structural. A défaut de pouvoir bien connaître la structure géologique du site et ses relations avec la faille de Strasbourg, des modèles alternatifs doivent être proposés pour pallier aux incertitudes. Il faudrait aussi mieux comprendre le lien entre la zone faillée entre le site de Vendenheim et l'amas de Strasbourg et la sismicité enregistrée. Ce n'est qu'avec une meilleure connaissance du site (voir le chap. 7.3 suivant) que la possibilité d'actions sur les puits pourra être envisagée. Sans cela, une mesure précipitée pourrait au contraire être plus dangereuse, avec le déclenchement de nouvelles perturbations.

7.3. Proposition d'analyses complémentaires

La question de l'état post-opération du réservoir est très étroitement liée à la compréhension des caractéristiques et de la réponse du réservoir jusqu'à présent. Par conséquent, certaines des analyses complémentaires discutées dans les chapitres précédents sont aussi nécessaires dans le cadre d'une meilleure caractérisation de l'état actuel du réservoir. En complément, nous proposons de réaliser les analyses supplémentaires décrites ci-dessous :

- Une modélisation paramétrique de l'effet de la pression sur la stabilité des failles pourra être produite sur de nouveaux modèles 3D alternatifs à ceux proposés par FG

(voir propositions en section 4.3.1). Nous viserons à modéliser l'effet des variations de pressions sur la perturbation en orientation et en magnitude des contraintes dans le réservoir, pouvant déstabiliser les failles sur des temps longs (plusieurs mois après les opérations en forage). Cette étude portera en particulier sur les conditions post opératoires en contexte de dépressurisation effective dans le réservoir en 2021 (voir section 7.2.1, Figures 42 et 43). Les résultats obtenus seront comparés aux données de sismicité induite de juin 2021

- Il pourrait aussi être envisagé de mesurer la température et la pression à l'équilibre dans le forage afin de régler certaines questions ouvertes, telle que le niveau de pression artésienne. Le maintien du monitoring dans les puits (pression et température à minima) pourrait aussi permettre d'évaluer la réponse du réservoir à grand échelle, utile par exemple en cas de reprise des opérations à Illkirch.
- Le temps caractéristique d'évolution de la pression est de 3,5 mois. Il définit un temps caractéristique de la déformation du réservoir qu'il serait intéressant d'essayer de suivre par les outils de mesure de la déformation long terme (GPS, InSAR). Des mesures inclinométriques en puits seraient un complément utile.

7.4. Objectif N°4 – Principaux points à retenir

Pendant la phase d'arrêt du doublet (shut-in) en décembre 2020 et janvier 2021, deux séismes de magnitude supérieure à celle enregistrée jusqu'alors ont été enregistrés au niveau du doublet. En juin 2021, soit 6 mois après l'arrêt, il y a eu une autre secousse de magnitude plus forte. Ces séismes montrent que le réservoir peut avoir des temps de réponse très longs. L'échelle de temps à considérer pour une évaluation de l'aléa sismique doit être plus longue que celle retenue jusqu'alors sur Vendenheim pour une analyse de la réponse du réservoir aux activités qui y ont été développées.

Si on se réfère aux relations liant magnitude maximale et volumes injectés (McGarr 2014), a priori sur le site de Vendenheim, vu les volumes injectés, les séismes ne devraient pas dépasser des magnitudes de l'ordre de 4. Néanmoins il reste indispensable de vérifier (dans le cadre d'un projet Recherche et développement) si cette relation est applicable au contexte de Vendenheim et d'en mesurer les incertitudes. En complément, il faut surveiller la zone de la faille entre l'amas de Vendenheim et l'amas de Strasbourg car une déstabilisation en un seul mouvement pourrait être à l'origine d'un événement de plus forte magnitude que celle enregistrée jusque-là.

L'analyse des enregistrements des séismes et le calcul de l'état de contrainte montrent qu'ils existent des failles N130 (ou NW-SE) au niveau du réservoir. Ces failles ne sont pas optimalement orientées pour connecter les deux segments principaux de F1B et les forages, mais sont par contre optimalement orientées pour générer des séismes et conduire les fluides dans une direction différente. Si la taille de ces failles est assez importante et que le différentiel de friction statique et dynamique est fort sur ces failles, cette configuration peut toujours générer des séismes de magnitude importante, tels que mesurés fin 2020 et en juin 2021.

Aujourd'hui, le réservoir est en phase de stabilisation lente. La pression semble s'approcher d'une stabilisation, mais probablement que les températures sont encore perturbées. De plus une déformation certainement permanente a été induite perturbant durablement l'état des contraintes dans le réservoir. Dans ces conditions, il est indispensable de continuer à mesurer les températures et pressions dans les puits, et maintenir le réseau sismique existant, de continuer le traitement des données. Il serait également nécessaire de compléter cette surveillance par un réseau de suivi des déformations possibles en surface (suivi géodésique GSS, InSar), voire acquérir une imagerie de réservoir 4D (tomographie par

exemple), faire un suivi géochimique des gaz (ou des fluides en profondeur si les puits le permettent), réaliser régulièrement des profils (logs) thermiques au cours des prochains mois. Ces mesures permettront de suivre une éventuelle anomalie dans le processus de retour à l'équilibre géochimique et thermique du réservoir.

8. Objectif N°5 – REX de Vendenheim pour les sites géothermiques voisins

Ce chapitre n'est qu'un avis de REX préliminaire, car nous manquons de synthèse et analyse des données, ainsi que de compréhension du système à cette échéance pour donner un avis plus complet.

8.1. Synthèse des observations de Fonroche Géothermie

Lors de la réunion du 2 juillet 2021 avec le CE, Fonroche Géothermie a explicité les enseignements qu'ils tiraient de leur expérience sur le site de Vendenheim. Les points principaux sont ici synthétisés :

- Concernant le choix de la cible, vu la complexité de la zone, FG pense que dans le futur il faut éviter des zones relais et rester sur des zones de failles plus simples.
- FG propose aussi d'éviter de connecter des failles qui ont des résistances différentes, comme c'est observé à Vendenheim entre le Permien et le socle. Selon FG il faut concevoir des architectures de puits différentes et il faut couvrir par un casing la zone qui ne sera pas exploitée. En l'occurrence, dans le cadre de Vendenheim, FG pense qu'il faudrait couvrir le Permien, le cuveler et le cimenter de façon à ce qu'il ne soit plus connecté.
- Dans le contexte spécifique de Vendenheim, si ce sont les failles hercyniennes qui génèrent la zone relais, et si ce sont-elles qui créent la sismicité, alors il faudrait selon FG arriver à les éviter.
- Une autre proposition de FG est celle de travailler sur des modèles de doublet dissymétrique. Le doublet actuel de Vendenheim est symétrique en termes de profondeur, par construction et par choix, puisque le choix entre le puits injecteur et producteur n'avait pas été fait en amont. En choisissant en amont le rôle des puits, il serait possible de forer le puits exploratoire plus profond (puits producteur) et de faire un puits injecteur qui resterait en top socle. L'idée étant de limiter la diffusion du fluide dans les zones qui seraient sismiquement plus réactives. Dans ce contexte, il y a l'exemple actuel en Cornouailles (United Downs Deep Geothermal project UDDGP (Cornwall, UK)). Dans ce projet, le chargement gravitaire de l'eau refroidie est utilisé pour aller vers le puits producteur qui reste en zone profonde pour avoir la température nécessaire.
- En termes d'informations disponibles et d'acquisition d'informations, FG liste les points suivants qui mériteraient d'être développés pour ce type de projet :
 - des tirs de calibration dans les puits,
 - sismique réflexion 3D sur une surface réduite, puisque on est en milieu urbain. Il faudrait réfléchir à des mini 3D, avec des technologies wifi qui permettent d'avoir des lignes non pas strictement rectangulaires, mais peut-être des lignes qui peuvent être retraitées après pour faciliter la mise en place. En effet, FG indique que c'est la logistique dans les zones péri-urbaines qui peut être bloquante. L'objectif des campagnes 3D serait de voir effectivement s'il y a des décalages des failles verticales et d'essayer d'imaginer des pincements de failles ou des zones qui seraient faiblement perméables.
 - Pour les imageries de parois, FG pense qu'il faudrait développer des technologies à haute température, qui ne nécessiteraient pas forcément un refroidissement du puits. Des technologies de ce type existent déjà mais ne sont pas adaptées à la haute température car elles ne sont pas développées dans le cadre de la géothermie. FG pense qu'il faudrait discuter avec les

entreprises qui produisent ces instruments (comme Halliburton ou Schlumberger) pour voir s'ils souhaitent mettre à disposition de la géothermie ces technologies qui ont été développées pour certains puits profonds (à Elengas en Thaïlande par exemple), mais qui sont très peu disponibles en Europe. FG a essayé de faire cela et à chaque fois ils se sont heurtés sur des problèmes d'analyse marché de ces deux groupes qui ne voulaient pas le mettre à disposition.

- Au niveau des géophones pour la surveillance sismique, FG pense qu'il faudrait systématiser ce qui a été fait à Vendenheim. C'est à dire des couvrir la zone autour des puits sur un périmètre étendu, avec des stations fixes et des stations mobiles.
- Pour ce qui concerne les modèles géomécaniques, FG pense qu'il faudrait aller au-delà des modèles slip tendency, c'est à dire avoir des études de modèles géomécaniques qui soient très poussés dès le départ, avec des études de sensibilité selon les options structurales.
- Selon FG un autre point technologique important est la façon dont les acidifications (en trois étapes, en remontant, avec des contre-pressions par l'annulaire) ont été réalisées à Vendenheim. Ce protocole n'est pas idéal. FG pense qu'il serait préférable de travailler sous packer par zone ; avec éventuellement un packer inférieur et un packer supérieur. La problématique ici est donc technologique : il faut développer des packers qui résistent à l'abrasivité et à la température. Ce sont des packers type métal, cela existe, mais ce n'est pas forcément adapté aux contraintes de FG. Selon FG, un travail très précis famille de failles par familles de failles pourrait ainsi être réalisé. Permettant un travail discrétionnaire, pour une meilleure compréhension du réservoir.
- Concernant le traffic light system, FG pense il devrait se baser d'abord sur le PGV et non pas uniquement sur la magnitude. Dans les arrêtés préfectoraux concernant les travaux de forage, les limites sont fixées en magnitude ; sur les arrêtés d'exploitation, c'est PGV et magnitude. FG pense donc qu'il faut effectivement se baser sur les PGV et la magnitude. Par ailleurs, les valeurs de PGV ne devraient pas être calées de façon théorique, mais elles devraient prendre en compte les effets de site. On voit dans le contexte de Vendenheim, qu'il y a des effets de site avec des zones marécageuses qui sont importantes parce qu'il y a des phénomènes géotechniques de liquéfaction, en particulier près des zones proches des gravières où la nappe d'eau est à 1m de profondeur.
- Concernant le pilotage des opérations sur la base de la sismicité enregistrée, les outils mis en place à Vendenheim n'ont pas permis selon FG d'anticiper ce qui allait se passer en termes de sismicité. Selon FG, il faudrait que le milieu scientifique développe des outils prédictifs de suivi opérationnel, qui soient utilisables par un opérateur, sur un tableau de bord de pilotage opérationnel e.g. : est-ce qu'on peut estimer une loi entre énergie injectée, énergie hydraulique ? est-ce qu'on peut créer un lien entre pourcentage d'énergie libérée et prévision d'un débit maximum, en fonction de magnitude maximum ? Aujourd'hui, on a des outils scientifiques qui ne sont pas forcément adaptés, qui peuvent être adaptés en mode mono puits et pas en mode doublet, mais qui sont dans tous les cas difficiles à utiliser en mode prédictif.
- Concernant la structuration de la filière géothermie, FG souligne qu'il faudrait aller vers un modèle multi opérateur, comme dans le contexte de l'Oil&Gas, plutôt que mono opérateur. Cela permettrait d'avoir plus de partage d'informations, de retours d'expériences, ainsi que de partage vis-à-vis des situations de risque. Entre autres, il serait également important d'impliquer les territoires dans la gouvernance des projets.

- FG émet l'idée d'intégrer les scientifiques dans le projet dès l'amont, et dans un objectif de co-construction et pas uniquement dans un objectif de projets collaboratifs. Il s'agit d'un besoin d'avoir une intégration dans les projets, en amont / phase exploratoire et en opérationnel/ pour la conduite de projets.
- Par rapport aux relations avec la DREAL et la capacité technique des DREAL à supporter les opérations au niveau national, FG pense qu'il y aurait besoin d'avoir un groupe d'experts national qui aurait une fonction d'appui à l'État pour l'analyse en amont des demandes d'ouverture des travaux miniers, ainsi que pour les analyses de suivi des opérations (pour le compte de l'État cette fois-ci), mais aussi pour la communication. Il faudrait qu'il y ait une communication unifiée, qui pourrait être portée par ce groupe d'experts national, cela nécessiterait un accord entre tous les acteurs.

8.2. Avis préliminaire du CE

8.2.1. Aspects sur les conditions initiales du site

Les données de forages mais aussi l'interprétation du profil sismique de FG faite avant les forages (en particulier du profil 17VSTR01, Figure 7c) montrent que la zone cible est composée d'au moins deux failles majeures qui sont séparées de plus de 500 m. Sur l'ensemble des données acquises, la connexion entre ces failles n'est pas démontrée. Une zone de relais n'est pas nécessairement une mauvaise configuration pour la conductivité des fluides (e.g. cas de Rittershoffen), en particulier si sa connectivité structurale est bonne. Un des points importants à retenir dans le cas de Vendenheim est qu'il n'y a pas d'évidences géologiques ou hydrauliques claires de connexion entre les deux segments majeurs de failles recoupés par les forages (voir section 3.4). Cette connectivité des failles en relais aurait pu faire l'objet d'une analyse préliminaire au regard des critères de connexion existants dans la littérature scientifique et des données estimées de rejet et d'espacement des failles principales. Dans une configuration de relai compressif telle que suspectée sur la zone cible, la présence de failles obliques aux structures ciblées et pouvant assurer leur connexion est un élément particulièrement important. Par contre il est nécessaire que ces structures de relai ainsi que leur réseau de fractures associé, soient bien développés, en distribution d'orientation et de longueur, pour maintenir une bonne connectivité en dépit qu'elles soient orientées défavorablement par rapport à la contrainte régionale. La phase d'exploration et le choix de la zone cible auraient donc mérité une meilleure prise en compte du risque de non-continuité structurale de la faille visée. Dans ce cas de faille segmentée, il est important de cibler une zone de faille à rejet relativement grand par rapport à l'espacement des segments (i.e. rapport Rejet / Espacement ≥ 2 , Soliva et Benedicto, 2004 ; Imber et al., 2004) et bien visible sans équivoques sur les données d'imagerie géophysique.

L'injectivité (ou indice d'injection) est particulièrement faible dans le réservoir, en particulier dans le puits GT2 autour duquel des séismes importants se sont produits fin 2020 et en juin 2021. Cette faible injectivité associée à une faible perméabilité du réservoir autour du puits est responsable d'une plus forte pression de fluide pour un débit imposé. Des données de sismicité induite de la littérature suggèrent que cet indice est un bon indicateur de l'aléa sismique au sein du réservoir. Pour injecter des fluides à haut débit dans un réservoir à faible injectivité, il est nécessaire d'appliquer une forte pression dans le réservoir autour du forage injecteur ce qui génère un aléa important de déstabilisation des failles situées à proximité.

A cela s'ajoute le fait que de très importants volumes d'eau ont été injectés. Le grand volume d'eau injecté sur des temps courts dans une formation à faible injectivité suggère une surpressurisation du réservoir dans un volume rocheux important, et donc une déstabilisation potentielle des failles dans un grand volume autour du puits. Cette pression qui modifie les contraintes effectives et les propriétés frictionnelles des failles peut affecter des surfaces de failles de taille suffisante pour induire des séismes de magnitude significativement importante.

Enfin, la profondeur atteinte par les puits de Vendenheim peut aussi être considérée comme un élément important pour la sismicité, notamment car il est bien admis que les foyers de séismes naturels sont bien plus fréquents pour des profondeurs supérieures à 5 km, en particulier du fait de l'hétérogénéité rhéologique des roches sédimentaires et des faibles valeurs de contraintes cisailantes dans les premiers kilomètres. Ainsi, par comparaison avec le site de Rittershoffen où l'interface entre le bassin et le socle est atteinte à 2000 m environ et où la zone d'exploitation reste inférieure à 2500 m de profondeur (voir Figure 45 modifiée de Vidal et Genter, 2018), les profondeurs atteintes sur le site de Vendenheim, en contexte faillé et fracturé, ne sont pas optimales pour assurer un faible aléa de sismicité induite. Le site de Soultz présente une profondeur de la zone d'exploitation équivalente à celle du site de Vendenheim, mais pour ce dernier, l'aléa de sismicité induite y est plus élevé, en particulier en raison des caractéristiques d'injectivité plus faibles, associées aux conditions des tests réalisés (pression et volume), de plus ce site se trouve à proximité d'une grande faille régionale.

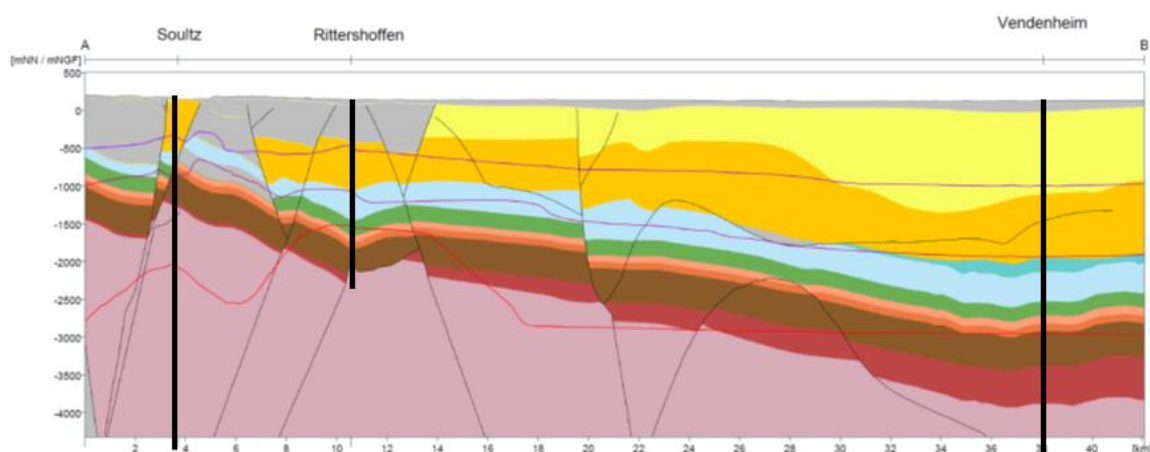


Figure 45 : Coupe géologique Nord/Sud passant par les sites de Soultz-sous-Forêts, de Rittershoffen et Vendeheim en utilisant le modèle GEORG. En rose clair, le socle granitique dont on voit la différence de profondeur selon les sites. Les autres couleurs correspondent à la couverture sédimentaire. En traits noirs, la représentation de la profondeur des puits à chacun des sites.

8.2.2. Aspects techniques et sur le mode opératoire

Acquisition de données en puits géothermique profond

FG soulève la question de la difficulté d'acquisition des données en puits profonds. Ceci est effectivement le cas, non seulement quand les puits sont profonds et donc chauds, mais aussi lorsqu'ils sont déviés et qu'il est difficile d'amener les outils dans la partie réservoir de manière gravitaire et sans risquer d'éventuels blocages. Cette problématique a été identifiée par de nombreux acteurs de la géothermie profonde et des développements sont déjà en cours notamment concernant la création d'un outil d'imagerie acoustique adapté aux conditions de température de la géothermie profonde (Ásmundsson et al., 2014).

Ayant connaissance de ces limitations, il est néanmoins possible de définir un plan de réalisation des puits et des protocoles d'acquisition permettant d'acquérir les données nécessaires au développement du projet. À Rittershoffen par exemple, la trajectoire du premier puits a été choisie subverticale pour faciliter les opérations de forage ainsi que les opérations d'acquisition de données. Il est clair que cette stratégie n'est pas toujours possible, mais elle pose la question importante du rôle du premier puits. Est-ce avant tout un puits d'exploration permettant d'acquérir les données nécessaires à la conduite du projet et donc valider sa poursuite (voir discussion procédure go/no-go section suivante), où doit-il être déjà considéré exclusivement comme un puits de production ou d'injection, avec le risque de mettre le projet face à la difficulté d'acquérir les données nécessaires à son développement ?

Cette réflexion pose également la question des données minimales nécessaires à la conduite d'un projet de géothermie profonde. Quelles données doivent être collectées et avec quelle confiance pour passer à l'étape suivante du projet ? Il n'y a pas à l'heure actuelle de standards d'acquisition de données aux différents stades du projet (concept, préfaisabilité, faisabilité) pour la géothermie profonde alors que ce type d'approche est en place pour des industries matures (mines, hydrocarbures, etc.). Dans l'exemple du projet de Vendenheim, la question de l'acquisition de données concernant le champ de contraintes est symptomatique de ces limitations. Très peu d'efforts ont été menés pour caractériser les contraintes localement. Il n'y a pas de référence à des tests du type XLOT menés au pied des cuvelages et qui auraient permis de mesurer la magnitude de la contrainte minimum au réservoir. Les imageries acquises dans la partie sédimentaire et qui présentent des breakouts ont été très peu valorisées. Aucune donnée au niveau du réservoir n'est disponible. Peut-on se lancer dans une phase de stimulation massive du réservoir sans mesures des contraintes in situ ? Comment dimensionner les paramètres d'injection, notamment les pressions maximum d'injection si la contrainte minimum est inconnue et si les pressions d'activation des structures ne peuvent pas être calculées ? Ne faudrait-il pas définir un corpus minimal d'informations à réunir avant de passer à la phase des tests hydrauliques du projet ? Cette question est particulièrement importante à poser pour des réservoirs à faible injectivité, i.e. à fort aléa de sismicité induite.

Modèles géomécaniques et pilotage des opérations

FG suggère d'augmenter le niveau de complexité des modèles géomécaniques et de les utiliser en amont des opérations de stimulation. Il faut pour cela collecter les données nécessaires pour nourrir ces modèles avancés (voir ci-dessus). Ces modèles permettent ainsi de dimensionner les opérations. Ces modèles géomécaniques ou tout du moins des proxy des paramètres géomécaniques (volumes injectés, énergie hydraulique, évolution de la pression, etc.) peuvent ensuite être utilisés pour piloter les opérations dans le cadre d'ATLS (Advanced Traffic Light Systems). Ces approches sont encore en développement et donc, comme mentionné par FG, ne sont pas encore disponibles comme service standard pour les projets de géothermie profonde. Néanmoins, dans le cas du projet de Vendenheim, nous pouvons affirmer a posteriori que l'intégration de proxy simples tel que les relations entre les volumes injectés et la sismicité induite aurait pu aider à dimensionner et piloter les opérations pour limiter la magnitude des séismes induits. L'ouverture des données opérationnelles de FG pour permettre d'y confronter les procédures d'ATLS développées par différents groupes de recherche serait un élément important pour permettre un retour d'expérience sur ces méthodes aux bénéfices des futurs projets.

Étapes de validations, de consolidations des données et d'examen par des experts externes

Il est indéniable que le développement de projets de géothermie profonde nécessite des connaissances avancées et très diverses, difficiles à rassembler et maintenir dans une équipe projet limitée, surtout pour des projets de cette ambition (forages à plus de 5 km de profondeur à proximité de failles régionales) pour lesquels très peu de précédents existent tant au niveau français qu'international.

Il est ainsi indispensable qu'au-delà de l'acquisition des données, il faille aussi se donner le temps de consolider et d'interpréter les données collectées. Ceci ne peut se faire que si une stratégie d'acquisition des données intégrée dans une approche de développement du projet par phase avec des rapports d'étapes est mise en place. À ces étapes clés du projet, les données doivent être mises en forme et consolidées de telle sorte qu'elles puissent être portées à l'examen de comité d'experts rassemblant la diversité des expertises nécessaires au bon développement du projet. L'exemple du projet de Vendenheim montre que ces efforts de consolidation ont manqué et qu'il était ainsi très difficile pour des experts externes d'apporter leur savoir-faire, tant dans le cadre de rapport d'expertise que dans le cadre de collaboration scientifique au sein de projets de R&D.

8.2.3. Historique des collaborations scientifiques de FG

Les programmes de recherche dans lesquels FG est ou était impliqué (voir Tableau 6) ont bénéficié de fonds du GIS "Géodernergies" et de fonds européens. Les programmes financés par Géodernergies ont été suspendus pour raisons administratives de mi 2019 à début 2020 puis retardés pour des restrictions d'activité dues à la Covid en 2020. Ainsi la fin des programmes Reflet et Temperer a été repoussée de fin 2019 à novembre 2020.

Ces programmes couvrent toute l'échelle de valeur d'un programme de développement de la géothermie de haute température :

- L'exploration et la construction de modèles géologiques : programmes Reflet et Donuts
- Les opérations de forage et d'optimisation des puits : programmes Reflet, Temperer et Deepogs
- Le développement des infrastructures de surface, l'intégrité des puits, le traitement de la chimie des fluides et le développement de nouvelles pompes : programme Fongeosec, Carphymcheau, Geopump.

Tous les livrables des projets financés dans le cadre de Géodernergies n'ont pas pu être consultés par le CE.

Le CE constate que, dans les bilans fournis par FG et au cours des entretiens avec FG, les références aux travaux des différents programmes de recherche sont quasi absentes et qu'aucun bilan de l'impact des différents programmes scientifiques sur le développement du site et sur les travaux conduits n'est présenté. Dans les documents produits, il n'est fait aucune référence à une demande spécifique des équipes scientifiques pour une prolongation du forage GT2 ou des essais de puits.

D'une façon générale, le CE constate que les données et analyses fournies par les différents programmes sont principalement intégrées a posteriori dans l'analyse et les interprétations de FG. Un premier exemple de cette démarche concerne les données géologiques obtenues sur des réservoirs analogues et qui sont intégrées a posteriori pour modifier le modèle géologique initial (construit presque exclusivement à partir des données de sismique). Les données de réservoirs analogues, de puits et de sismicité auraient dû permettre la construction de modèles géologiques alternatifs qui auraient été discutés en fonction des nouvelles données acquises. En fait, la démarche adoptée par FG a été de faire évoluer un modèle unique initial en fonction des données nouvelles acquises (cutting, informations de foration, essais de puits, sismicité, etc.). En suivant cette démarche, tournée vers un seul modèle de départ, il est plus difficile d'en évaluer les incertitudes et de prendre en considération d'autres alternatives possibles, puis de les faire évoluer en fonction des connaissances et d'en cerner les limites.

Nom du ou des collaborateurs scientifiques	Domaine d'intervention	Type du projet	Nom du projet	Rapports rédigés	Résultats obtenus, y compris éventuelles références bibliographiques des rapports/articles
BRGM, Electerre de France, MinesParisTech, Univ. de Lorraine, Univ. d'Orléans	Méthodologie pour la construction d'un modèle conceptuel de REServoir géothermique de type Faille dans un contexte de fossé d'Effondrement (France)	GEODENERGIES	REFLET	Livrables	-
Islande: HS Orka, ISOR, GEORG, Landsvirkjun France: BRGM Allemagne: Herrenknecht Vertical, KIT Italie: Enel Norvège: Statoil Petroleum	Optimisation de systèmes géothermiques améliorés (EGS) dans le cadre du développement des énergie renouvelables	EUROPEEN (H2020)	DEEPEGS	Livrables	Gaucher-etal_WGC2020_Vendenheim-seismicity_190726
Fonroche, BRGM, EtF, MinesParisTech	Utilisation de Techniques de sismiques Passives pour la mise en Exploitation, le suivi et l'Evaluation du comportement dynamique d'un REServoir géothermique profond	GEODENERGIES	TEMPERER	Livrables	-
Foragelec, Enertime, ARMINES, ENSEGID, BRGM, UPPA, Operantis, Flodim, Enesol	Conception et développement d'un échangeur géothermique innovant haute enthalpie souterrain grande profondeur semi ouvert	ADEME	FONGEOSEC	Livrables	-
Univ. de Bretagne Occidentale, Ecole des mines de Paris, Univ. de Strasbourg, Total, Teranov	Développement d'Outils Numériques de Traitement et d'interprétation des Signaux géophysiques pour les réservoirs	GEODENERGIES	DONUTS	Livrables	-
BRGM, CFG Services, Electerre de France, Enertime, Univ. de Pau et des Pays d'Adour, Univ. Des Antilles.	Caractérisation des phénomènes physiques – matières dans les échangeurs pour les eaux géothermales	GEODENERGIES	CARPHYMCHAU	Livrables	-
		GEODENERGIES	GEOPUMP	Livrables	-

Tableau 6 : Liste des collaborations scientifiques sur le site de Vendenheim telle que reportées par FG dans le fichier FG_DT_I03_2021-06-16.xlsx (en réalité la liste des productions scientifiques est beaucoup plus importante, elle n'a pas été listée par FG)

Le second exemple concerne les données des essais de puits. Des documents fournis et des entretiens réalisés avec FG, il ressort que les essais n'ont pas été définis avec les groupes de recherche. Les conditions des essais et les données acquises ont été fournies aux groupes de recherche pour traitement mais suivant des calendriers et des objectifs différents de ceux de FG. Le suivi du chantier Vendenheim n'était pas du ressort des équipes de recherche. De même que ces équipes n'ont pas eu à apporter leur avis sur les procédures et tests développés par FG.

Il semble donc que les résultats des équipes de recherche ou de FG aient fait l'objet de présentations lors des réunions d'avancement de programme sans réelles interactions entre eux.

Le CE est bien conscient que le temps du développement industriel du site et celui de l'analyse scientifique sont difficile à synchroniser. Mais le développement de ce type d'exploitation géothermique de haute température et grande profondeur, en milieu faillé fait encore l'objet de travaux de recherche pour nombre de ses aspects (cf. en exemple, la liste de projets de recherche avec des collaborations de FG), ainsi de meilleures interactions auraient dû être mises en place et auraient pu permettre de pointer et/ou lever certains verrous (limite du modèle géologique, connexion entre les puits, indice d'injectivité, analyse des mesures pression/volume/température par rapport à l'évolution du réservoir, etc.).

8.2.4. Retours d'expérience concernant les aspects socio-économiques du projet

Le CE ne peut s'engager à ce stade sur un retour d'expérience exhaustif concernant les aspects socio-économiques du projet. Il serait en particulier nécessaire d'intégrer des experts sociologues à cette expertise. Cependant, quelques premiers éléments, synthétisés ci-dessous, ressortent de l'analyse des auditions de FG.

La faible maturité de la technologie EGS sur faille régionale et les risques associés

L'application industrielle des technologies non conventionnelle EGS (Enhanced Geothermal System) est encore peu développée et de faible maturité dans certains types de contexte, en particulier pour les projets très profonds comme celui de Vendenheim. A profondeur intermédiaire entre 2 et 3,5 km, les succès sont avérés (Landau, Insheim plus au nord, en Allemagne, Rittershoffen en France). Pour des contextes tel que celui de Vendenheim, il faudrait a fortiori disposer de connaissances plus larges, ou à défaut de pouvoir les obtenir, tenir compte des incertitudes dans les évaluations de l'aléa sismique au fur et à mesure de l'avancée du projet.

Par ailleurs, à Vendenheim la couche sédimentaire fracturée comprenant de multiples niveaux d'instabilités est une source de difficulté en termes de forage (e.g. couches de sels triasiques) et donc d'accès. Parmi les projets comparables dans la région, le projet de Soultz avec une profondeur similaire mais avec une couverture sédimentaire sensiblement moins importante, a été un pilote scientifique nécessitant beaucoup d'activités de recherche financées par la communauté européenne pour devenir après un très long développement, un relatif succès (Soultz ne peut être qualifié de succès commercial, de par son faible niveau de production au regard des investissements consentis). Le projet de Bâle pour une profondeur comparable a été un échec au vu de la sismicité induite déclenché. On peut citer également le projet de Cronenbourg, le plus proche du site de Vendenheim qui a également été un échec du fait du colmatage important de la porosité, mais qui avait pour cible les formations sédimentaires du Trias. A noter que ces deux derniers projets, Cronenbourg et Bâle, ont été stoppés après le forage du premier puits, sur les deux prévus. FG n'a pas attendu d'avoir définitivement testé et qualifié son premier puits avant de se lancer dans le forage du second et dans la construction de la centrale géothermique en surface. On ne peut oublier que le projet de Pohang en Corée qui a certaines similitudes avec le projet de Vendenheim (profondeur des puits, forage dans le socle, présence de failles régionales à proximité, phase d'exploration insuffisance, etc.), a été stoppé en 2017 suite à un séisme important (Mw 5.5). Plusieurs succès de projets EGS existent cependant dans la région

(Rittershoffen, Insheim), mais ils sont à des profondeurs inférieures et à proximité de sites bien étudiés (Soultz, Landau).

Le risque associé à un projet EGS est une notion complexe qui mériterait des analyses poussées. Le CE propose ici uniquement quelques remarques générales. Comme plusieurs des projets EGS récents, le projet de Vendenheim cible une zone de faille avec l'objectif d'y trouver une perméabilité naturelle importante et donc une injectivité initiale forte. Le cas de Rittershoffen a été un modèle vis-à-vis de cet objectif puisqu'un des puits (GRT2) n'a pas été stimulé tant son injectivité initiale était élevée, faisant baisser sensiblement le niveau de risque du projet. A Vendenheim, l'hypothèse que la perméabilité de la faille F1B (faille de la Robertsau) était naturellement élevée à 5 000 m de profondeur était a priori fort et donc risqué. Il n'existe pas de technique d'exploration à ce jour permettant de vérifier une telle hypothèse pendant la préparation du projet, rendant le risque géologique élevé. La perméabilité des failles s'est avérée sensiblement plus faible que prévue. Une stratégie de multiples stimulations a alors été déployée pour tenter d'augmenter la perméabilité des principales failles interceptées mais sans réel succès. Par contre, une autre propriété majeure des failles a été négligée, à savoir qu'elles sont aussi le lieu de production des séismes et que à ces profondeurs les failles ciblées sont des objets à géométrie complexe, comportant des éléments peu ou pas visibles depuis la surface, dans des directions les rendant proches de l'instabilité. Les stimulations hydrauliques importantes ont conduit à de fortes augmentations du risque en particulier du risque sismique (plus spécifiquement l'aléa sismique). Il apparaît au CE que l'analyse de risque n'a pas réellement évolué pendant le projet en particulier avec une anticipation d'une augmentation du risque suite à la découverte d'une injectivité plus faible que prévue.

Absence de jalons d'évaluation de poursuite/arrêt du projet (Go/no Go)

Nous reconnaissons que les conditions de développement des projets avec une délégation en un bloc de l'ensemble du projet au domaine privé ne sont pas des conditions favorables à une démarche prudente face aux risques encourus. La proposition de phasage des projets avec la définition de lots (à l'image des grands projets d'infrastructures) et des temps d'évaluation Go/no-Go devant une instance indépendante, pourrait être une piste de réflexion pour les projets à venir. Il paraît particulièrement important au CE que les projets de géothermie profonde se développent dans un environnement le plus transparent et ouvert possible permettant un regard extérieur sur les activités menées. Cela nécessite également un rythme de développement du projet laissant une réelle place à la consolidation des données acquises aux différentes étapes, à leur analyse et à leur intégration.

On indique ici que, sur demande de la DGPR suite au cas de Vendenheim, l'Ineris et le Brgm travaillent actuellement à la construction et à la rédaction d'un guide de bonnes pratiques pour la maîtrise de l'aléa de sismicité anthropique dans le contexte de géothermie profonde. Le but, dans la mesure du possible, étant de cadrer les projets géothermiques avec la mise en place d'une stratégie pour l'évaluation du niveau d'aléa sismique attendu aux différentes phases des projets, de l'exploration à la phase opérationnelle de production, afin d'éviter la survenue d'accidents sismiques.

La question du financement public de la phase d'exploration des projets EGS

Il ressort de l'expertise que la connaissance initiale du site de Vendenheim était insuffisante : erreurs de localisation des interfaces lithologiques, des failles, sur-estimation de la perméabilité des failles, méconnaissance de la taille des zones connectées, méconnaissance des directions des failles instables, de l'état de contrainte, de la distribution de température dans le réservoir, etc. Une connaissance à une échelle régionale existait,

était publique et accessible grâce au projet européen GEORG (www.geopotenziale.org). Elle a fourni des premiers éléments mais une connaissance approfondie et fiable à l'échelle du site, en particulier géologique, aurait permis sans aucun doute, une très forte diminution des risques. Cette connaissance initiale précise du milieu naturel est une base de données qui aurait dû être construite, en partie, à partir de données existantes puis lors de la phase d'exploration guidée par le questionnement sur ces données existantes. Une telle base de données pour un réservoir profond comme celui de Vendenheim représente un investissement très important qui de plus est protégé par le code minier. Or il est un élément clé de la baisse des risques du projet, risques qui impactent la population et non seulement les porteurs du projet. En conséquence, se pose la question d'un financement adéquat, notamment en phase d'exploration, pouvant inclure des forages d'exploration, qui puisse garantir la qualité des données acquises au vu des risques potentiels. Les projets industriels démarreraient alors une fois cette phase d'exploration terminée, avec une mission d'exploitation mieux définie.

8.3. Objectif N°5 – Principaux points à retenir

- Une meilleure acquisition et intégration de la connaissance scientifique en général aurait probablement permis de mieux maîtriser la sismicité induite. En particulier le choix d'un site avec un réservoir à grande profondeur est probablement un élément important ayant contribué à obtenir de faibles injectivités. Le manque d'éléments permettant de contraindre la géométrie des failles (connectivité du relais, orientation des failles, dimensions des zones endommagées) ou des contraintes a impliqué une mauvaise définition des modèles géologiques, mécaniques et hydrogéologiques. De plus, la stratégie de FG visant à ne construire qu'un seul modèle géologique évolutif sans alternatives, n'a pas permis d'optimiser la définition des conditions les plus conservatives pour le développement des opérations. A noter par ailleurs que la réalisation de ce modèle est très tardive par rapport au déroulé des opérations. Un (ou des) modèle(s) géomécanique(s) (même simple) dès la phase d'exploration, aurai(en)t permis de mieux évaluer les risques de séismes.
- La prolongation du puits GT2 à partir du 11 novembre 2019 ne peut pas être qualifiée de scientifique laissant entendre qu'elle aurait été demandée par la communauté scientifique. L'objectif était exploratoire pour pallier aux performances hydrauliques insuffisantes de la cible initialement identifiée lors de l'exploration. Il convient de rappeler que les séismes majeurs à partir d'octobre 2020, ont eu lieu à proximité de la terminaison de cette extension non anticipée de GT2.
- Les volumes cumulés injectés étaient incompatibles avec un seuil d'alerte de magnitude 2. Ils auraient dû être considérés comme des signaux d'alerte des séismes de magnitude supérieure à 3.
- Le besoin d'une phase d'exploration sensiblement plus avancée et aboutie apparaît indispensable. La question se pose sur un financement de la production de connaissance du sous-sol et de l'ouverture des données associées à la communauté scientifique lors de la phase d'exploration.
- Il est apparu un manque flagrant de structuration et de consolidation des données mesurées ou calculées par FG. Cela a pénalisé l'analyse et la compréhension des tests par FG.
- La localisation de l'amas de La Robertsau était très difficile à prévoir. Il montre que les tailles de réservoir à considérer peuvent être beaucoup plus grandes qu'initialement anticipées. La sismicité de la Wantzenau était plus prévisible et des signaux d'alertes ont existé mais n'ont pas été considérés.

9. Conclusion et recommandations

La mission d'expertise s'est organisée autour de cinq objectifs principaux :

- Objectif 1 – Compréhension des mécanismes à l'origine de la sismicité au voisinage des puits de Vendenheim
- Objectif 2 – Réévaluation du lien entre les opérations à Vendenheim et la sismicité dans la zone de la Robertsau
- Objectif 3 – Identification d'éventuels indices précurseurs d'une sismicité ressentie
- Objectif 4 – Évaluation de l'état post-opération du réservoir géothermique
- Objectif 5 – Recommandations pour les sites géothermiques de l'EMS sur la base du REX sur le site de Vendenheim

Ci-après les principales conclusions du CE sont apportées pour chacune des questions posées/objectifs. En préalable, le CE précise qu'il a constitué un important corpus en collectant, rassemblant et structurant les données communiquées par FG ainsi que les enregistrements des entretiens réalisés (objectif 0). Il appuie les avis formulés ci-après sur une revue critique des données et des interprétations de FG.

Objectif 1 - La compréhension des mécanismes conduisant au déclenchement de la sismicité au voisinage des puits (en particulier à partir de fin 2020)

La sismicité enregistrée au proche voisinage du puits GT2, avec notamment l'occurrence des événements de Mlv 2,1 et 2,8, du 27 et 28 octobre, ainsi que le séisme de Mlv 3,6 du 4 décembre 2020, est à associer aux opérations en mode doublet (GT1 producteur et GT2 injecteur), menées sur les puits d'octobre à décembre 2020. Parmi les causes de cette sismicité, les volumes importants de fluide injecté depuis septembre 2020, dans un réservoir autour de GT2, de taille réduite et à injectivité initiale faible, ont entraîné la mise en pression du fond du puits. En effet, le CE estime que les deux puits semblent connectés à deux réservoirs distincts et indépendants : l'un plus petit au proche voisinage de GT2 et l'autre, plus grand, autour de GT1 et potentiellement connecté vers le sud à la zone de la Robertsau (voir point suivant, objectif 2). En conséquence, ces injections ont induit une déstabilisation des failles et fractures préexistantes aux forages à proximité du puits (principalement des failles d'orientation N130E, déjà dans un état mécanique naturellement proche de la rupture, une orientation de faille non considérée dans le modèle géologique de FG). La faible taille du réservoir autour de GT2, sa faible injectivité et la forte sismicité sont des propriétés qui rendent l'exploitation de GT2 difficile.

Objectif 2 - Avis du CE sur les opérations de Vendenheim et l'activité sismique survenue depuis novembre 2019 dans le secteur de la Robertsau (Strasbourg)

A la différence de l'objectif 1, l'objectif 2 concerne la sismicité déclenchée à grande distance des puits de Vendenheim, notamment la sismicité observée 5 km plus au sud, dans la zone de Strasbourg/La Robertsau. Dans son analyse, le CE s'est appuyé sur les sept critères proposés par Davis et Frohlich (1993) pour classer un séisme d'induit ou naturel, en suivant la publication récente de Schmittbuhl et al. (2021). Ces critères reposent sur des considérations de distance et temporalité de la sismicité par rapport à l'activité anthropique, ainsi que sur la sismicité naturelle préexistante et sur les caractéristiques des opérations anthropiques et leur potentiel de déclenchement de la sismicité. **Il en résulte un faisceau d'indices concordants vers l'existence d'un lien entre la sismicité de Strasbourg et les activités sur le doublet de Vendenheim, notamment avec les injections dans GT1.**

Les observations d'une sismicité en août 2020 dans l'essai de Strasbourg après de fortes injections dans le puits GT1 confirme une connexion du puits GT1 à un réservoir de fluide de grande extension vers le sud le long de la faille régionale (d'une taille d'au moins 5 km). Une telle taille de réservoir était manifestement sous-estimée dans le modèle conceptuel initial du projet de FG. Ceci a deux conséquences : d'une part, **le puits GT1 est vraisemblablement connecté à un réservoir de fluide géothermal de grande taille vers le sud** ce qui est une situation favorable à une exploitation de géothermie profonde ; d'autre part, **ce réservoir est situé le long d'une faille régionale dont certaines parties sont proches de l'instabilité naturelle** et donc constitue une situation défavorable en termes de risque sismique. L'exploitation de ce puits nécessite donc des précautions particulières (exploration spécifique à développer, révision et adaptation du monitoring, développement d'une modélisation adaptée - voir ci-après).

Selon le CE, **le déclenchement à grande distance de l'essai de Strasbourg** sans continuité spatiale de la sismicité représente, certes, une situation peu classique dans le contexte de sismicité induite en géothermie profonde, mais **n'est pas un indice suffisant pour exclure la nature induite/déclenchée de l'essai de Strasbourg**. Plusieurs mécanismes peuvent permettre d'expliquer les observations (existence d'un segment asismique entre les deux zones, transfert de contrainte associés à des effets poroélastiques, différences de cohésion le long de la faille, etc). Des travaux complémentaires (cf. section 5.3) doivent être menés pour identifier le mécanisme dominant, parmi les mécanismes possibles, à l'origine du déclenchement de la sismicité de Strasbourg.

Objectif 3 - Avis du CE sur les indices d'alerte

Les interprétations de la sismicité enregistrée depuis 2019 ont montré **l'importance des volumes de fluides injectés en profondeur dans le déclenchement des séismes**. Ainsi, en 2019, le volume net total injecté était de 92 532 m³ (dont 30 658 m³ sur GT1) ; il a été suivi d'une période de sismicité notable, avec la crise sismique de novembre 2019. Fin 2020, 147 000 m³ ont été injectés dans GT2, causant la mise en pression du réservoir au niveau du puits et la sismicité qui s'en est suivie.

La loi empirique de McGarr (2014), qui met en relation les volumes injectés et la taille des séismes induits, peut donner un indice d'alerte. Son application sur Vendenheim est cohérente avec les séismes qui ont été enregistrés fin 2019 et fin 2020. **Ces relations magnitude-volume auraient dû être utilisées pour piloter les opérations d'injection et ainsi éviter les magnitudes atteintes**.

Notons enfin, que la sismicité de l'essai de Vendenheim présente des caractéristiques différentes de celle de l'essai de Strasbourg. Cette dernière, déclenchée à grande distance des puits, était par sa nature, très difficile, voire impossible à anticiper dans le cadre d'un modèle de réservoir classique de l'ordre de 1 km. Seule la sismicité de l'essai de Vendenheim, localisée dans le proche voisinage des puits, aurait pu être gérée différemment. Cela est particulièrement vrai pour la sismicité de magnitude supérieure à 2 ($M > 2$) observée à partir de novembre 2020. En effet, **l'occurrence d'une sismicité persistante entre le 5 et le 13 novembre 2020 dans la même zone du réservoir**, avec plusieurs événements de $M > 2$ qui s'enchaînent à quelques jours d'intervalle, **aurait dû alerter sur l'occurrence d'un phénomène d'instabilité**, soutenu par la mise en pression continue au fond du puits GT2, **et aurait dû remettre en cause la poursuite des injections**, sans attendre la survenue du séisme de $M 3,6$ du 4 décembre 2020.

En complément pour la recherche des indices précurseurs, le CE indique qu'il serait nécessaire de réaliser une **rétro-analyse détaillée des données brutes** hydrauliques et

sismiques (cf. section 6.3). Cela permettrait d'identifier d'éventuelles variations spatio-temporelles (variations de la pression, de la sismicité enregistrée, etc.) qui auraient pu avoir lieu avant l'occurrence d'événements sismiques significatifs.

Objectif 4 - Avis du CE sur l'état post-opération du réservoir

Pendant la phase d'arrêt des injections (shut-in le 02/01/2021), deux séismes de magnitude importante ont été enregistrés au niveau du doublet, le 22 janvier et le 26 juin 2021. Ce dernier est le séisme le plus fort de la séquence avec une magnitude de M_{lv} 3,9. Il est localisé sur la même faille que celle où a eu lieu le séisme du 4 décembre 2020. Ces séismes montrent que le réservoir au droit du doublet de Vendenheim peut avoir des temps de réponse très longs (plusieurs mois).

Aujourd'hui, le réservoir est en phase de stabilisation lente. Les grands volumes de fluide injecté dans GT2 ont mis beaucoup de temps à migrer du fait de la faible injectivité du puits. **La pression dans chacun des puits semble s'approcher graduellement de sa valeur d'équilibre (environ 2-3 bars).** Dans GT2, la décroissance est exponentielle avec un temps caractéristique de 4 mois. Probablement que les températures sont également encore perturbées. De plus, **une déformation permanente en profondeur a été induite suite aux injections modifiant durablement l'état des contraintes dans le réservoir et plus particulièrement le long des failles connectées aux puits.**

Dans ces conditions, pour la maîtrise du risque de sismicité sur le site de Vendenheim, **il est indispensable de continuer à surveiller le réservoir dans les mois/années à venir à travers le maintien du monitoring, à la fois en termes d'enregistrements sismiques et géodésiques, ainsi que de suivis des données de pression et température dans les puits.** Il est également recommandé de compléter cette surveillance par un suivi géochimique des gaz, ainsi que de réaliser régulièrement des profils thermiques dans les puits au cours des prochains mois. Ces mesures permettront de suivre une éventuelle anomalie dans le processus de retour à l'équilibre géochimique et thermique du réservoir.

Compte tenu de l'état actuel du réservoir, les actions sur les puits (mise en production, bleed-off, etc.) doivent être restreintes à la surveillance du rééquilibrage du réservoir. Mais dans tous les cas, **avant de concevoir une quelconque action sur les puits (hormis celles relatives à la surveillance et citées ci-dessus), il s'avère indispensable de mieux appréhender les caractéristiques structurales et mécaniques du réservoir, ainsi que de mieux caractériser la réponse du réservoir** (cf. section 7.3). Ce n'est qu'avec une meilleure compréhension du site que la possibilité de nouvelles actions sur les puits pourra être envisagée, en particulier dans le cas d'une nouvelle recrudescence de la sismicité.

Dans l'état actuel, il est donc important de ne pas abandonner et condamner les puits du doublet pour permettre le suivi des paramètres de puits tel qu'envisagé plus haut (surveillance).

Objectif 5 - REX : Les enseignements à tirer du projet de Vendenheim

Le retour d'expérience du site de Vendenheim permet de formuler des recommandations utiles pour une meilleure gestion de l'aléa sismique des projets de géothermie profonde EGS en général et plus particulièrement pour les projets EGS qui présenteraient un niveau d'aléa de sismicité induite déjà élevé au départ, comme dans le cas de Vendenheim. A cet égard, le CE propose les recommandations suivantes :

- **Réaliser une phase exploratoire des projets géothermiques plus approfondie avec un corpus d'informations et de connaissances du réservoir à faire expertiser plus largement par un ou des comité(s) externe(s)** (cf. section 8.2).

- **En l'absence d'un jeu de données probant, plusieurs modèles de réservoir alternatifs doivent être construits et leurs limites cernées.** Ce n'est que sur cette base que des décisions en adéquation avec les objectifs et le risque encouru peuvent être prises. Ces modèles doivent pouvoir évoluer en fonction des connaissances acquises au fur et à mesure de l'avancement du projet (phase de forage, développement des puits, etc.).
- Le CE constate que les opérations sur les puits se sont succédées de manière rapide par rapport au temps de relaxation du réservoir (dans le cas spécifique de GT2, ce temps était d'environ 4 mois, cf objectif 4). Cela a eu deux conséquences majeures : (i) les opérations se sont poursuivies sans atteindre la stabilisation du réservoir entre chaque phase et (ii) il n'y a pas eu un temps d'arrêt nécessaire et suffisant pour interpréter et analyser de manière fiable les données, ainsi que pour la prise en compte des risques de sismicité. Il s'agit ici de **prendre en compte également les opérations déjà réalisées dans le réservoir (avec les volumes déjà produits ou injectés, les chroniques de pression, etc.), mais aussi d'envisager des scénarios possibles de l'évolution du site sur la base des connaissances disponibles, de leur incertitude et de la perturbation à venir** (selon le test projeté).
- Enfin, nous recommandons que **chaque phase d'un projet de géothermie profonde (de l'exploration à la mise en opération) soit régulée en fonction de jalons marqués par des Go ou no Go** selon les connaissances acquises et les mesures quantitatives des grandeurs observées, la sismicité enregistrée ou l'évolution du réservoir au cours de développement du projet. Cela impliquerait un rythme de développement qui offrirait un temps suffisant pour la consolidation des données acquises aux différentes étapes, leur analyse et leur intégration dans l'évaluation des risques.

Au vu des grandes profondeurs atteintes (environ 5 km), de l'existence dans le réservoir de zones de failles de taille importantes soumises à un chargement tectonique significatif, ainsi que des faibles valeurs d'injectivité mesurées en GT1 et GT2, **le site géothermique de Vendenheim présente un niveau d'aléa de sismicité induite pouvant être considéré comme élevé.**

Or, **cela ne veut pas dire que tous les projets géothermiques dans des telles conditions ne sont a priori pas viables**, mais qu'ils nécessitent a fortiori : (i) plus de précaution dans la conduite des opérations qui doivent être pilotées sur la base des connaissances acquises avant et pendant le projet, (ii) une connaissance la plus précise possible des structures géologiques du réservoir, de la géométrie des failles, de leur état mécanique, (iii) une analyse avancée de l'aléa sismique, ainsi (iv) qu'une planification détaillée pour sa gestion.

Or, cela n'a pas été le cas sur le site de Vendenheim où : (i) le manque de données solides a impliqué une mauvaise connaissance des structures du réservoir, ainsi que de leur potentiel de réactivation, et a conduit à la réalisation de modèles conceptuels et numériques erronés ; (ii) les procédures opérationnelles n'ont pas été pilotées sur la base des modèles géomécaniques élaborés et se sont toujours placées dans des scénarios favorables, notamment concernant l'état du réservoir supposé stable, l'injectivité toujours considérée plus élevée que la réalité, ainsi que la présupposition d'une bonne connexion hydraulique entre les puits ; enfin (iii) les grands volumes de fluide injecté par l'utilisation de l'eau provenant du rabattement de la nappe phréatique sur le site industriel de Reichstett n'a fait qu'accroître l'aléa sismique. **Tout cela a conduit à sous-estimer et, dans certains cas,**

incrémenter le risque de sismicité induite sur le projet de Vendenheim, alors que les conditions intrinsèques du site auraient dû, au contraire, inciter à plus de précautions.

10. Bibliographie

Armandine Les Landes, A., Guillon, T., Peter-Borie, M., Blaisonneau, A., Rachez, X., Gentier, S., (2019). Locating Geothermal Resources: Insights from 3D Stress and Flow Models at the Upper Rhine Graben Scale. *Geofluids* 2019, 8494539. <https://doi.org/10.1155/2019/8494539>

Baujard, C., Genter, A., Dalmais, E., Maurer, V., Hehn, R., Rosillette, R., ... & Schmittbuhl, J. (2017). Hydrothermal characterization of wells GRT-1 and GRT-2 in Rittershoffen, France: Implications on the understanding of natural flow systems in the Rhine Graben. *Geothermics*, 65, 255-268.

Barton, C.A., Zoback, M.D., Moos, D., (1995). Fluid flow along potentially active faults in crystalline rock. *Geology* 23, 683. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1995\)023<0683:FFAPAF>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1995)023<0683:FFAPAF>2.3.CO;2)

Bentz, S., Kwiatek, G., Martínez- Garzón, P., Bohnhoff, M., & Dresen, G. (2020). Seismic moment evolution during hydraulic stimulations. *Geophysical Research Letters*, 47(5), e2019GL086185.

Bertrand L. (2017) - Etude des réservoirs géothermiques développés dans le socle et à l'interface avec les formations sédimentaires. *Tectonique*. Thèse Université de Lorraine, 495 p.

Bertrand, L., J. Jusseaume, Y. Géraud, M. Diraison, P.-C. Damy, V. Navelot, and S. Haffen (2018), Structural heritage, reactivation and distribution of fault and fracture network in a rifting context: Case study of the western shoulder of the Upper Rhine Graben, *Journal of Structural Geology*, 108, 243-255, doi:<https://doi.org/10.1016/j.jsg.2017.09.006>.

Bourgeois, O., M. Ford, M. Diraison, C. Le Carlier de veslud, M. Gerbault, R. Pik, N. Ruby, and S. Bonnet (2007), separation of rifting and lithospheric folding signatures in the NW-alpine foreland., *Int. J. Earth Sci.*, 96, 1003-1031

Chavot, P., Heimlich, C., Masseran, A., Serrano, Y., Zoungrana, J., & Bodin, C. (2018). Social shaping of deep geothermal projects in Alsace: politics, stakeholder attitudes and local democracy. *Geothermal Energy*, 6(1), 1-21.

Chavot, P., Masseran, A., Bodin, C., Serrano, Y., & Zoungrana, J. (2019). Geothermal energy in France. A resource fairly accepted for heating but controversial for high-energy power plants. In *Geothermal energy and society* (pp. 105-122). Springer, Cham.

Cornou, C., Ampuero, J. P., Aubert, C., Audin, L., Baize, S., Billant, J., ... & Weng, H. (2020). Rapid response to the M_w 4.9 earthquake of November 11, 2019 in Le Teil, Lower Rhône Valley, France.

Dobre, C., Meghraoui, M., Masson, F., Lambotte, S., Jund, H., de Berc, M. B., & Grunberg, M. (2021). Seismotectonics in Northeastern France and neighboring regions. *Comptes Rendus. Géoscience*, 353(S1), 1-33.

Edel, J. B., V. Maurer, E. Dalmais, A. Genter, A. Richard, O. Letourneau, and R. Hehn (2018), Structure and nature of the Palaeozoic basement based on magnetic, gravimetric and seismic investigations in the central Upper Rhinegraben, *Geothermal Energy*, 6(1), 13, doi:10.1186/s40517-018-0099-y.

Freed, A. M. (2005). Earthquake triggering by static, dynamic, and postseismic stress transfer. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 33, 335-367.

Goebel, T. H., & Brodsky, E. E. (2018). The spatial footprint of injection wells in a global compilation of induced earthquake sequences. *Science*, 361(6405), 899-904.

Hofmann, H., Zimmermann, G., Zang, A., & Min, K. B. (2018). Cyclic soft stimulation (CSS): a new fluid injection protocol and traffic light system to mitigate seismic risks of hydraulic stimulation treatments. *Geothermal Energy*, 6(1), 1-33.

Illies, J. H. (1972), the rhine graben rift system- plate tectonic and transform fault Geophysical survey, 1, 27-60

Imber, J., Tuckwell, G.W., Childs, C., Walsh, J.J., Manocchi, T., Heath, A.E., Bonson, C.G., Strand, J., (2004). Three-dimensional distinct element modelling of relay growth and breaching along normal faults. *Journal of Structural Geology* 26, 1897–1911. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2004.02.010>

Knoblauch, T. A., Stauffacher, M., & Trutnevyte, E. (2018). Communicating low- probability high- consequence risk, uncertainty and expert confidence: Induced seismicity of deep geothermal energy and shale gas. *Risk Analysis*, 38(4), 694-709.

McGarr, A. (2014). Maximum magnitude earthquakes induced by fluid injection. *Journal of Geophysical Research: solid earth*, 119(2), 1008-1019.

Michon, L., R. T. Van balen, O. Merle, and H. Pagnier (2003), The cenozoic evolution of the Roer Valley Rift system integrated at a European scale. *tectonophysics*, 367, 101-126.

Mitchell, T.M., Faulkner, D.R., (2012). Towards quantifying the matrix permeability of fault damage zones in low porosity rocks. *Earth and Planetary Science Letters* 339–340, 24–31. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.05.014>

Schumacher, M. E. (2002), upper Rhine Graben : role of preexisting structures during rift evolution . *Tectonics*, 21, 1006-

Schmittbuhl, J., Lambotte, S., Lengliné, O., Grunberg, M., Jund, H., Vergne, J., ... & Masson, F. (2021). Induced and triggered seismicity below the city of Strasbourg, France from November 2019 to January 2021. *Comptes Rendus. Géoscience*, 353(S1), 1-24.

Serrano, Y., Heimlich, C., Bodin, C., Chavot, P., Masseran, A., & Zoungrana, J. (2019). La géothermie profonde «n'est pas mature»: parcours d'une formule-argument à l'Eurométropole de Strasbourg. *Mots. Les langages du politique*, (1), 51-67.

Soliva, R., Benedicto, A., (2004). A linkage criterion for segmented normal faults. *Journal of Structural Geology* 26, 2251–2267. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2004.06.008>

Solum, J.G., Brandenburg, J.P., Naruk, S.J., Kostenko, O.V., Wilkins, S.J., Schultz, R.A., (2010). Characterization of deformation bands associated with normal and reverse stress states in the Navajo Sandstone, Utah. *AAPG Bulletin* 94, 1453–1475. <https://doi.org/10.1306/01051009137>

Townend, J., Zoback, M.D., (2000). How faulting keeps the crust strong. *Geology* 28, 399–402. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2000\)28<399:HFKTCS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2000)28<399:HFKTCS>2.0.CO;2)

Vidal, J., & Genter, A. (2018). Overview of naturally permeable fractured reservoirs in the central and southern Upper Rhine Graben: Insights from geothermal wells. *Geothermics*, 74, 57-73.

Yeo, I. W., Brown, M. R. M., Ge, S., & Lee, K. K. (2020). Causal mechanism of injection-induced earthquakes through the M w 5.5 Pohang earthquake case study. *Nature communications*, 11(1), 1-12.

Zang A, Yoon JS, Stephansson O, Heidbach O. (2013). Fatigue hydraulic fracturing by cyclic reservoir treatment enhances permeability and reduces induced seismicity. *Geophys J Int.* ;195:1282–7. <https://doi.org/10.1093/gji/ggt301>

Zang A, Zimmermann G, Hofmann H, Stephansson O, Min KB, Kim KY (2018).. How to reduce fluid-injection induced seismicity. Rock Mech Rock Eng. <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1467-4>.

Ziegler, P. A. (1992), european Cenozoic rift system, Tectonophysics, 91-111.

11. Annexes

Identifiant	Nom Fonroche Géothermie
FG_NT_A01_2019-11.pdf	A02
FG_NT_A02_2019-11.pdf	A01
FG_NT_A03_2020-01.pdf	A03
FG_NT_A04_2020-01.pdf	A04
FG_DT_A05-1_2018.xlsx	A05-1
FG_DT_A05-2_2019.xlsx	
FG_DT_A05-2b_2021-06-08.xlsx	A05-2
FG_DT_A05-2c_2021-06-16.xlsx	A05-2b
FG_DT_A05-3_2019.xlsx	
FG_DT_A05-3b_2021-06-08.xlsx	A05-3
FG_DT_A05-4_2019.xlsx	
FG_DT_A05-4b_2021-06-08.xlsx	A05-4
FG_DT_A06-1.xlsx	A06-3
FG_DT_A06-2.xlsx	A06-1
FG_DT_A06-3.xlsx	A06-2
FG_DT_A06-4.xlsx	A06-6.
FG_NT_B01_2020-02.pdf	B01.
FG_NT_B02_2020-02.pdf	B02.
FG_NT_B02b_2021-06.pdf	F05-18
FG_NT_B03_2020-03.pdf	B03
FG_NT_C01_2020-03.pdf	C01
FG_NT_C02_2020-03.pdf	C02
FG_NT_D01_2020-04.pdf	D01
FG_NT_D02_2020-04.pdf	D02
FG_NT_D03_2020-04.pdf	D03
FG_NT_D04_2020-04.pdf	D04
FG_NT_D05_2020-04.pdf	D05

FG_NT_D06_2020-07.pdf	D06
FG_NT_E02_2020-05.pdf	E02
FG_NT_E03-1.pdf	E03-1
FG_DT_E03-2.pdf	E03-2
FG_DT_E03-3.pdf	E03-3
FG_NT_E03-4_2018-04.pdf	E03-4
FG_NT_E03-5_2020.pdf	E03-5
FG_DT_E03-6.pdf	E03-6
FG_DT_E03-7.pdf	E03-7
FG_DT_E03-8.pdf	E03-8
FG_NT_E04_2020-05.pdf	E04
FG_NT_E06_2020-08.pdf	E06
FG_NT_F01_2020-09.pdf	F01
FG_NT_F01-b_2020-10.pdf	F01b
FG_NT_F02_2020-09.pdf	F02
FG_DT_F04-1_2021.pdf	F04-1
FG_DT_F04-2_2021.pdf	F04-2
FG_NT_F04-3_2021.pdf	F04-3
FG_NT_F04-4_2021.pdf	F04-4
FG_DT_F04-5_2021.pdf	F04-5
FG_DT_F04-5b_2021.pdf	F04-5b
FG_NT_F04-6_2021.pdf	F04-6
FG_NT_F04-7_2021.pdf	F04-7
FG_DT_F04-8_2021-05.png	F04-8
FG_NT_F04-9_2020-10-30.pdf	
FG_DT_F04-10_2021-10-01.txt	F04-9
FG_DT_F04-11_2021-10-01.txt	F04-10
FG_DT_F04-12_2021-10-01.txt	F04-11
FG_DT_F05-1_2020-08.xlsx	
FG_DT_F05-1b_2021-04.xlsx	F05-1

FG_DT_F05-2_2020-09.xlsx	
FG_DT_F05-2b_2021-04.xlsx	F05-2
FG_NT_F05-3b_2021-06-25.pdf	F05-3b
FG_NT_F05-4_2021-06.pdf	F05-4
FG_NT_F05-5_2021-06.pdf	F05-5
FG_NT_F05-6_2021-06.pdf	F05-6
FG_DT_F05-6b_2021-06.xlsx	F05-6b
FG_NT_F05-7_2021-06.pdf	F05-7
FG_DT_F05-7b_2021-06.xlsx	F05-7b
FG_NT_F05-8_2021-06.pdf	F05-8
FG_DT_F05-9_2021-06.pdf	F05-9
FG_DT_F05-10_2021-06.pdf	F05-10
FG_DT_F05-11_2021-06.pdf	F05-11
FG_DT_F05-12_2021-06.pdf	F05-12
FG_NT_F05-13_2021-06.pdf	F05-13
FG_NT_F05-13b_2021-06.pdf	F05-13b
FG_DT_F05-14-1_2021-06.xlsx	F05-14-1
FG_DT_F05-14-1b_2021-06.png	F05-14-1b
FG_DT_F05-14-1c_2021-06.png	F05-14-1c
FG_DT_F05-14-2_2021-06.CSV	F05-14-2
FG_DT_F05-14-2b_2021-06.png	F05-14-2b
FG_DT_F05-15-1_2021-06.txt	F05-15-1
FG_DT_F05-15-1b_2021-06.png	F05-15-1b
FG_DT_F05-15-1c_2021-06.png	F05-15-1c
FG_DT_F05-15-2_2021-06.txt	F05-15-2
FG_DT_F05-15-2b_2021-06.png	F05-15-2b
FG_DT_F05-16-1_2021-06.txt	F05-16-1
FG_DT_F05-16-2_2021-06.txt	F05-16-2
FG_DT_F05-17_2021-06.xlsx	F05-17
FG_NT_F06-1_2020-08.pdf	F06-1

FG_NT_F06-2_2020-09.pdf	F06-2
FG_NT_F06-3_2020-09.pdf	F06-3
FG_NT_F06-4_2020-09.pdf	F06-4
FG_DT_F06-5_2020-10.xlsx	
FG_DT_F06-5b_2021-06-02.xlsx	F06-5
FG_DT_F06-5c_2021-07-01.xlsx	F06-5b
FG_DT_F06-6_2020-10.xlsx	
FG_DT_F06-6b_2021-04-30.xlsx	
FG_DT_F06-6c_2021-06-02.xlsx	F06-6
FG_DT_F06-6d_2021-06-16.xlsx	F06-6b
FG_DT_F06-6e_2021-07-01.xlsx	F06-6c
FG_DT_F06-7_2021-04-30.xlsx	
FG_DT_F06-7b_2021-06-02.xlsx	F06-7
FG_DT_F06-7c_2021-06-16.xlsx	F06-7b
FG_DT_F06-7d_2021-07-01.xlsx	F06-7c
FG_DT_F06-8_2021-04-30.xlsx	
FG_DT_F06-8b_2021-06-02.xlsx	F06-8
FG_DT_F06-8c_2021-06-16.xlsx	F06-8b
FG_DT_F06-8d_2021-07-01.xlsx	F06-8c
FG_NT_F06-9_2021-06.pdf	F06-9
FG_DT_F06-10_2021-06.xlsx	F06-10
FG_NT_F06-11_2021-06.pdf	F06-11
FG_NT_F07_2020-10-19.pdf	F09
FG_NT_G01-1_2020-10-30.pdf	
FG_NT_G01-2_2020-11-04.pdf	F05-19
FG_NT_G01-3_2020-11-09.pdf	
FG_NT_G01-4_2020-11-09.pdf	
FG_NT_G01-5_2020-11.pdf	
FG_NT_G01-6_2020-11-16.pdf	
FG_NT_G01-7_2020-11-16.pdf	

FG_NT_G01-8_2020-11-23.pdf	
FG_NT_G02-1_2020-09-25.pdf	F07-1
FG_NT_G02-2_2020-10-06.pdf	
FG_NT_G02-3_2020-10-21.pdf	
FG_NT_G02-4_2020-10-28.pdf	
FG_NT_G02-5_2020-10-30.pdf	
FG_NT_G02-6_2020-11-06.pdf	
FG_NT_G02-7_2020-11-13.pdf	
FG_NT_G02-8_2020-11-20.pdf	
FG_NT_G02-9_2020-11-27.pdf	
FG_NT_G02-10_2020-12-04.pdf	
FG_NT_G02-11_2020-12-11.pdf	
FG_NT_G02-12_2020-12-18.pdf	F07-2
FG_NT_G02-13_2020-12-24.pdf	
FG_DT_G03-1_2020-10-21.xlsx	(voir F06-5 à F06-8b)
FG_DT_G03-2_2020-10-27.xlsx	(voir F06-5 à F06-8b)
FG_DT_G03-3_2020-11-06.xlsx	(voir F06-5 à F06-8b)
FG_DT_G03-4_2020-11-13.xlsx	(voir F06-5 à F06-8b)
FG_DT_G03-5_2020-11-20.xlsx	(voir F06-5 à F06-8b)
FG_DT_G03-6_2020-11-27.xlsx	(voir F06-5 à F06-8b)
FG_DT_G03-7_2020-12-11.xlsx	(voir F06-5 à F06-8b)
FG_DT_G03-8_2020-12-18.xlsx	(voir F06-5 à F06-8b)
FG_DT_G03-9_2020-12-24.xlsx	(voir F06-5 à F06-8b)
FG_DT_G04-1_2020-11-12.pdf	
FG_DT_G04-2_2020-11-12.pdf	
FG_NT_H01-1_2020-12-12.pdf	
FG_NT_H02-1_2020-12-13.pdf	
FG_NT_H02-2_2020-12-14.pdf	
FG_NT_H02-3_2020-12-15.pdf	
FG_NT_H02-4_2020-12-16.pdf	

FG_NT_H03-1_2020-12-16.pdf	(voir F05-2)
FG_NT_H03-2_2020-12-16.pdf	
FG_NT_H03-3_2020-12-16.pdf	
FG_NT_H03-4_2020-12-16.pdf	(voir F05-2)
FG_NT_H03-5_2020-12-16.pdf	(voir F06-5 à F06-8b)
FG_NT_H03-6_2020-12-16.pdf	(voir F05-2)
FG_NT_H03-7_2020-12-17.pdf	2.5
FG_DT_I01_2021-04-28.xlsx	F10
FG_DT_I02_2021-06-08.xlsx	F10b
FG_DT_I02b_2021-06-16.xlsx	F10c
FG_DT_I02c_2021-07-01.xlsx	F10d
FG_DT_I02d_2021-07-02.xlsx	F10e
FG_DT_I02e_2021-08-06.xlsx	F10f
FG_DT_I02f_2021-09-10.xlsx	
FG_DT_I03_2021-06-16.xlsx	F11
FG_DT_I04_2021-06-26.xlsx	
FG_DT_I05_2021-06-26.xlsx	
FG_DT_I06_2021-06-27.xlsx	
FG_DT_I07_2021-06-27.xlsx	
FG_NT_I08_2021-06-26.pdf	
FG_DT_I09-1_2021-06-25.pdf	F14-1
FG_DT_I09-2_2021-06-25.pdf	F14-2
FG_NT_I10_2021-06-25.xlsx	F15
FG_NT_I11_2021-06-25.xlsx	F16
FG_NT_I12_2021-09-01.pdf	F17
FG_NT_I12b_2021-09-03.pdf	F17b
FG_NT_I13_2021-09-03.pdf	F05-20
FG_NT_I13b_2021-08-26.pdf	

Documents non divulguables et non téléchargeables	
Identifiant	Nom Fonroche Géothermie
FG_NT_J01_2021-06-25.pdf	F04-9
FG_NT_J02_2021-07-02.pdf	F04-10
FG_NT_J03_2021-06-25.pdf	F05-3
FG_NT_J04-1_2021-06-25.pdf	F13-1
FG_NT_J04-2_2021-06-25.pdf	F13-2
FG_NT_J04-3_2021-06-25.pdf	F13-3
FG_NT_J05_2021-06-25.pdf	F12