

**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 (Mlv~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.

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.