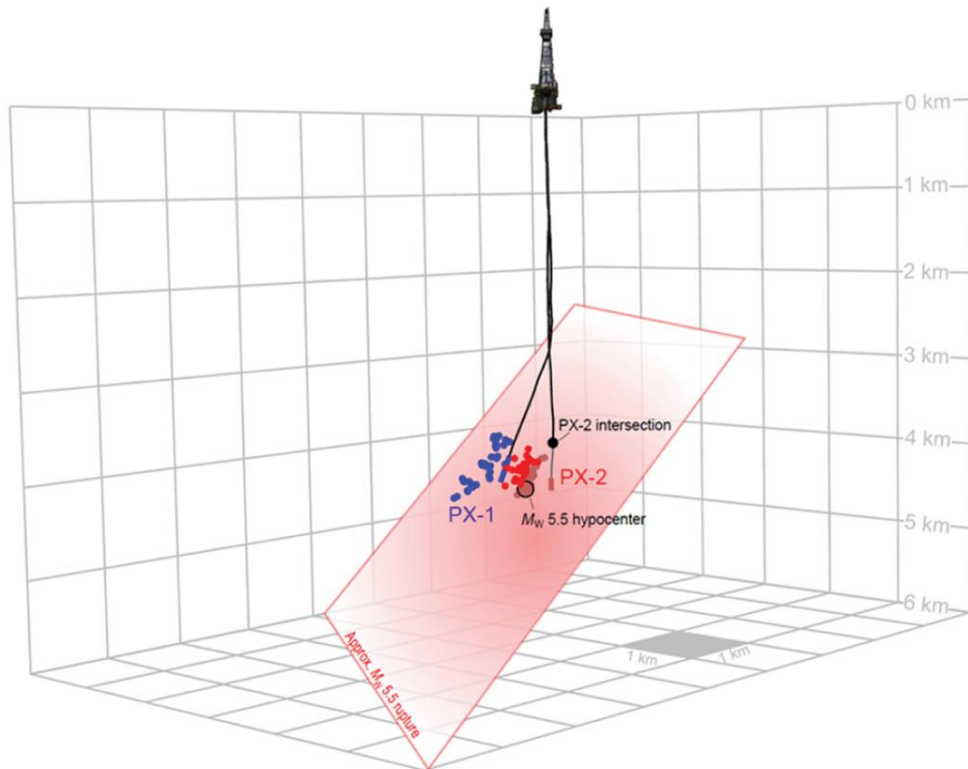




Évaluation du risque sismique du projet géothermique de Haute-Sorne, à la lumière du tremblement de terre de Pohang (Corée du Sud)

Un rapport du Service Sismologique Suisse à l'ETH de Zurich pour le canton du Jura

18 octobre 2019



Impressum

Editeur

Service Sismologique Suisse (SED) à l'ETH de Zurich

Auteurs

Auteur principal : Prof. Stefan Wiemer

Avec des contributions de : Dr Philippe Roth, Dr Marco Broccardo, Dr Francesco Grigoli, Dr Dimitrios Karvounis, Dr Arnaud Mignan, Dr Antonio Pio Rinaldi, Dr Toni Kraft, et Michèle Marti.

Date de publication

Rapport envoyé au canton du Jura, 18/10/2019 (une première version a été envoyée en Anglais le 04/10/2019)

Figure de couverture

Vue de la sismicité induite pendant la stimulation de PX-1 et PX-2 près de Pohang, avec épicerentre et plan de faille du séisme de magnitude 5.5 du 15 novembre 2017 (de Ellsworth et al. (2019))

Contenu

1.	Contexte	1
2.	Rôle du Service Sismologique Suisse de l'ETH de Zurich dans le cadre de la géothermie profonde	2
2.1	Mandats du SED	2
2.2	Indépendance et transparence	3
2.3	Implications passées et actuelles du SED dans des projets de géothermie profonde	4
2.3.1	<i>Bâle, Suisse</i>	4
2.3.2	<i>Saint-Gall, Suisse</i>	5
2.3.3	<i>Pohang, Corée du Sud</i>	5
2.4	Collaborations existantes avec GES	6
3.	Le tremblement de terre de Pohang	8
3.1	L'événement de Pohang et sa compréhension actuelle	8
3.2	Défaillances de la gouvernance du risque du projet de Pohang	10
3.3	Le tremblement de terre de Pohang était-il un événement extrême ?	12
3.4	Autres projets de SGS depuis 2014	15
3.4.1	<i>Helsinki, Finlande (résumé modifié d'après Kwiatek et al., 2019)</i>	15
3.4.2	<i>Rittershoffen, France</i>	16
3.4.3	<i>FORGE, États-Unis</i>	17
3.5	Évaluation des rapports de GES sur Pohang	17
4.	Évaluation des implications de Pohang pour Haute-Sorne, et recommandations du SED	21
4.1	Introduction	21
4.2	Évaluation et recommandations	22
4.2.1	<i>Validité de l'évaluation globale de risque et du cadre d'acceptation pour Haute-Sorne</i>	22
4.2.2	<i>Le risque de sismicité induite peut-il être évalué et contrôlé ?</i>	23
4.2.3	<i>Nécessité d'actualiser les choix spécifiques effectués lors de l'évaluation des risques</i>	25
4.2.4	<i>Nécessité d'actualiser les stratégies de suivi sismique et d'atténuation des risques</i>	28
4.2.5	<i>Nécessité de couches multiples de sécurité et d'une culture de la sécurité orientée vers l'avenir</i>	29
4.2.6	<i>Nécessité d'une meilleure détermination des failles en utilisant les données de réflexion sismique</i>	30
4.2.7	<i>Nécessité d'une meilleure détermination des failles en utilisant des données de forage</i>	31
4.3	Synthèse des recommandations	33
5.	Références	35

1. Contexte

En 2013, le canton du Jura a contacté le Service Sismologique Suisse (SED) de l'ETH de Zurich pour étayer l'examen de l'évaluation de l'aléa et du risque sismiques pour le projet de géothermie profonde proposé en Haute-Sorne. Le mandat couvrait les éléments liés au risque sismique des procédures de demande de permis et d'évaluation des risques environnementaux. Le SED a étudié les aspects relevant des risques sismiques de la demande de permis de Geo-Energie Suisse SA (GES). Les analyses sont documentées dans une série de rapports et ont été intégrées à l'évaluation des risques environnementaux et à la procédure de délivrance du permis du canton du Jura. De plus, le SED a discuté avec les autorités cantonales de stratégies adaptées pour la surveillance sismique et a examiné les critères d'acceptation pour l'autorisation des permis de projets de géothermie profonde. Sur la base de ces informations, le canton du Jura a délivré le permis à GES assorti d'une série d'obligations. Certaines de ces obligations se référant au risque sismique ont été contestées en justice.

En novembre 2017, un tremblement de terre dévastateur d'une magnitude de 5.5 a frappé les alentours de la ville de Pohang en Corée du Sud. On a immédiatement supposé que l'événement était lié aux activités voisines de stimulation d'un projet géothermique (Grigoli et al., 2018). Le tremblement de terre a blessé 135 résidents, provoqué le déplacement de plus de 1'700 personnes dans des hébergements d'urgence et entraîné des dommages directs sur plus de 57'000 infrastructures pour un total dépassant les USD 75 millions. Selon la banque de Corée, l'impact économique global s'élève à plus de USD 300 millions (Lee et al., 2019). GES a immédiatement informé le canton du Jura du tremblement de terre d'une magnitude de 5.5 et de sa relation possible avec le projet géothermique ainsi que de la participation de GES à ce projet dans le cadre du projet DESTRESS de la Commission européenne. Suite à cette information, le canton du Jura a demandé à GES d'analyser le tremblement de terre coréen et le projet géothermique de Pohang et de se prononcer sur le besoin éventuel d'une actualisation de l'étude de risque sismique pour le projet de Haute-Sorne. Une analyse ultérieure des événements par le SED (Grigoli et al., 2018) et d'autres groupes (Kim et al., 2018) a montré que la secousse principale d'une magnitude de 5.5 et de nombreuses répliques étaient survenues dans un rayon de 1 à 2 kilomètres du projet géothermique, rendant probable un lien causal avec les activités de stimulation. Le projet de Pohang est à certains égards similaire à celui de Haute-Sorne dans le Jura : il vise lui aussi à mettre en place un système géothermique stimulé (SGS) et cible des profondeurs, plages de température et volumes d'injection similaires.

GES a fourni au canton du Jura une série de rapports résumant ses conclusions au début de l'année 2019. Par la suite, le canton a demandé au SED d'examiner les rapports de GES et leurs conclusions en mars 2019. Entre-temps, le gouvernement coréen avait mandaté un comité de spécialistes indépendants, constitué de douze experts locaux et de cinq experts internationaux, afin d'enquêter sur l'accident (« Overseas Research Advisory Committee », ORAC). Ce comité consultatif de recherche a publié ses conclusions en mars 2019 et une synthèse de l'analyse et des enseignements tirés a été publiée par Lee et al. (2019). Sur la base d'une analyse approfondie des données disponibles, la commission a conclu que les activités de stimulation de l'installation géothermique avaient déclenché le tremblement de terre d'une magnitude de 5.5. Les principales conclusions ont également été résumées et publiées sur le site Internet du SED (voir le rapport d'information « *Séismes et géothermie : l'enseignement de Pohang* »). Le SED a demandé en plus à GES de fournir une comparaison entre ses conclusions sur le tremblement de terre de Pohang et celles du rapport de la commission d'experts. La comparaison a été fournie au SED en juin 2019.

Le SED a mis en place une équipe d'examen constituée de neuf scientifiques disposant d'une vaste expérience dans tous les aspects liés à la sismicité induite, dirigée par le directeur du Service Sis-

mologique Suisse (SED) de l'ETH de Zurich, le professeur Stefan Wiemer. Le SED a basé son évaluation sur les rapports disponibles et les publications scientifiques portant sur Pohang et d'autres cas de sismicité induite, ses propres analyses des données disponibles relatives à Pohang, les expériences d'autres projets géothermiques et les discussions avec des collègues du monde entier, y compris des experts du comité ORAC de Pohang. Notre examen se concentre uniquement sur le risque sismique associé aux systèmes géothermiques stimulés (SGS) et spécifiquement au projet de Haute-Sorne concernant les critères d'acceptation définis par le canton. Les intérêts potentiels des technologies SGS concernant les revenus financiers ou les aspects relevant du changement climatique ne sont pas considérés, pas plus que leurs implications potentielles sur leur acceptation par le public.

La version originale de ce rapport a été formulée en anglais ce qui permet au canton du Jura de le soumettre à d'autres experts nationaux ou internationaux s'il le désire.

2. Rôle du Service Sismologique Suisse de l'ETH de Zurich dans le cadre de la géothermie profonde

2.1 Mandats du SED

Le Service Sismologique Suisse (SED) de l'ETH de Zurich est l'institution fédérale responsable de la surveillance des tremblements de terre en Suisse et dans les pays voisins. En cas de tremblement de terre, le SED informe le public, les autorités et les médias de la localisation du tremblement de terre, de sa magnitude et de ses conséquences possibles. Le SED a également pour mandat fédéral d'évaluer l'aléa et le risque sismiques des tremblements de terre naturels au niveau national. Les activités du SED sont intégrées dans le programme de mesures pour la mitigation des séismes de la Confédération. Le rôle du SED, à savoir avertir la population et informer les autorités, est défini dans le contexte de l'optimisation de l'alerte précoce et de l'alarme sur les dangers naturels du Conseil fédéral (QWARNA) et dans l'ordonnance révisée sur l'alerte et l'alarme (Ordonnance sur l'alarme).

Afin d'effectuer ces tâches nationales fondamentales, l'ETH de Zurich reçoit un financement central par le biais d'une contribution financière de la Confédération (conformément à l'article 34b de la loi sur les EPF). Le SED demande régulièrement des financements aux agences de promotion comme par exemple le Fonds national suisse de la recherche scientifique ou les programmes-cadres de l'UE afin d'effectuer des projets de recherche scientifique. De plus, le SED officie également comme partenaire de différents organismes publics (offices fédéraux, autorités cantonales et locales) pour effectuer des analyses de l'aléa sismique ou des projets de surveillance réglementés et financés par des mandats spécifiques. En raison de son expertise, on demande aussi souvent au SED d'intervenir comme participant à une mission spécifique (par exemple surveillance sismique) pour certains projets du secteur économique privé.

Actuellement, le SED n'a aucun mandat fédéral explicite concernant la sismicité induite dans le contexte de projets géothermiques ou géotechnologiques autres. Cependant, depuis novembre 2010, le SED reçoit un financement de l'Office fédéral de l'énergie pour conduire le projet GEOBEST. Ce projet permet au SED d'assister et de conseiller les exploitants de projets géothermiques en matière de surveillance sismique ainsi que les autorités cantonales pour l'examen des évaluations de risques sismiques. Dans les deux cas, l'assistance du SED doit être demandée par l'exploitant et/ou l'organe de réglementation. Les détails de la collaboration sont définis dans un accord contractuel. Dans le cadre de GEOBEST, le SED a publié en anglais un guide des pratiques d'excellence pour la gestion des séismes induits (« Good Practice » Guide for Managing Induced Seismicity in Deep Geothermal Energy Projects in Switzerland »).

Indépendamment de sa participation ou non à un projet géothermique, le SED informe le public dès que le réseau national de surveillance sismique détecte des tremblements de terre potentiellement perceptibles. De plus, tous les événements sismiques, y compris les tremblements de terre plus petits et non ressentis, enregistrés par le réseau national sont mis à disposition en temps réel sur le site Internet du SED.

2.2 Indépendance et transparence

Le vaste éventail d'activités du SED englobe des services pour la société, l'enseignement universitaire et la recherche, le transfert de connaissances ainsi que des services consultatifs spécialisés destinés aux autorités et au secteur économique privé. Afin d'éviter la concurrence avec des prestataires privés, ces services consultatifs spécialisés sont limités aux cas où l'expertise requise n'est pas disponible dans le secteur privé. Ce vaste éventail de fonctions repose sur les deux rôles du SED d'agence fédérale officielle responsable de la surveillance des tremblements de terre et de principal institut de recherche suisse dans ce domaine. Il est cohérent avec la tradition et les buts de l'ETH de Zurich. Cependant, outre les avantages et synergies, ces fonctions impliquent également des conflits d'intérêts potentiels et peuvent susciter des plaintes de partialité. Depuis 2014, le SED et l'ETH de Zurich ont mis en place les mesures suivantes afin d'éviter, ou tout du moins de réduire, dans la mesure du possible les conflits potentiels au niveau des rôles. Ces mesures visent à définir et, si indiqué, à limiter clairement les mandats, à les présenter de manière transparente et à les communiquer avec ouverture.

Transparence : le SED fournit des informations sur tous ses mandats et la compréhension de son rôle dans le cadre des mandats en question et ce, de manière transparente. Toutes les données acquises sont mises à la disposition du public. Le SED fournit des informations détaillées, de manière proactive et sans limites, en cas d'événement sismique potentiellement perceptible, et fournit également des informations générales.

Examen par les pairs : les découvertes pertinentes sont publiées dans des journaux scientifiques et, en tant que telles, soumises au processus d'évaluation par les pairs. Cela signifie que toutes les déclarations du SED reposent sur des découvertes publiées et scientifiquement justifiées dans la mesure du possible. Nous impliquons aussi toujours différents experts du SED dans nos rapports ; celui-ci a par exemple été rédigé par neuf experts en sismicité induite, chacun disposant d'au moins quatre années d'expérience dans ce domaine en plus de leur doctorat.

Des contrats clairs : toutes les collaborations avec l'industrie ou les offices gouvernementaux dépassant CHF 10'000 sont réglementées par un contrat spécifiant les objectifs, les résultats visés, le calendrier, les responsabilités, les droits de propriété intellectuelle y compris les informations de fond et de premier plan, l'indépendance, les droits publics, etc. Ces contrats sont examinés par des experts, y compris des juristes de ETH transfer, le bureau de transfert technologique de l'ETH de Zurich. Les contrats dépassant CHF 50'000 sont signés par le vice-président de la recherche de l'ETH. Les contrats peuvent être rendus accessibles au public sur demande justifiée.

Supervision : le SED est une entité non départementale conformément à l'article 61 de l'ordonnance sur l'organisation de l'ETH Zürich (RSETHZ 201.021). Il est directement subordonné au vice-président de la recherche et des relations économiques de l'ETH (VPFW). Un conseil consultatif constitué de professeurs de l'ETH triés sur le volet assiste le vice-président de la recherche et des relations économiques pour déterminer les priorités stratégiques du SED.

Sélection des mandats : le SED soutient en premier lieu les autorités nationales, cantonales et locales de supervision. Des services ne sont fournis au secteur industriel que si ces derniers n'ont aucune incidence sur l'indépendance du SED. En cas de doute, le directeur du SED consulte le vice-président de la recherche et des relations économiques et le conseil consultatif du SED. Le directeur du SED est nommé professeur titulaire de l'ETH de Zurich ; le directeur et ses employés sont soumis aux réglementations de l'ETH de Zurich concernant l'intégrité et l'éthique en matière d'étude et de recherche et notamment aux directives sur l'intégrité dans la recherche et sur les bonnes pratiques scientifiques à l'ETH de Zurich (RSETHZ.414).

Aucune nomination conjointe, aucun cadeau et aucune compensation financière : pour éviter tout conflit d'intérêts, le SED n'emploie pas de personnel conjointement avec l'industrie. Conformément au guide de conformité de l'ETH, le personnel du SED n'a pas l'autorisation de recevoir une compensation personnelle pour des travaux sur des projets pouvant créer un conflit d'intérêts potentiel (ce qui englobe les projets géothermiques en Suisse).

2.3 Implications passées et actuelles du SED dans des projets de géothermie profonde

Au cours de ces 15 dernières années, le SED a participé à plusieurs projets géothermiques en Suisse et dans le monde entier. Sans exception, le SED y a joué un rôle consultatif et n'a pas eu le droit de prendre de décisions opérationnelles. Pour garantir son indépendance, le SED n'a jamais accepté de partager des profits ou d'autres bénéfices en dehors de son accès aux données à fins de recherche scientifique, dans le cadre de son indemnisation pour son rôle consultatif. Nous décrivons ci-après brièvement notre rôle dans les projets les plus pertinents pour Haute-Sorne. D'autres projets plus anciens ou à venir comme Schlattingen, Genève, Lavey ou Bedretto ne sont pas exposés en détail ici.

2.3.1 Bâle, Suisse

Le projet « Deep Heat Mining » de Bâle en 2006 a été le premier projet de géothermie profonde accompagné par le SED. Le SED était essentiellement responsable de la surveillance indépendante de l'activité sismique pertinente, à savoir potentiellement ressentie, durant le processus de stimulation ; les résultats ont été publiés dans la base de données ECOS et sur des cartes sur le site Internet du projet. Le SED avait également pour mission d'informer les autorités en cas d'enregistrement d'un tremblement de terre d'une magnitude locale de 2.0 ou plus. Le SED n'a pas participé aux activités de demande de permis et à l'examen de l'évaluation de l'aléa et du risque sismiques.

Après le tremblement de terre d'une magnitude de 3.4 en décembre 2006, le SED a fourni aux autorités du canton de Bâle-Ville des conseils d'expert concernant le risque de tremblement de terre du projet Deep Heat Mining (étude SERIANEX¹). L'analyse scientifique des données liées aux injections bâloises a donné lieu à plus de vingt publications par le SED dans des journaux internationaux examinés par les pairs.

Depuis avril 2012, le SED a officiellement pris en charge la surveillance sismique du forage profond de Bâle. À cette fin, deux des sismomètres de forage de l'exploitant ont été inclus dans le réseau du SED. Une augmentation de l'activité sismique sur le site bâlois a commencé à peu près à la même période et a atteint des magnitudes maximales de 1.9 jusqu'en 2017. Le canton de Bâle-Ville a confié au SED la mission d'enquêter sur les raisons à l'origine de cette hausse de l'activité sismique. L'enquête est arrivée à la conclusion que la fermeture du puits en avril 2011 avait entraîné une

¹ Baisch S, Carbon D, Dannwolf U, Delacou B, Devaux M, Dunand F, et al. : Deep Heat Mining Basel : Seismic risk analysis. . In: SERIANEX: Report from Department für Wirtschaft, Soziales und Umwelt des Kanton Basel-Stadt. Amt für Umwelt und Energie (2009)

augmentation de la pression des fluides dans le réservoir qui a ensuite déclenché l'activité sismique^{2,3}. Suite à ces résultats, le canton a ordonné l'ouverture du forage en 2017 et a demandé au SED de superviser l'opération. Le SED a mis en place une technique très sensible de reconnaissance des formes d'ondes afin de surveiller le site et a mis en œuvre un système d'alerte pour le canton et l'exploitant. Ces activités ont été financées par Industrielle Werke Basel (IWB), le propriétaire du puits profond à Bâle.

Le SED continue à surveiller l'activité sismique à proximité du forage bâlois. Au nom du canton, le SED a aidé IWB à développer une stratégie à long terme pour la surveillance sismique et à améliorer son réseau sismique dans la zone. Des informations détaillées sur le projet bâlois sont disponibles ici : www.seismo.ethz.ch/earthquakes/monitoring/geothermal-energy-basel/Project-Description/.

2.3.2 Saint-Gall, Suisse

Sur mandat des Services Industriels de St. Gall (sgsw) et dans le cadre du projet de recherche GEOBEST-CH, le SED effectue la surveillance sismologique du projet géothermique de la ville de Saint-Gall depuis le printemps 2012. À cette fin, six stations sismiques spéciales, et plus tard jusqu'à douze, ont été installées et entretenues. Le SED a également contrôlé l'étude de risque sismique et le plan de réduction des risques soumis par l'exploitant au canton et a conseillé le canton après un tremblement de terre de magnitude de 3.5. Le SED a informé le public par le biais de son site Internet sur l'activité sismique observée et son interprétation⁴ avec des informations de fond. Depuis 2013, le SED publie plusieurs articles sur la sismicité induite et sa relation avec les structures géologiques et la venue de gaz. sgsw a mandaté le SED pour qu'il continue à surveiller la région de Saint-Gall avec un réseau réduit de quatre stations jusqu'en septembre 2020. Ces activités ont été financées par sgsw dans le cadre du projet de la Commission européenne S4CE.

Des informations détaillées sur le projet de Saint-Gall sont consultables ici : www.seismo.ethz.ch/earthquakes/monitoring/geothermal-energy-st.gallen/project-description/.

2.3.3 Pohang, Corée du Sud

Le SED fait partie du consortium du projet DESTRESS financé par la Commission européenne dans le cadre du programme Horizon 2020 (voir également 2.4). Les exploitants en charge du site de Pohang (NexGeo Incorporated) ont proposé le projet SGS de Pohang comme l'un des nombreux sites de test et de démonstration du projet DESTRESS. À l'origine, comme indiqué dans la proposition DESTRESS, il était prévu que le SED contribue à la surveillance sismique du site géothermique de Pohang ainsi qu'à la mise en œuvre et au test d'un système prédictif de feux de signalisation. Cependant, après des discussions initiales au sein du consortium DESTRESS et avec les exploitants du projet Pohang, le SED a décidé de se retirer de l'engagement proposé sur le site de Pohang à l'automne 2016. Outre des problèmes de communication et linguistiques, la raison principale du retrait était l'impression qu'il manquait une approche rigoureuse pour l'évaluation des risques sismiques de la part des exploitants de Pohang. Aucune étude de risque n'était à la disposition du SED ou du consortium DESTRESS. Le réseau sismique installé par l'exploitant et des partenaires universitaires locaux semblait être inférieur aux standards de qualité et les procédures coréennes d'évaluation et de réduction des risques n'étaient pas claires et accessibles. Le SED a prêté un sismomètre de forage et des câbles à GES, un partenaire de DESTRESS. GES les a ensuite installés et exploités

² www.seismo.ethz.ch/export/sites/sed-site/home/.galleries/pdf_home/Induzierte-Erdbeben-im-Nachgang-des-eingestellten-Geothermieprojekts-in-Basel.pdf

³ http://www.seismo.ethz.ch/export/sites/sed-site/home/.galleries/pdf_home/2017_03_29_MM-Oeffnung-Bohrloch_final.pdf

⁴ www.seismo.ethz.ch/earthquakes/monitoring/geothermal-energy-st.gallen/earthquake-chronology-geothermal-energy-project-in-st.-gallen/

à Pohang à partir de décembre 2016. Quelques mois après le tremblement de terre dévastateur qui a frappé la région et afin de veiller à ce que les enseignements tirés de la catastrophe de Pohang soient divulgués au public, le SED a prôné au début de l'année 2018 une publication de grande visibilité des résultats préliminaires de Pohang (Grigoli et al., 2018), à l'aide des données publiquement disponibles et des enregistrements du sismomètre de forage profond installé près du site de projection.

2.4 Collaborations existantes avec GES

Comme indiqué ci-dessus, l'ETH de Zurich et le SED promeuvent le transfert de connaissances entre les sphères académiques et l'industrie. Dans ce but, le SED a, par le passé, collaboré avec GES dans le cadre de différents projets de recherche. C'est d'ailleurs toujours le cas actuellement. Le SED a conscience que de telles collaborations peuvent potentiellement mener à des conflits d'intérêts. Comme précisé précédemment, des accords juridiques contraignants et des règles supplémentaires régissant l'indépendance et la transparence garantissent la liberté scientifique du SED et lui permettent de remplir son mandat en sa qualité d'institution fédérale fiable. De plus, en raison de la pratique du SED de publier son travail dans des journaux scientifiques, ses conclusions sont examinées par d'autres experts et accessibles pour le public. Dans un souci de transparence, les collaborations de recherche passées et actuelles avec GES sont énumérées ci-après :

- **Projet RT-RAMSIS financé par CTI (maintenant Innosuisse)** qui a démarré en 2015 et a pris fin en juillet 2019. RT-RAMSIS a pour vocation de développer différentes approches pour gérer l'aléa et le risque de sismicité induite en temps réel. Le SED a initié le développement du premier système de feux de signalisation prédictif (ATLS). Le concept ATLS a déjà été introduit dans les obligations du canton pour le projet de Haute-Sorne (sous le numéro 51, Système de feux de signalisation prédictif (ATLS)). Le logiciel développé au SED pour ATLS sera fourni à GES pour une mise en œuvre dans le cadre du projet de Haute-Sorne.
- **Projet GEOTHERMICA COSEISMIQ** : ce projet de recherche, d'innovation et de démonstration regroupe une petite équipe d'exploitants géothermiques et de scientifiques originaires de Suisse, d'Irlande, d'Allemagne et d'Islande. Cette équipe travaille à l'amélioration et la validation des technologies avancées de surveillance et de contrôle de la sismicité induite qui ont été développées et codées au cours de ces trois dernières années dans le cadre du projet RT-RAMSIS. Ces technologies seront testées en Islande sous la forme d'un outil adaptatif d'assistance à la prise de décisions sur la base des données disponibles durant des applications industrielles. C'est l'objectif principal de COSEISMIQ. Ce projet se veut une démonstration de la technologie (niveau de maturité technologique 6+) dans le cadre d'une application commerciale à plusieurs puits en Islande, un pays qui connaît de nombreux projets géothermiques couronnés de succès et où l'utilisation de la sismicité induite est courante.
- Le SED et GES sont tous les deux partenaires du **consortium DESTRESS**, un projet financé par la Commission européenne dans le cadre du programme Horizon 2020 et dirigé par le GFZ de Potsdam. 16 partenaires de la recherche et de l'industrie européennes et coréennes du sud collaborent dans le cadre du projet DESTRESS. Le SED se concentre cette fois encore sur l'amélioration des procédures de surveillance sismique et d'évaluation des risques tandis que GES veut en priorité démontrer l'isolation zonale ainsi que les procédures de stimulation multi-étapes. Il était prévu d'utiliser Haute-Sorne comme site de démonstration pour DESTRESS ; ce site a été remplacé par Geldinganes en Islande en 2018 (pour le SED) et par Bedretto (pour GES).
- **SCCER-SoE** : le SED et GES font partie des 30 partenaires et plus de **SCCER-SoE** originaires du monde académique et industriel. Au cours de ces deux dernières années, le projet s'est beaucoup concentré sur les méthodologies d'évaluation des risques et sur les expériences à échelle réduite (laboratoires du Grimsel et de Bedretto).

- **DEEP Geothermica** : le SED est en tête de file d'une proposition soumise en seconde phase du programme GEOTHERMICA co-financé par la Commission européenne en 2019 (neuf partenaires de cinq pays y compris GES). Le projet proposé se concentre sur le développement et le test d'un nouveau système de traitement par apprentissage automatique de l'activité sismique et de nouvelles méthodes de prévision pour des systèmes de feux de signalisation prédictifs. Le site de démonstration choisi pour ce projet se trouve dans l'Utah. FORGE est un laboratoire souterrain spécial sponsorisé par le Département américain de l'énergie (DEO) visant à développer, à tester et à accélérer les percées dans le domaine des technologies liées aux SGS. Le transfert de connaissances vers d'autres sites, y compris Haute-Sorne, est un but spécifique de ce projet.

3. Le tremblement de terre de Pohang

3.1 L'événement de Pohang et sa compréhension actuelle

Lorsqu'il a frappé Pohang le 15 novembre 2017, le tremblement de terre d'une magnitude de 5.5 a été une surprise totale pour les exploitants et la République de Corée. Même si la série d'injections avait généré de nombreux tremblements de terre jusqu'à une magnitude de 3.2, la population n'avait en grande partie pas conscience de l'existence du projet géothermique et du risque associé. Après le tremblement de terre d'une magnitude de 5.5, les exploitants et certaines des agences impliquées ont eu comme premier réflexe de nier tout lien causal avec les opérations géothermiques, notamment en raison du fait qu'un plus grand tremblement de terre tectonique était survenu en septembre 2016 à environ 40 km au sud de Pohang (figure 1). Il y a par ailleurs aussi eu des débats au sein de la communauté scientifique pour savoir s'il fallait parler d'un événement « induit » ou « déclenché ». Néanmoins, cette distinction technique est probablement peu importante pour les personnes touchées et pour l'établissement des responsabilités au sens juridique du terme. Étant donné qu'il n'existe pas de distinction clairement définie, universellement acceptée et déterminable entre la sismicité « induite » et « déclenchée », nous utiliserons sans distinction les deux termes dans ce rapport.

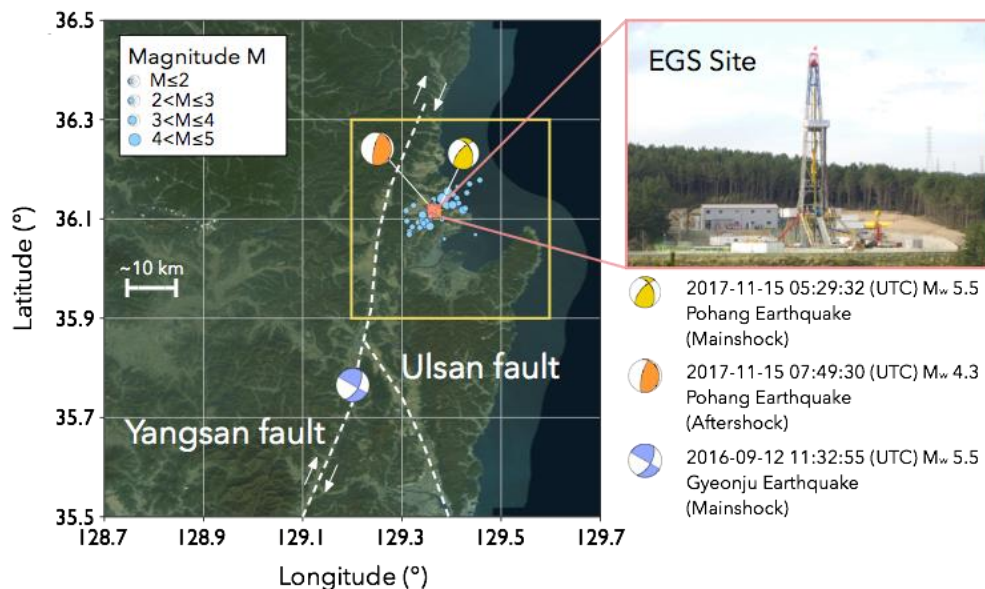


Figure 1 : carte de la région de Pohang, Corée du Sud ; on montre l'emplacement du site de forage, les principales failles connues (lignes blanches), la secousse principale du 15 novembre 2017 (« ballon de plage » jaune) et le tremblement de terre de Gyeongju de septembre 2016.

Nous fournissons ci-après un bref résumé de la séquence d'injections et de la sismicité associée, tirée de Ellsworth et al. (2019) :

« Sur une période d'environ quatre années allant de 2012 à 2016, deux puits d'exploration nommés PX-1 et PX-2 ont été forés dans le socle granitique pour développer le SGS. PX-1 a une profondeur conceptuelle de 4'127 m, mais le tube de forage s'est retrouvé coincé après avoir dépassé les 4'000 m et le trou a été perdu sous une profondeur de 2'485 m. PX-1 a ensuite été dévié sur le côté et prolongé dans la direction ouest-nord-ouest à une profondeur de 4'215 m avec une profondeur mesurée (MD) de 4'362 m. PX-2 a été foré à une profondeur de 4'340 m. PX-1 et PX-2 sont distants l'un de l'autre de 6 m dans la direction nord-sud à la surface et d'environ 600 m au fond. Les deux puits sont coffrés sur leur longueur sauf pour les 313 m derniers mètres de PX-1 et les 140 m derniers mètres de PX-2. Ces deux intervalles du fond sont ouverts pour les injections de fluide et les reflux.

Cinq stimulations hydrauliques ont été réalisées entre le 29 janvier 2016 et le 18 septembre 2017. La première, la troisième et la cinquième stimulation ont été réalisées dans PX-2 et la deuxième et la quatrième dans PX-1. Chaque stimulation hydraulique comprenait plusieurs cycles d'injection d'eau à haute pression suivis par une fermeture ou un reflux. Le tremblement de terre de Pohang d'une magnitude de 5.5 est survenu quand PX-1 était fermé et PX-2 ouvert après la cinquième stimulation. La figure 2 montre les taux d'injection et le volume net d'injection sur toute la période des cinq stimulations. Les volumes d'eau injectés dans PX-1 et reflus depuis PX-1 sont respectivement de 5'663 m³ et 3'968 m³. Les volumes d'eau injectés dans PX-2 et reflus depuis PX-2 sont respectivement de 7'135 m³ et 2'989 m³. Par conséquent, un volume net de 5'841 m³ d'eau injectée est resté dans le sous-sol après les stimulations.

Dans PX-2, la pression maximale de la tête de puits et le taux d'injection atteignaient 89.2 MPa et 46 l/s pendant la première stimulation. Au niveau de PX-1, la pression maximale de la tête de puits et le taux d'injection s'élevaient à 27.7 MPa et 19 l/s durant la deuxième stimulation. Dans l'ensemble, les pressions d'injection étaient plus élevées pour PX-2 que pour PX-1 avec des taux d'injection similaires. Une activité sismique a accompagné chaque stimulation et s'est prolongée pendant plusieurs mois pour l'injection dans PX-2 (Figure 2). »

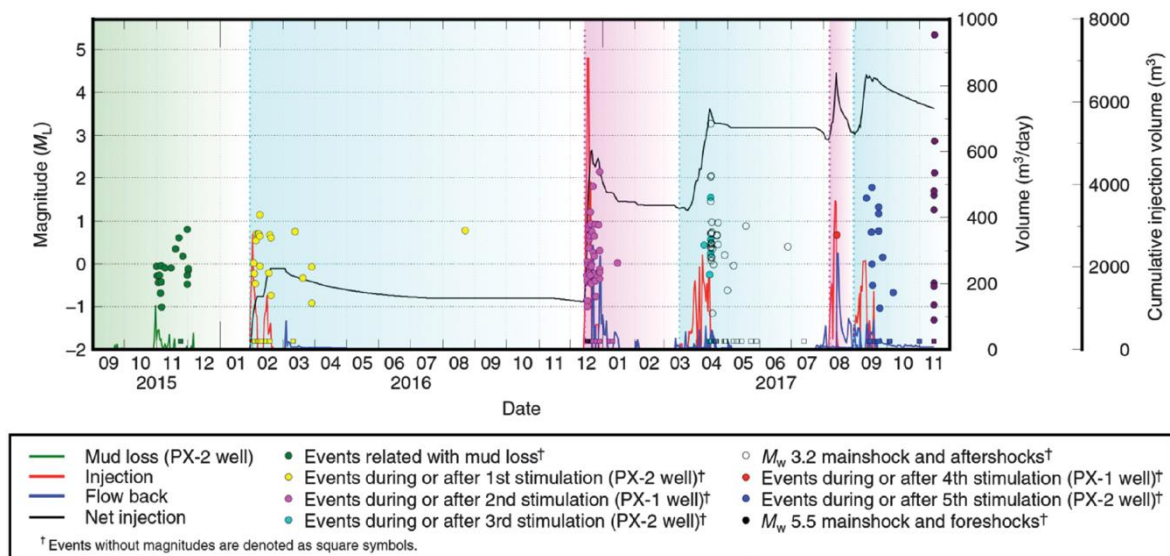


Figure 2 : calendrier des injections et de l'activité sismique dans les puits PX1 et PX2 (tiré de Ellsworth et al., 2019).

Les analyses ultérieures de la secousse principale et des répliques ainsi que la nouvelle analyse des séquences d'injection par différents groupes indépendants ont mené pour le moment à environ 20 à 30 publications examinées par les pairs en plus du rapport publié par l'équipe d'enquête coréenne et le rapport fourni au canton par GES. Ces contributions de recherche ont révélé à ce jour un tableau en grande partie cohérent. Il ne reste plus que quelques incohérences. En termes généraux, l'analyse présentée par GES est conforme aux interprétations disponibles à ce jour ; les détails sont commentés dans les sections suivantes. Cependant, les différentes études réalisées sur Pohang, y compris celle de GES, révèlent également selon nous les limites de la capacité des scientifiques et ingénieurs à comprendre et en fin de compte à prévoir l'évolution détaillée et le timing des tremblements de terre induits. Par exemple, le fait que la secousse principale soit survenue environ deux mois après la fin des stimulations hydrauliques (Lee et al., 2019) n'est pas très bien compris : le fluide ou la surpression ont-ils continué à migrer le long de la faille activée, l'interaction tremblement de terre-tremblement de terre a-t-elle joué un rôle (Ellsworth et al., 2019) ou la faille s'est-elle affaiblie en raison d'une altération chimique (Westway & Burnside, 2019) ? Quel est le rôle des

contraintes tectoniques et notamment des changements de contraintes statiques et dynamiques causés par les séismes de Tohoku en 2011 et de Gyeongju en 2016 dans le préconditionnement des failles (Hong et al., 2018) ? Quelle est la contribution de chacune des injections individuelles à la défaillance ultime ?

Bon nombre de ces questions ouvertes resteront probablement à jamais sans réponse étant donné qu'il n'existe pas d'observation permettant de leur apporter une réponse. Cependant, les faits fondamentaux pertinents à Pohang ont été établis et documentés dans Lee et al. (2019) ainsi que Ellsworth et al. (2019) : ces conclusions confirment et renforcent l'évaluation initiale de Grigoli et al. (2018) et de Kim et al. (2018) et peuvent être synthétisées de la manière suivante :

Le tremblement de terre de Pohang d'une magnitude de 5.5 a été déclenché par les stimulations du SGS effectuées sur le site géothermique, probablement principalement par celles liées au puits PX-2. La sismicité induite par injection, par des changements de contraintes liés aux injections ou éventuellement par une altération chimique ont réactivé et affaibli une importante zone de faille préexistante. Une rupture sur cette faille s'est développée en un tremblement de terre d'une magnitude de 5.5 suite à la libération des tensions tectoniques accumulées.

3.2 Défaillances de la gouvernance du risque du projet de Pohang

L'analyse de la stimulation de Pohang et de la secousse principale réalisée jusqu'à présent par GES, le SED et d'autres groupes de recherche ainsi que le travail du comité ORAC ont indiqué plusieurs défaillances majeures au niveau de la surveillance de Pohang, de la gestion des risques et des approches liées à la gouvernance des risques⁵. Le SED n'a pas une vue d'ensemble complète de toutes les étapes et procédures appliquées. Il ne nous incombe pas d'évaluer les responsabilités. Ce n'est pas de notre ressort. Il est toujours facile d'évaluer les défaillances a posteriori. Par conséquent, les déclarations suivantes visent à identifier les leçons que le SED considère comme importantes et les enseignements à tirer du projet de Pohang dans le cadre de l'examen du projet de Haute-Sorne :

1. Selon notre évaluation, les considérations a priori des exploitants en matière de risques n'étaient pas adaptées pour les valeurs à risque et le type de projet. Vu les données empiriques limitées et l'expérience réduite en matière de SGS dans le monde et en raison de l'exposition considérable et de la vulnérabilité de certaines parties du bâti, une évaluation de l'aléa et du risque beaucoup plus complète, examinant systématiquement les incertitudes et les options alternatives, aurait dû être effectuée. Les procédures pour de telles analyses sont fréquentes dans d'autres évaluations des risques, par exemple pour les tremblements de terre naturels et ont aussi été établies pour la sismicité induite dans le sillage du projet SGS de Bâle (SERIANEX, 2009 ; Bachmann et al., 2011 ; Mignan et al. 2015). Giardini (2009) ainsi que Kraft et al. (2009) ont conclu qu'il fallait prendre au sérieux le risque des projets SGS, mais bon nombre des leçons et procédures découlant de projets passés n'ont pas été mises en œuvre dans le cadre du projet de Pohang.
2. À notre connaissance, la probabilité de tremblements de terre dévastateurs a été exclue des considérations des risques ; cet aspect a également été exclu de la communication relative au projet. Aucune solution d'assurance adaptée et aucun arrangement préalable pour des compensations n'étaient en place à notre connaissance. La possibilité d'un événement dévastateur

⁵ Comme indiqué dans la section 1, certaines de ces défaillances étaient apparentes lors des phases préalables du projet. C'est la raison pour laquelle le SED s'était retiré du projet à l'automne 2016.

peu probable, mais aux conséquences importantes n'a pas été discutée avec les organes de réglementation. On a probablement trop fait confiance à l'effet de limitation, par le volume maximum injecté, de l'ampleur du tremblement de terre (limite de McGarr) malgré les nombreuses preuves attestant que la limite de McGarr n'est pas une limite fixe (van der Elst et al., 2016 ; Gischig et Wiemer, 2013 ; Atkinson et al., 2017). Les exploitants n'avaient pas conscience que des ruptures de propagation (*run-away ruptures*) étaient possibles et que de telles ruptures peuvent être déclenchées à des surpressions minimales. Ce dernier phénomène est par exemple illustré par le cas de failles dans le socle cristallin sous les sites d'injection d'eaux usées dans l'est des États-Unis.

3. Le contexte sismotectonique, l'amplification locale du sol et la présence de failles majeures n'ont pas été suffisamment pris en compte et n'ont pas assez été intégrés dans le plan du projet ; la présence d'une importante zone de faille pénétrée pendant le forage et orientée idéalement pour une réactivation potentielle dans le champ de contraintes contemporain n'a pas été interprétée en mettant l'accent sur la sécurité et le risque.
4. Le réseau de surveillance sismique et les procédures d'analyse étaient totalement inadéquats pour garantir une gouvernance du risque appropriée. Le matériel et les logiciels utilisés pour l'acquisition et le traitement des données ne reflétaient pas, pour ce qui est des aspects critiques, l'état de l'art. En plus, le personnel n'était pas suffisamment formé pour interpréter les données sismiques. Les sites choisis pour le déploiement des stations de surveillance sismique étaient inadaptés en raison de niveaux de bruit très élevés sur de nombreux sites. La combinaison de ces défaillances a mené à des données microsismiques disponibles très insuffisantes pour la gestion des risques et la compréhension des processus. Il est regrettable que même après plusieurs mois-personnes d'efforts distribués par plusieurs groupes de recherche à travers le monde, la qualité des données sismiques (et autres) à disposition reste bien inférieure au niveau requis, avec l'impossibilité de les améliorer substantiellement rétrospectivement. Les capacités de détection et de localisation du système sismique de Pohang étaient inférieures d'un à deux ordres de grandeur à celles de systèmes similaires utilisés dans d'autres SGS (Bâle, Soultz, Ritterhofen, Helsinki, Cooper Basin). Il en résulte un à deux ordres de grandeur d'incertitude de plus concernant la réponse sismique à la stimulation.
5. La configuration mise en place pour le traitement des données sismiques ne permettait pas de fournir les informations requises pour une analyse en temps réel et pour réduire les risques au-delà d'un système classique de base de feux de signalisation. Aucun effort n'a été déployé pour mettre en œuvre des stratégies adaptatives, simples ou sophistiquées, d'évaluation de l'aléa et des risques comme cela a été proposé dans la littérature (par exemple Gischig et Wiemer, 2013 ; Hirschberg et al., 2015 ; Trutnevyte et Wiemer, 2017 ; Mignan et al., 2017). Une analyse appropriée des données de la distribution de la taille des séismes induits et des données de productivité aurait permis de sonner l'alarme (voir section 2.3). Le tremblement de terre d'une magnitude de 3.2 survenu en avril 2017 aurait dû déclencher une analyse approfondie de la sismicité induite liée aux injections passées, avec une analyse détaillée de l'aléa et du risque sismiques.
6. Il semblerait que les exploitants n'aient pas été sensibilisés aux exigences de santé et de sécurité et qu'ils ne disposaient pas d'une culture dans ce domaine pour les questions liées aux risques sismiques ; des signes avertisseurs potentiels ont été ignorés dans le cadre des efforts prédominants visant à créer un réservoir économiquement viable. Les jeux de données collectés n'ont pas été analysés de manière opportune pour étudier les implications en matière de risques. De même, la supervision réglementaire mise en place pour le projet était insuffisante. Le projet n'a pas bénéficié d'une culture de la remise en question et de la réflexion critique. Le tremblement de terre naturel d'une magnitude de 5.5 qui a frappé Gyeongju en septembre 2016 n'a pas non plus entraîné de changement au niveau de la culture du risque.

7. Les experts internationaux impliqués dans les projets et notamment dans le consortium DESTRESS ont manqué de courage et n'ont pas suffisamment exprimé leurs inquiétudes même s'ils ont détecté bon nombre des lacunes de la gestion des risques. Il est probable que les experts étaient trop préoccupés par une implication dans des processus internes à la Corée. Il est possible que les différences culturelles aient joué un rôle, mais il y a aussi eu pas mal de « vœux pieux » et d'intérêts directs à la concrétisation réussie du projet. De plus, d'après ce que l'on sait, les procédures de l'exploitant coréen n'enfreignaient pas les réglementations nationales ce qui explique aussi les réticences des experts internationaux. Cependant, comme indiqué précédemment, il est évident que les procédures appliquées n'étaient pas conformes aux pratiques d'excellence établies dans ce domaine. GES, qui a joué un rôle actif de consultant lors de certaines stimulations, ne s'est pas non plus clairement opposée au dispositif mis en place ; c'est aussi vrai dans une moindre mesure pour le SED. Avec le recul, le SED aurait non seulement dû se retirer du projet Pohang en 2016, mais aurait également dû exprimer plus clairement ses inquiétudes aux collègues coréens, voire aux organismes de réglementation.
8. L'accès aux données collectées pendant le forage et la stimulation était limité pour les groupes extérieurs, y compris les experts collaborant dans le cadre du projet DESTRESS. La situation s'est aggravée après le tremblement de terre d'une magnitude de 5.5 quand le SED a en vain demandé à accéder aux données du réseau sismique local. Les experts étrangers ont également perçu un manque de communication et de transparence concernant les procédures et les prochaines étapes. Cela a empêché un examen plus vaste, des discussions et des retours qui auraient pu mener à une meilleure compréhension et à des avertissements externes.

Nous résumons ces défaillances et leurs implications de la manière suivante :

À notre connaissance, aucune erreur ou aucun oubli isolé(e) ne pourrait expliquer le tremblement de terre d'une magnitude de 5.5. Aucune mesure isolée n'aurait définitivement pu l'empêcher. Comme on l'observe couramment dans de nombreux accidents, l'événement final est le résultat d'une chaîne de multiples décisions et processus. Il est probable, mais aucunement certain, que, sans ces lacunes substantielles au niveau des approches utilisées pour la surveillance sismique et la gestion des risques, la secousse principale d'une magnitude de 5.5 aurait pu être évitée.

3.3 Le tremblement de terre de Pohang était-il un événement extrême ?

Nous aimerions souligner un aspect de l'événement de Pohang qui, selon nous, a été jusqu'à présent peu examiné ou quantifié : il s'agit de se demander si l'activité sismique observée pendant la stimulation suggérait déjà une probabilité inacceptable d'un plus grand événement à venir. Dans le cadre des SGS de Bâle, par exemple, on a montré dans les analyses effectuées a posteriori et dans plusieurs publications (Bachmann et al., 2011 ; Goertz-Allmann et Wiemer, 2012 ; Gischig et Wiemer, 2013 ; Mignan et al. 2015, 2017 ; Broccardo et al., 2017) que, sur la base de l'activité sismique mesurée pendant les trois premiers jours de la stimulation et du plan d'injection des 10 jours à venir, il était probable qu'un événement de magnitude 3 ou plus se produise. C'est pertinent parce que cela suggère que les petits événements initiaux constituent une clé importante pour comprendre l'avenir.

L'enregistrement sismique et le catalogue des tremblements de terre du projet de Pohang sont malheureusement très limités même aujourd'hui, deux ans après l'événement. Des localisations et des magnitudes calculées de manière fiable (échelle M_w) ne sont disponibles que pour environ

100 micro-séismes (Ellsworth et al., 2019)⁶. Nous utilisons ce jeu de données pour une analyse de base préliminaire et une évaluation de l'aléa et du risque : l'analyse de la productivité (souvent appelée indice sismogénique) et la distribution de la taille des micro-séismes induits observés. Ce jeu de données limité montre une valeur b inhabituellement basse, $b = 0.65$ (figure 3), calculée à partir des séismes induits avant le tremblement de terre de magnitude 5.5. À notre connaissance, cette valeur b est la plus faible jamais enregistrée pour un projet SGS (Mignan et al., 2017). Une valeur b faible indique une proportion élevée d'événements plus importants par rapport aux petits. Il est donc beaucoup plus probable qu'un séisme important se produise. Les valeurs b faibles ont également été associées à des contraintes différentielles élevées (par exemple Scholtz, 2015). Dans la figure 4, nous comparons les valeurs a et b converties en magnitudes de l'événement maximum escompté à Pohang (en rouge), aux valeurs obtenues pour d'autres stimulations. Ce graphique montre que, sur la seule base de l'extrapolation de l'activité sismique observée, une hypothèse nulle conservatrice, un événement d'une magnitude de 2.5 à 4.0 constituait la magnitude maximale attendue d'après les observations. Une magnitude supérieure ou égale à $M_w = 5.5$ était, elle, possible avec une probabilité d'environ 3.5 %.

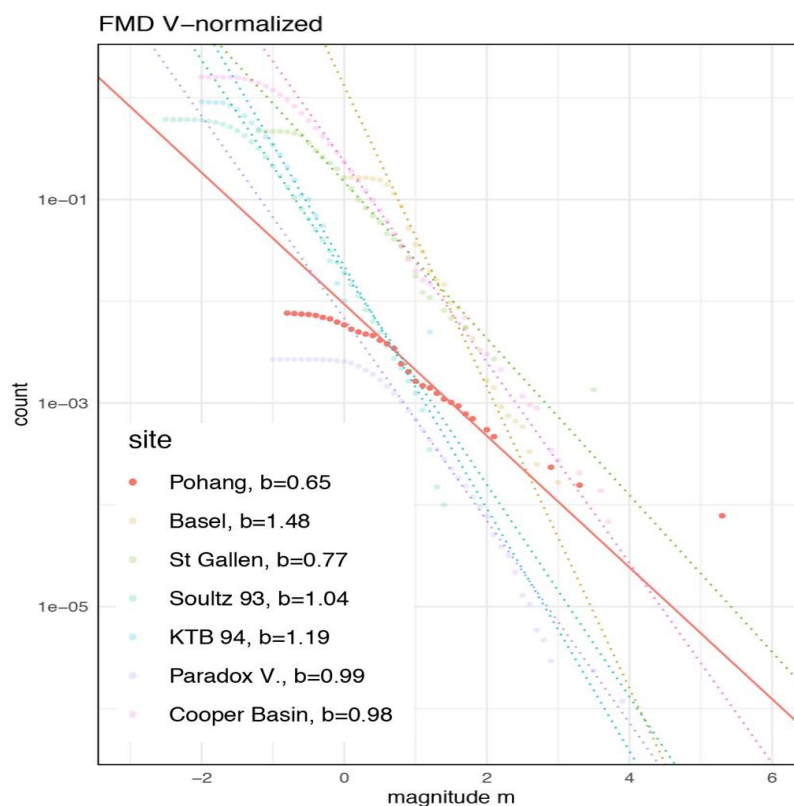


Figure 3 : comparaison du nombre d'événements observés en fonction de la magnitude, avec une normalisation en fonction du volume injecté.

⁶ À titre de comparaison, le jeu de données de Bâle en temps réel d'une seule stimulation contenait plus de 3000 événements bien localisés et avec des magnitudes fiables. Le post-traitement à l'aide d'outils modernes peut maintenant détecter jusqu'à 280 000 événements (Hermann et al., 2019).

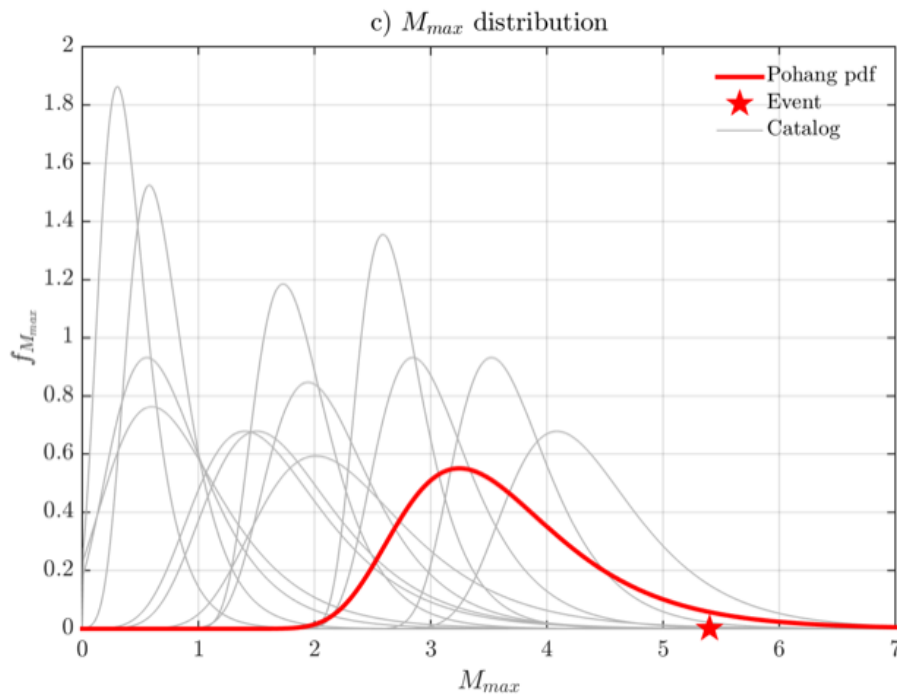


Figure 4 : comparaison du tremblement de terre maximum attendu pour différents projets de SGS reposant sur des valeurs a et b observées (voir l'analyse dans Mignan et al., 2019a). Le projet de Pohang (courbe rouge) présente une valeur escomptée de 3.2, mais une magnitude de 4 ou plus est probable à plus de 30 %.

Nous convertissons cette réponse sismologique observée à Pohang (en termes de valeurs b et a) en risque individuel (par exemple la probabilité qu'une personne décède dans un type de bâtiment donné). Nous utilisons les modèles d'atténuation des ondes sismiques (*GMPE*) pour la région de Haute-Sorne, mais avec les paramètres sismiques de Pohang (figure 5). Le risque moyen en résultant (lignes rouges horizontales) se trouve bien dans la zone ombrée en rouge pour tous les types de construction. On considère donc que le risque représenté par l'activité sismique est trop important pour être acceptable. Notre analyse étaye la conclusion de GES selon laquelle si une régulation telle qu'elle a été spécifiée pour Haute-Sorne avait été en place à Pohang, elle aurait interrompu le projet bien plus tôt. Cela peut donc être vu comme un signe encourageant pour la réduction des risques liés à la sismicité induite : l'activité sismique observée indique assez rapidement si la réponse souterraine est dangereuse, tout du moins dans certains cas.

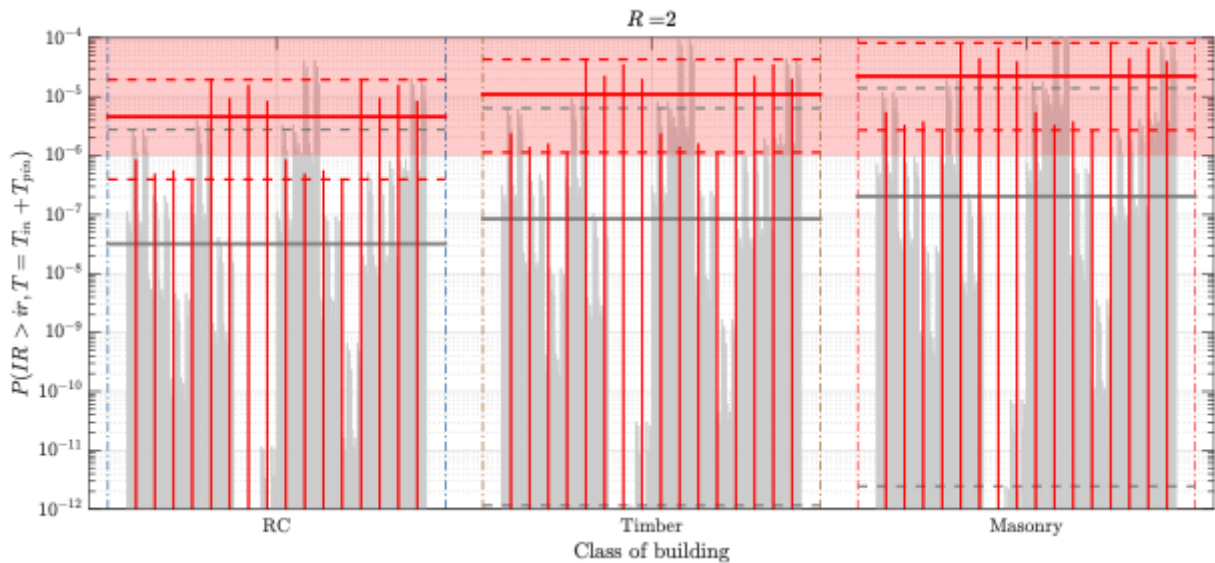


Figure 5 : risque individuel pour trois types de bâtiments (béton armé ; bois et maçonnerie) à une distance supposée de deux kilomètres, calculé en supposant la réponse sismogénique observée à Pohang, mais avec les GMPE et effets de site de Haute-Sorne.

3.4 Autres projets de SGS depuis 2014

Quand on examine la nécessité d'actualiser ou non la partie relative au risque sismique de la déclaration d'impact sur l'environnement du projet de Haute-Sorne remontant à 2014, nous estimons qu'il est également important de considérer d'autres projets pilotes ainsi que les progrès généraux réalisés dans la compréhension et la gestion de la sismicité induite. Cette évaluation plus vaste est conforme aux exigences cantonales demandant à actualiser l'évaluation des risques en cas de découverte de nouvelles constatations significatives. Nous nous concentrons ici sur les projets de SGS et les développements futurs importants et mentionnons donc volontairement aussi des histoires à succès de la technologie des SGS afin de présenter une perspective équilibrée.

3.4.1 Helsinki, Finlande (résumé modifié d'après Kwiatek et al., 2019)

Ce projet pilote commercial est localisé dans la zone métropolitaine de Helsinki, sur le campus urbain de l'université d'Aalto et représente le SGS le plus profond au monde (6.4 km de profondeur). C'est aussi l'un des premiers projets à appliquer un concept de stimulation multi-étapes, similaire à celui prévu pour le projet de Haute-Sorne. Le but de ce projet est de produire une charge de base adaptée pour le réseau de chauffage à distance de la zone du campus, avec compensation des coûts de développement par les économies réalisées au niveau des importations de fioul et de la réduction des émissions de CO₂. Un puits de stimulation d'une profondeur mesurée (MD) de 6.4 km, OTN-3, et un puits d'observation de 3.3 km, OTN-2, ont été forés pour la plupart non seulement avec des méthodes de marteau hydraulique et pneumatique dans le trou, mais également avec des méthodes rotatives à des fins de pilotage. Les deux puits sont entièrement situés dans les socles rocheux cristallins svécofenniens précambriens constitués de granites, de pegmatites, de gneiss et d'amphibolites. Les 1'000 derniers mètres de OTN-3 ont été forés avec une inclinaison à 42° vers le nord-est (NE), laissés sans coffrage et complétés par un assemblage de stimulation à cinq étages.

En juin et juillet 2018, 18'160 m³ d'eau ont été pompés dans la formation rocheuse à des profondeurs verticales vraies (TVD) de 5.7 à 6.1 km sur une période de 49 jours. Cela comprenait des intervalles d'injection fluctuants et des arrêts de quelques jours à différents moments de la stimulation. Le taux d'injection de la stimulation était contrôlé avec des taux de flux variant discrètement entre 400 et 800 litres/min (habituellement juste au-dessus de la limite inférieure technique de

400 litres/s). Il en a résulté des pressions mesurées dans la tête de puits allant de 60 à 90 MPa et inférieures à une limite de sécurité supérieure pour les pompes à 95 MPa. La sismicité induite était surveillée par un réseau sismique à trois niveaux, tous télétrés au site du projet. Les autorités locales ont défini le maximum désiré pour un tremblement de terre provoqué par les activités de stimulation à cette profondeur à une magnitude de 2.0. Cette limite reposait sur la vitesse de pointe du sol (PGV) en surface attendue pour un tel tremblement de terre. Un système de feux de signalisation était en place pour contrôler l'activité sismique. Le séisme observé le plus fort a affiché une magnitude de 1.9, mais plus de 40'000 micro-tremblements de terre ont été enregistrés (figure 6). L'exploitant considère que la stimulation est un succès. Bon nombre des tremblements de terre induits ont été ressentis et perçus comme des détonations ou des grondements, provoquant une certaine inquiétude parmi la population locale. Les valeurs b observées sont comprises entre 1.2 et 1.6. Le deuxième puits et la deuxième stimulation sont prévus. Nous n'avons pas d'information sur l'amélioration de la transmissivité obtenue par la stimulation.

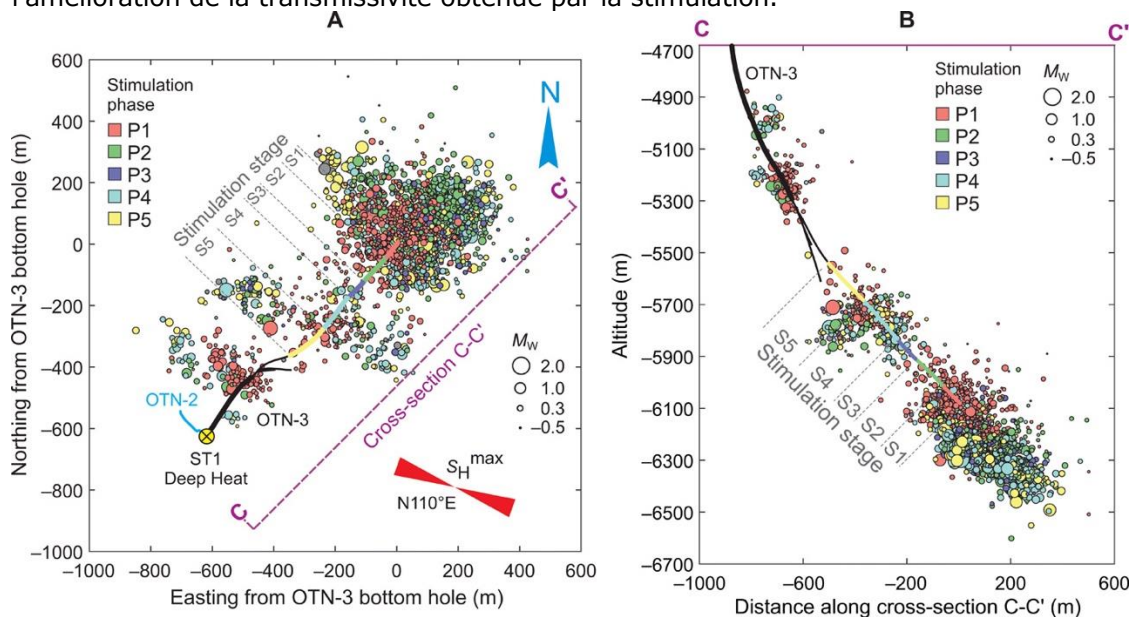


Figure 6 : vue sous la forme de carte (gauche) et de section transversale de la stimulation de Helsinki (source Kwiatek et al., 2019).

Le projet de Helsinki peut être considéré comme celui qui se rapproche le plus du projet de Haute-Sorne. Il a (jusqu'à présent) prouvé qu'un SGS pouvait être déployé avec succès dans une zone urbaine. Le projet a démontré de manière spécifique l'efficacité de l'isolation zonale, la capacité à surveiller des micro-tremblements de terre très petits à l'aide de chaînes de sismomètres de forage, l'efficacité de la surveillance en temps réel et la capacité à contrôler l'activité sismique pour qu'elle reste inférieure au seuil convenu au préalable.

3.4.2 Rittershoffen, France

La co-entreprise ECOGI (groupe Électricité de Strasbourg, Roquette Frères et Caisse des dépôts et consignation) est responsable du développement et de l'exploitation de l'installation géothermique stimulée de Rittershoffen située à 6 km à l'est de Soultz-sous-Forêts, dans le nord de l'Alsace, en France. Ce réservoir SGS est l'un des rares actuellement en développement en Europe. Il est conçu pour produire 24 MWth (170 °C, 70 l/s).

Le premier puits du doublet (GRT1) a été achevé à la fin de l'année 2012 et a atteint, à une profondeur de 2'580 m, le sous-sol fracturé cristallin qui constitue, avec le grès bigarré (*Buntsandstein*) qui le recouvre, la formation réservoir. Une stratégie de développement du réservoir a été définie et consistait d'abord à améliorer les connexions entre GRT1 et le réservoir fracturé. Ces opérations ont été réalisées en deux temps, à savoir en avril puis en juin 2013. Les opérations de stimulation ont été couronnées de succès, fournissant les améliorations attendues des propriétés hydrauliques

du réservoir. Une sismicité induite a été observée, mais cette dernière ne dépassait pas une magnitude de 1.6. Le deuxième puits, GRT-2, a été foré entre mars et août 2014. Aucune stimulation n'a été nécessaire ; l'activité sismique maximale observée pendant l'exploitation était d'une magnitude de 1.3. L'installation est en service depuis 2016 et produit une puissance thermique d'environ 25 MWth.

3.4.3 FORGE, États-Unis

Le site géothermique de FORGE et le laboratoire souterrain dans l'Utah (États-Unis) sont financés par le Département américain de l'énergie à hauteur de plus de 150 millions de dollars. La mission de FORGE consiste à permettre une recherche de pointe, à tester technologie et forage et à permettre aux scientifiques d'identifier une passerelle commerciale reproductible vers les SGS. FORGE se situe près de la ville de Milford dans le comté de Beaver (figure 7), Utah, sur le versant ouest des Mineral Mountains. Les études commenceront en 2020 puisque l'installation est en cours de construction et se poursuivront jusqu'en 2024. Des phases de financement compétitif seront ouvertes à un appel à candidatures public pour attirer des programmes d'exception de développement et de recherche innovants en science et ingénierie géothermique. Les objectifs à court terme visent à perfectionner le forage, la stimulation, la production d'injections et les technologies d'imagerie de subsurface requises pour établir et maintenir un flux de fluide continu et un transfert d'énergie constant depuis le réservoir d'un SGS.

FORGE pourrait potentiellement éclairer sur des stratégies de stimulation de SGS et de gestion des risques à succès utilisables pour le projet de Haute-Sorne.

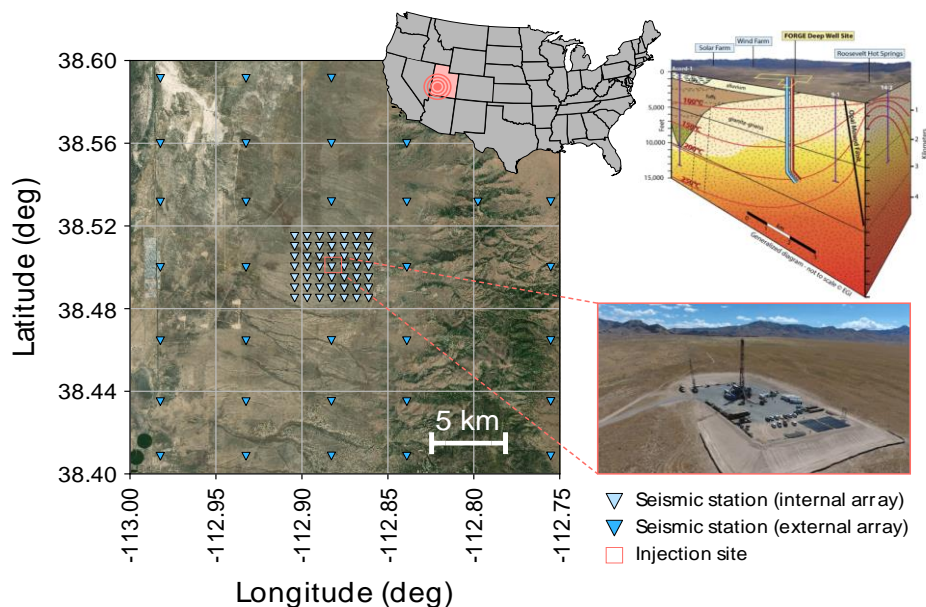


Figure 7 : emplacement du site géothermique de FORGE en Utah et agencement général du projet (source : K. Pankow, université de l'Utah).

3.5 Évaluation des rapports de GES sur Pohang

Nous avons trouvé les rapports présentés par GES très détaillés dans leur ensemble, en grande partie bien équilibrés et généralement en accord avec les résultats d'autres groupes de recherche. GES a engagé des efforts notoires pour comprendre l'événement de Pohang et ses implications potentielles pour Haute-Sorne. Aucun autre opérateur géothermique dans le monde n'a passé en revue de manière aussi complète ce qui s'est passé à Pohang que GES. Certaines différences d'interprétation existent entre GES, le rapport de l'OCRA et la littérature récente, et les nombreuses études en cours vont certainement révéler d'autres détails. Toutefois, ceux-ci ne sont pas essentiels à nos yeux pour l'évaluation des implications de l'accident de Pohang pour le projet de Haute-Sorne.

GES présente dans notre évaluation des arguments convaincants en affirmant que l'événement de Pohang n'aurait pas eu lieu si les différents niveaux de sécurité prévus dans le projet de Haute-Sorne avaient été mis en œuvre. Cette affirmation ne peut jamais être prouvée avec une certitude absolue, mais il est clair que le plan proposé par GES et les exigences supplémentaires imposées par le canton auraient effectivement empêché toutes les déficiences listées dans les sections 3.2 et 3.3. La plupart des leçons tirées de l'événement de Pohang ont déjà été prises en compte dans l'évaluation de risque de GES et par la stratégie de projet proposée au canton. Nous donnons ci-après des commentaires spécifiques aux conclusions principales :

Chapitre 2 : Failles actives (page 5) : nous sommes d'accord avec GES sur le fait que des recherches de failles actives ont été effectuées sans aboutir à proximité de Haute-Sorne. Toutefois, comme nous l'indiquons dans notre recommandation 6 du chapitre 4, une preuve supplémentaire de l'absence de failles importantes à proximité de Haute-Sorne pourrait être obtenue par imagerie sismique en 3D.

Chapitres 2, 4 et 5 : Sismicité (pages 6, 15 et 21) : l'étude de risque de Haute-Sorne a effectivement pris en compte la sismicité historique et instrumentale, et nous n'avons connaissance d'aucun tremblement de terre important à proximité de Haute-Sorne. Cependant, le Jura et la région de Haute-Sorne sont actifs sismiquement, et pour le SED, de forts tremblements de terre de magnitude supérieure à 6 sont possibles en principe partout dans la région alpine, dont fait géologiquement partie le Jura. La période de retour de tels séismes est très longue dans de nombreuses régions, c'est pourquoi ils n'apparaissent pas toujours dans les relations historiques ou par des enregistrements instrumentaux. Nous convenons également qu'un séisme de magnitude 5.5 se déclenchant naturellement dans un rayon de 30 à 40 km de Haute-Sorne demanderait clairement une réévaluation du risque sismique.

Chapitres 2 et 3 : État des contraintes (pages 7 et 14) : GES considère le champ de contraintes dans la région de Haute-Sorne comme un paramètre critique pour la réalisation du réservoir et pour la sécurité sismique ; la société constate également qu'il faut caractériser le champ de contraintes sur le terrain une fois les forages exploratoires terminés, et tenir compte de ces informations pour mettre à jour l'étude de risque. Comme indiqué dans notre recommandation 3, nous considérons que cette approche progressive de l'évaluation des risques, avec un palier spécifique après la phase exploratoire, est une composante essentielle de garantie d'un projet sûr.

Chapitre 3 : Sélection du site et concept (page 9) : Nous sommes d'accord sur le fait que le projet de stimulation en plusieurs étapes, à bonne distance de zones importantes de fracture, tel que le propose GES, est différent de celui mis en œuvre à Pohang et offre en principe des avantages conceptuels en ce qui concerne la sécurité sismique et la gestion des risques. Le concept GES évitant sciemment les zones de failles importantes, il est tout à fait essentiel de garantir autant que possible qu'aucune faille de ce type ne se trouve à proximité (voir nos recommandations 6 et 7). Il est vrai que des failles et zones faillées de toutes dimensions existent : le concept de GES consiste à stimuler des zones fracturées « mineures », mais d'éviter les zones faillées importantes, mais ces termes n'ont jamais été, à notre connaissance, clairement définis ou quantifiés. La définition de la sémantique des zones faillées en fonction de leur taille et de leur expression géologique ainsi que de leur potentiel sismique serait clairement bienvenue pour les futures actualisations de l'étude de risque de Haute-Sorne.

Chapitre 3 : Analyse pétrographique des zones faillées (pages 10, 11) : Notre évaluation ne permet pas de dire aujourd’hui (même si cela ne concerne pas Haute-Sorne) dans quelle mesure les opérateurs de Pohang connaissaient la faille qu’ils ont traversé lors du forage, dans quelle mesure ceci a été correctement interprété et considéré comme un risque de sécurité, ou comme un signe positif de création de perméabilité. Pour Haute-Sorne, il est seulement important que les informations collectées pendant le forage soient elles aussi prises en compte pendant l’exploitation et dans l’actualisation de l’étude de risque sismique, actions que GES a prévues.

Chapitre 4 : Sismicité à proximité du site SGS avant la stimulation (page 15) : Une exigence majeure pour Haute-Sorne, imposée par le régulateur, est la mise en place d’une surveillance sismique six mois avant la stimulation, de telle sorte que la caractérisation de l’activité sismique de fond puisse être améliorée. Au-delà, il est bien sûr important de prendre également en compte les éventuels changements régionaux de l’activité sismique et leurs liens potentiels avec les périodes de risque accru, mais selon nous, la base empirique et scientifique pour comprendre de tels changements est au mieux très ténue, d’autant plus s’il faut essayer de la relier au risque potentiel d’une stimulation. L’avis des experts est la seule approche viable pour prendre en compte ces informations.

Chapitre 4 : Sismicité et pertes de boue (page 16) : Nous confirmons que le forage doit être suivi dans tous les détails pour détecter la sismicité liée à cette activité, et c’est ce qui est prévu à Haute-Sorne. Nous tenons compte également du fait que la sismicité déclenchée par des pertes de boue est importante pour l’évaluation des risques, mais constatons que c’est une situation relativement fréquente sur certains sites (p. ex. Islande) sans entraîner de risque majeur. À Bâle, la cimentation a également entraîné une sismicité, mais elle n’a pas encore été étudiée pour son impact sur la gestion des risques. Avec le déploiement de réseaux très sensibles, cette sismicité induite par le forage sera encore plus fréquemment observée, et la prise en compte de ces informations dans les évaluations de risque n’est pas anodine.

Chapitre 4 : Localisation de la sismicité (pages 17 et 18) : Nous sommes d’accord avec GES sur le fait que des localisations précises en temps quasi réel sont une exigence essentielle, et qu’elles sont prévues. Il existe des différences entre le rapport ORAC et l’étude GES concernant la localisation du séisme de Pohang, ce qui s’explique par les divergences entre les données et les méthodologies utilisées, mais ces différences ne jouent pas de rôle dans l’interprétation globale et les implications pour Haute-Sorne. Nous considérons la localisation ORAC telle qu’elle a été publiée par Lee et al. (2019) et Ellsworth et al. (2019) comme la meilleure disponible aujourd’hui. Nos conseils de suivi sismique sont résumés dans la recommandation 4.

Chapitre 4 : Valeurs b (page 19) : La valeur b est un paramètre essentiel comme nous l’indiquons dans la section 3.3. Il est assuré que le projet de Haute-Sorne le prendra en considération.

Chapitre 4 : Modèle de vitesses (page 19) : Un modèle de vitesses adapté est essentiel pour comprendre la sismicité en cours. Pour Haute-Sorne, les principes généraux sont certes établis, mais un planning qui détaille clairement la stratégie d’actualisation à l’arrivée de nouvelles données doit être développé par GES (voir recommandation 4).

Chapitre 5 : Analyse hydrogéologique des perturbations de pression du fluide (pages 21-25) : Nous considérons la discussion sur la modélisation des mécanismes de déclenchement comme importante, et elle est toujours en cours. Comme indiqué en section 3.1, il n’y aura jamais un modèle unique et accepté par tous expliquant l’occurrence de l’événement M5.5. Ces incertitudes dans la compréhension de la sismicité induite, en raison des lacunes de données sur l’emplacement des failles et sur leur état de contrainte, demandent des approches probabilistes qui tiennent compte explicitement de ces incertitudes (voir nos recommandations 1 et 2) et exigent également que la

sécurité soit considérée comme processus construit sur un certain nombre de couches ou de barrières (voir recommandation 5). Ces incertitudes demandent donc finalement une approche de l'évaluation des risques par étape, adaptative et pilotée par les données (recommandation 3).

Chapitre 6 : Secousse principale (pages 26-27) : Le plan de rupture de la secousse principale, et sa localisation par rapport aux forages sont bien compris aujourd'hui, et l'hypothèse de retard de déclenchement de GES est plausible, basée sur les modèles existants (bien qu'il y ait encore des divergences sur les mécanismes réels). Il est également clair que la secousse principale a libéré des contraintes tectoniques accumulées et va bien au-delà des relations d'échelle entre le volume injecté ou la dimension de la zone affectée par la sismicité induite d'une part et l'ampleur de l'événement (la limite de « McGarr ») de l'autre. Dans la revue de GES, nous n'avons pas trouvé de discussion au sujet de la prise en compte adéquate ou non de la probabilité de ruptures de propagation dans l'étude de risque actuelle de Haute-Sorne, lorsqu'on considère notamment d'autres études telles que celle de van der Elst et al. (2016). Une branche de l'arbre logique du modèle de risque plafonne la magnitude maximale (limite de « McGarr », voir notre analyse dans la section 4.2.3), un concept qui se répète dans le rapport GES en section 3.5, page 44). Selon nous, cette branche devrait avoir une pondération moindre dans une réévaluation du risque sismique, ou bien être totalement éliminée (voir notre recommandation 3).

Nous considérons que GES présente une analyse équilibrée, détaillée et très compétente du projet de Pohang. Cette analyse est utile au débat scientifique et à la compréhension sur les erreurs de Pohang, et nous encourageons GES à publier ou rendre disponible cette analyse dans la mesure du possible. Un bénéfice collatéral important de l'analyse de GES est de lui avoir permis d'acquérir connaissances, expérience et compétence, et de réfléchir sur le concept de Haute-Sorne en envisageant des améliorations. Nous convenons avec GES que le projet et la supervision de Haute-Sorne sont plus avancés et plus appropriés, avec une forte attention portée à la sécurité. Nous ne sommes pas d'accord sur la conclusion de GES, assurant qu'aucun changement n'est nécessaire dans le projet de Haute-Sorne, et nous résumons nos recommandations en section 4.

4. Évaluation des implications de Pohang pour Haute-Sorne, et recommandations du SED

4.1 Introduction

L'événement de Pohang a souligné une fois de plus les risques sismiques qu'il faut envisager lors de l'exploitation de ressources souterraines. Ces défis ne sont pas limités aux SGS, ils existent également dans l'industrie minière, la production conventionnelle et non-conventionnelle d'hydrocarbures, le creusement de tunnels, la mise en eau de barrages hydroélectriques, les systèmes géothermiques de type hydrothermal, etc. (figure 8), en raison de toute une gamme de mécanismes physiques. Il n'existe actuellement aucune approche pour ramener à zéro les risques de sismicité induite dans les projets SGS, sauf évidemment renoncer à réaliser un projet. La question fondamentale à la lumière du séisme de Pohang est donc : est-ce que les risques de sismicité induite peuvent être évalués et quantifiés de manière fiable, est-ce que l'atténuation des risques et des couches de sécurité peuvent être conçues pour ramener les risques à un niveau acceptable ?⁷

Nous résumons ci-après les recommandations du SED pour le projet de Haute-Sorne à la lumière du tremblement de terre de Pohang et d'autres évolutions récentes dans le domaine du risque de sismicité induite que nous avons commentées en section 3.

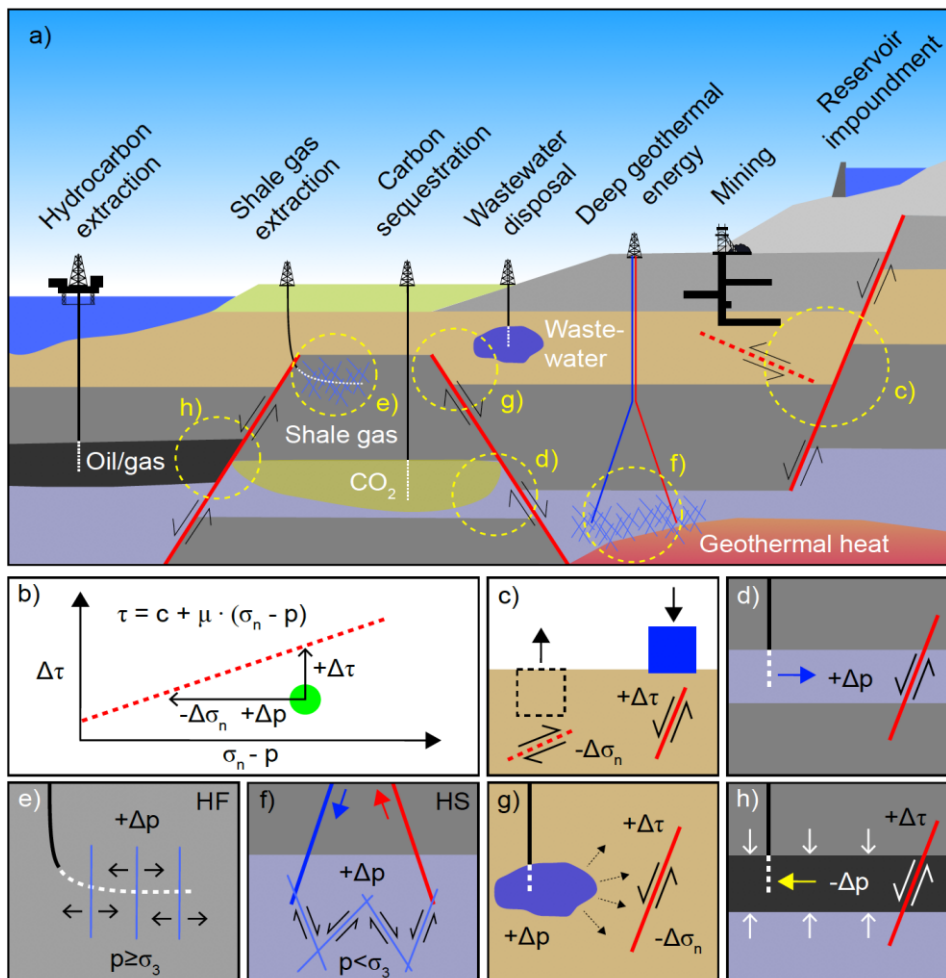


Figure 8 : Activités industrielles et mécanismes physiques induisant une sismicité (de Zbinden, 2019 ; modifié d'après Grigoli et al., 2017) : extraction d'hydrocarbures, conventionnelle (pétrole et gaz) et non-conventionnelle (p. ex. gaz de schiste), séquestration de carbone, dépôts d'eau usée, extraction géothermique profonde.

⁷Différents niveaux d'acceptation existent : l'acceptation réglementaire, mais aussi l'acceptation publique. Notre rapport se penche principalement sur les niveaux d'acceptation réglementaires tels qu'ils sont définis dans l'évaluation d'impact environnemental présentée par GES.

4.2 Évaluation et recommandations

4.2.1 Validité de l'évaluation globale de risque et du cadre d'acceptation pour Haute-Sorne

La première question primordiale que nous traitons ici est de savoir si le cadre général choisi par le canton pour les parties relatives au risque sismique du permis de Haute-Sorne a été invalidé par l'occurrence inattendue du séisme de Pohang. La procédure de permis se base sur l'analyse probabiliste de l'aléa sismique (PSHA) et l'analyse probabiliste des risques sismiques (PSRA), comparées aux critères d'acceptation en termes de risque individuel et de besoins d'assurance, définis par le canton.

Dans notre évaluation, le tremblement de terre de Pohang, tout en étant un rappel grave des risques entraînés par la sismicité induite, n'est ni inexplicable, ni une surprise totale. Des tremblements de terre induits d'amplitude similaire ou supérieure se sont produits dans d'autres contextes géotechniques et le cadre physique, hydrologique, géomécanique et sismotectonique pour comprendre les ruptures de propagation existe. Dans son évaluation, GES adopte le concept d'analyse probabiliste de l'aléa et du risque sismiques (PSHA/PSRA) avec une petite chance de ruptures de propagation incluse dans la partie probabiliste de l'étude de risque sismique de Haute-Sorne, qui contribue aux calculs de risque individuel et de risques d'assurance. Un tel événement a été également pris en compte dans la stratégie de suivi et dans le plan d'atténuation des risques. PSHA/PSRA est un cadre largement utilisé, souvent appliqué à l'aléa sismique et à l'évaluation des risques pour les tremblements de terre naturels ainsi que d'autres dangers. Il fournit une approche d'analyse structurée bien établie pour les analyses quantitatives et intègre les incertitudes d'une manière formelle par le biais d'un arbre logique. De plus en plus, on l'applique également dans l'évaluation de l'aléa sismique induit et du risque associé (p. ex. Bommer et al., 2017). La force de PSHA/PSRA est que :

- Toutes les connaissances existantes sont intégrées dans une approche transparente et reproductible dans l'évaluation.
- Les incertitudes sont exprimées et prises en compte de manière formelle.
- Les différentes opinions d'experts peuvent être prises en compte de telle sorte que l'étude globale reflète « le centre, le corps et la plage [*center, body and range*] de la communauté technique informée »
- Le PSHA/PSRA reflète l'état de l'art. Les avancées dans la compréhension peuvent être immédiatement intégrées de manière pragmatique.

Le message essentiel de Lee et al. (2019) à partir des leçons tirées de Pohang est le suivant :

« Les pratiques d'excellence impliquent une procédure formelle d'évaluation des risques, alimentée par les autorités compétentes, et une mise à jour de cette évaluation au fur et à mesure de l'évolution des connaissances de l'aléa potentiel »

Nous considérons le projet de Haute-Sorne, son évaluation des risques a priori et son approche pour réévaluer les risques comme conforme à ces recommandations. De nombreuses leçons tirées de Pohang ont été en fait anticipées dans l'étude de risque de Haute-Sorne par GES : le besoin de quantifier les incertitudes et de tenir compte des opinions alternatives, le besoin d'effectuer une évaluation des risques qui considère l'amplification des sites et les bâtiments concernés de manière quantitative ainsi que le besoin d'actualiser les études de risque au fur et à mesure que de nouvelles données arrivent, et aussi en temps quasi réel. En ce sens, nous considérons que l'étude de risque

de Haute-Sorne soumise par GES est toujours encore conforme à l'état de l'art, et nous nous attendons à ce que d'autres projets suivent à l'avenir une approche similaire, probabiliste et basée sur les risques, conforme aux recommandations de Lee et al. (2019).

De la même manière, les critères d'acceptation définis par le canton du Jura pour le projet de Haute-Sorne en termes de risque individuel et de risques d'assurance, représentent d'après nous la bonne métrique pour prendre des décisions. L'acceptation est basée sur une estimation probabiliste du risque individuel et des valeurs couvertes par les assurances. Il a été évoqué que la raison principale de GES pour le choix de l'emplacement de Haute-Sorne serait la faible densité de population comparée à Bâle, ce qui pourrait être interprété comme « injuste » pour les résidents de Haute-Sorne. Cette affirmation est trompeuse selon nous : les critères d'acceptation appliqués par le canton sont *le risque individuel pour un cas de probabilité 1 sur 1'000'000*, ce qui représente la même métrique que pour d'autres dangers technologiques ou naturels. Par essence, les individus sont égaux en droits, et ont le même droit de protection. C'est pourquoi il n'y a pas de différence d'acceptation pour un projet situé à proximité d'une maison isolée ou pour un projet situé près d'une grande ville. Il y a cependant une différence pour l'opérateur avec le second critère d'acceptation utilisé : la nécessité de prendre une assurance pour un événement de probabilité 1 sur 10'000. Le coût d'une telle assurance est notoirement plus élevé dans une zone fortement peuplée, et dans une zone avec plus de bâtiments vulnérables sur un sol meuble. Toutefois, ce n'est pas le niveau de risque individuel qui est concerné.

Recommandation 1 : le cadre général d'évaluation des risques, d'atténuation des risques et de critères d'acceptation défini par le canton n'a pas été invalidé par le tremblement de terre de Pohang. Les principes sous-jacents ont été en réalité renforcés par les leçons tirées du projet de Pohang, et ils sont désormais mieux acceptés par la communauté technique informée. Nous recommandons au canton de continuer à utiliser ce cadre comme base d'autorisation.

4.2.2 Le risque de sismicité induite peut-il être évalué et contrôlé ?

La sismicité induite est une possibilité inhérente à chaque projet de géothermie profonde, et elle est certaine pour les projets SGS. Pour le concept SGS, de petits événements sismiques (souvent appelés microsismicité) sont nécessaires pour créer et entretenir un réservoir pour la circulation de l'eau dans le socle rocheux. La sismicité induite permet en outre de suivre l'état et l'évolution du réservoir. La microsismicité étant nécessaire pour créer un SGS, tout le concept dépend donc essentiellement de la capacité à contrôler cette sismicité induite sous un niveau acceptable, et donc d'équilibrer les revenus économiques et la sécurité (p. ex. Mignan et al., 2019a ; 2019b).

L'accident de Pohang pose la question importante du niveau de gestion et de contrôle de la sismicité induite dans le cadre d'un SGS. Après les échecs des projets de Bâle, Saint-Gall et maintenant Pohang en raison de la sismicité induite, le degré de prévisibilité de la réponse du sous-sol aux activités humaines est clairement limité, et doit être étudié de près. Existe-t-il un lien de cause à effet entre action et réaction, ou bien les tremblements de terre induits sont-ils aussi imprévisibles et incontrôlables que le sont les séismes naturels ? Selon le SED, la gestion et le contrôle de la sismicité induite est possible, mais avec différents degrés d'incertitude suivant les phases du projet.

Le phénomène de sismicité induite n'est pas nouveau, n'est pas limité à la technologie SGS, ni à l'injection dans le socle rocheux (figure 8). La gestion de la sismicité induite par l'industrie minière est un sujet abordé depuis plus de 100 ans dans certaines régions. La mise en eau de réservoirs a vraisemblablement entraîné des séismes de magnitude 3 à 4 en Suisse dans les années 1960 et 1970. La sismicité induite par la réinjection d'eaux usées observée dans l'est des États-Unis, mais

aussi au Canada et en Chine, peut dépasser une magnitude de 5.0. Souvent, les bénéfices économiques surpassent les risques, et les projets s'adaptent et continuent. Dans d'autres cas, l'exploitation est arrêtée. Le projet de Groningen (Pays-Bas) en est un exemple récent : le gouvernement néerlandais a décidé de stopper l'extraction de gaz naturel à partir du début 2022 en raison du risque de sismicité induite. Des volumes de gaz d'une valeur de plusieurs milliards d'euros ne seront pas produits, car aucune approche n'a pu être identifiée pour réduire suffisamment le risque.

L'évaluation et la gestion des risques de sismicité induite dans le contexte d'un SGS s'appuient essentiellement sur deux principes fondamentaux :

- **La réponse sismique du sous-sol est très variable, mais en premier ordre il s'agit d'une constante spécifique du site.** A priori, cette constante n'est pas connue, mais elle peut être estimée approximativement tout au début de l'injection, ou par le biais d'une injection d'essai. Une fois ce facteur approximativement connu, il peut être utilisé pour quantifier et limiter le risque sismique, mais est susceptible d'évoluer avec le temps.
- **La réponse sismique du sous-sol est proportionnelle en premier ordre au volume de roche sérieusement perturbé.** Cette affirmation est presque triviale, mais elle est importante : plus le nombre de failles exposées à une augmentation de contrainte est important, plus il est probable que certaines soient activées et que le taux de sismicité et la magnitude maximale attendue soient élevés. Le volume affecté pouvant être calculé, et étant une conséquence directe des volumes et de la stratégie d'injection, l'atténuation des risques est faisable en principe : de minuscules volumes d'injection (p. ex. 1 m³) sont pratiquement toujours surs, mais des volumes plus importants sont problématiques si la réponse sismogène est élevée.

L'injection de Bâle est un exemple pratiquement parfait de ces deux principes : sur un graphe du nombre cumulé d'événements en fonction du temps, normalisé par le volume (figure 9 ; Broccardo et al., 2017), la distribution est linéaire dans la limite du caractère aléatoire (d'un processus de Poisson stationnaire). Un tel comportement est prévisible, et donc contrôlable à un certain point, et des projets SGS actuellement fructueux à Soultz, Ritterhofen, ou Helsinki ont appliqué efficacement ces principes. Par contre, le projet de Pohang ne les avait pas pris en compte (voir section 3.3).

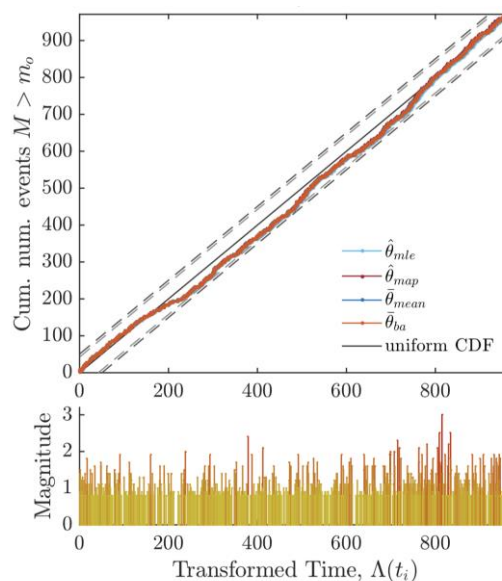


Figure 9 : nombre cumulé d'événements observé pendant l'injection de Bâle en fonction du temps, normalisé par volume (c.-à-d. temps transformé) La droite indique que la réponse sismique du sous-sol à l'injection est constante.

Ces deux principes de base sont au cœur de l'atténuation du risque par des systèmes de feux de signalisation avancés. Des modèles plus complexes de prévision d'activité sismique couplent les données sismiques avec des processus hydromécaniques, et devraient être de plus en plus utilisés. Cependant, même en appliquant uniquement ces deux principes, l'évaluation et l'atténuation des risques sont possibles.

Le projet SGS de Bâle en 2006 peut être considéré comme un échec du contrôle de la sismicité induite, car il a été stoppé après un tremblement de terre largement ressenti ayant causé également des dégâts. Un autre point de vue consiste toutefois à le considérer comme un succès de gestion de la sismicité induite : le suivi sismique et le système de feux de signalisation mis en place ont permis un démarrage assez rapide des actions d'atténuation pour prévenir des blessures ou dégâts potentiels importants. Une étude de risque consécutive a montré que le site de Bâle, en raison du concept de stimulation massive, entraînait des risques sismiques non acceptables, et le projet a été arrêté. Il est plausible que le maintien de l'injection aurait conduit à un tremblement de terre similaire à celui de Pohang ; par ailleurs, l'arrêt de l'injection le troisième ou le quatrième jour au lieu du sixième aurait probablement permis d'éviter l'événement de magnitude 3.4 à Bâle. Le cas de la sismicité induite par le système hydrothermal de Saint-Gall est plus complexe : le feu de signalisation en place est passé à l'orange, puis au rouge, et les opérateurs ont été avertis de stopper l'injection, mais cela n'a pas été fait, car la lutte contre l'irruption de gaz était la priorité absolue. Une leçon tirée de Saint-Gall est donc que l'atténuation de sismicité et l'irruption de gaz doivent être considérées comme un processus couplé, ce qui est mis en œuvre pour Haute-Sorne.

Cependant, il est également clair que la gestion et l'atténuation des risques sismiques présentent des limitations, et Pohang a démontré à nouveau celles-ci : la réponse du sous-sol peut varier dans le temps, et au fur et à mesure que la pression se diffuse, les événements les plus importants peuvent également se produire tôt durant la séquence, ou très tard, d'autres processus physiques peuvent dans certains cas atteindre une importance critique, etc. Des surprises peuvent donc survenir ; cependant, nous pensons que l'évaluation et l'atténuation du risque lié à la sismicité induite sont faisables et efficaces pour réduire les risques d'ensemble du projet. L'élément essentiel pour une atténuation réussie des risques est la conscience de ce qui se passe à un moment donné. L'échec de Pohang dans l'application de l'atténuation des risques est d'après nous plus un échec de la conscience de la situation pendant le projet (section 32), qu'un échec des principes sur lesquels reposent les stratégies d'atténuation des risques.

Recommandation 2 : La réponse sismique du sous-sol à l'injection peut être en principe comprise et prévue grâce aux connaissances empiriques, à l'assimilation des données et à la modélisation numérique. C'est pourquoi nous considérons l'évaluation des risques et les mesures de contrôle de sismicité comme des stratégies envisageables pour l'attribution du permis et pour la réduction des risques en temps réel, mais elles doivent être correctement effectuées et tenir compte des limitations et incertitudes.

4.2.3 Nécessité d'actualiser les choix spécifiques effectués lors de l'évaluation des risques

Le calcul probabiliste de l'aléa et du risque sismiques, aussi bien pour les tremblements de terre naturels que pour la sismicité induite, dépend des données empiriques disponibles, des modèles numériques, et jusqu'à un certain point des choix des experts (la même chose est vraie pour d'autres risques). L'état de l'art (et de la pratique) évolue avec le temps, l'arrivée de nouvelles données et de nouveaux modèles, ainsi qu'avec la progression des connaissances des experts. Aujourd'hui, une nouvelle évaluation de l'aléa et des risques pour Haute-Sorne donnerait des résultats différents de ceux d'il y a cinq ans, comme toute autre étude d'évaluation des risques répétée cinq ans plus tard. C'est particulièrement vrai dans le domaine du risque de sismicité induite, un domaine relativement

nouveau qui évolue très vite. L'actualisation de l'étude de risque lorsqu'une évolution *significative* de l'état de l'art le demande est une exigence du canton envers GES (n° 55), mais il est difficile de juger du terme significatif, et il n'est pas clairement défini. Il n'est pas non plus très pratique ni juste pour un opérateur que les bases d'autorisation du projet changent chaque fois qu'une nouvelle publication paraît.

Selon nous, il existe quelques domaines dans lesquels l'étude de risque de Haute-Sorne peut et doit être actualisée, sur la base des développements récents et des nouvelles données :

- Les modèles de prévision des mouvements du sol utilisés (Edwards et al., 2016) doivent être équivalents à ceux du modèle d'aléa sismique national, publié à la fin 2015.
- La variabilité de la réponse du sous-sol à l'injection de fluide, aussi bien au travers des valeurs *a* que des valeurs *b*, doit être mieux prise en compte dans l'étude de risque, sur la base des études de Mignan et al. (2017 ; 2019 a) et Broccardo et al. (2017). Les outils de calcul pour prendre en compte ces incertitudes de manière explicite existent aujourd'hui, et ont été utilisés entre autres pour les projets de Bedretto et de Geldinganes (Islande).
- Le modèle de risques de Haute-Sorne contient une branche du modèle où la magnitude maximale possible est limitée (plafonnée) en fonction du volume de fluide injecté ou de la surface sismiquement active. Ce plafonnement est toujours un scénario plausible dans certaines circonstances lorsque la propagation de rupture est impossible en raison de l'absence de failles matures ou de l'état des contraintes (p. ex. fracturation dans des sédiments meubles). Pourtant, il existe aujourd'hui des preuves convaincantes que ce que l'on appelle la « limite de McGarr » est dans la plupart des cas un effet statistique et non une limite fixe (van der Elst et al., 2016). Nous prévoyons que lors d'une réévaluation de l'aléa probabiliste de Haute-Sorne, la pondération de la branche « plafonnée » devrait être réduite, ou que cette branche devrait être supprimée. Ceci apporterait un poids supplémentaire dans l'analyse des risques à la probabilité de ruptures de propagation, en soulignant l'importance de scénarios de type Pohang.
- Il existe aujourd'hui des modèles toujours meilleurs, disponibles ou en cours d'élaboration, permettant de prévoir la réponse du sous-sol en fonction d'une certaine stratégie d'injection, et de meilleures approches pour quantifier l'effet de limitation des risques des systèmes de feu de signalisation classiques ou adaptatifs. Ils peuvent être appliqués dans l'évaluation des risques.
- Des jeux de données toujours plus précis de l'amplification des sols, du bâti suisse et de sa vulnérabilité sont mis à disposition dans le cadre des modèles nationaux de risque sismique (2017 – 2022). Ces bases de données, nouvelles ou améliorées, peuvent être disponibles pour une meilleure évaluation des risques.

La direction que prendrait l'évaluation des risques, si ces changements étaient appliqués dans une nouvelle étude d'aléa et de risque pour Haute-Sorne, n'est pas évidente, et la mise en œuvre de ces modifications demande des efforts conséquents. Il serait toujours possible pour un opérateur comme GES de réduire le risque à des niveaux acceptables en adaptant un seuil plus prudent pour les feux de signalisation, ou en adoptant un seuil à adaptation dynamique. Cette approche a été décrite par Mignan et al. (2017).

Certes, il est nécessaire d'actualiser l'étude de risque de Haute-Sorne en raison des avancées mentionnées plus haut de l'état de l'art et des nouvelles données depuis cinq ans, nous suggérons toutefois de ne pas l'effectuer aujourd'hui, mais lors de l'étape exploratoire du projet de Haute-Sorne proposé par GES.

Une leçon essentielle tirée d'études de risque passées, et également de Pohang, est qu'une évaluation a priori du risque sismique est possible, mais que les résultats présentent de très grandes incertitudes. L'étude de risque la plus récente effectuée par le SED pour le projet de Geldinganes en Islande en est une bonne figure. Pour ce projet, le risque a priori a été jugé acceptable, avec un risque individuel bien inférieur à 10^{-7} par an. Toutefois, la caractéristique la plus remarquable de l'évaluation des risques est la très large plage d'incertitude couvrant cinq ordres de magnitude. Cet état d'incertitude reflète d'une part le fait que la réponse du sous-sol à l'injection ne peut pas être modélisée précisément avant que les conditions sur le terrain soient mieux connues, après des stimulations d'essai et une caractérisation du site en profondeur. Nous nous attendons à ce que la valeur moyenne de l'évaluation des risques évolue au fur et à mesure de l'arrivée de données sur les conditions locales, mais surtout que les incertitudes soient notoirement réduites. Cette réduction des incertitudes est certes rationnelle, et a été prouvée dans des analyses rétrospectives, mais n'a jamais été démontrée dans un projet géothermique. Le SED conduira un premier essai en temps réel pour démontrer l'utilité de telles approches adaptatives d'évaluation pour réduire les risques à Geldinganes à l'automne 2019.

Selon nous, l'actualisation de l'étude de risque de Haute-Sorne est effectivement nécessaire, mais la contribution la plus importante à la réduction des incertitudes inhérentes, ne viendra qu'une fois que de nouvelles données collectées sur place, à la profondeur du réservoir seront disponibles. Une fois un premier forage effectué, des données importantes pour l'étalonnage du modèle de risque avec les conditions locales seront collectées par l'intermédiaire d'une stimulation limitée en termes de volume et de sismicité (comprenant l'évaluation de l'état de contrainte, la distribution des fractures, etc.), ce qui permettra de réduire les incertitudes et de prendre des décisions avec de meilleures informations. Il est donc nécessaire d'effectuer une stimulation d'essai avec des volumes limités de fluide sous pressions modérées, pour permettre une actualisation substantielle de l'étude de risque. Cette procédure est déjà prévue par GES, fait partie des démarches du permis, et reste d'après nous l'unique mesure importante pour garantir une stimulation sûre. Elle permettra également à GES de mieux décider si la création d'un réservoir rentable commercialement est possible, en considération des conditions et contraintes locales pour garder le risque sismique à un niveau acceptable. Le forage exploratoire lui-même, les tests de caractérisation ainsi que la première stimulation d'essai avec des volumes réduits n'entraînent qu'une fraction des risques de la stimulation de l'ensemble du réservoir, un risque que l'étude de GES a démontré être bien en deçà des critères d'acceptation définis par le canton.

Recommandation 3 : Le SED recommande qu'une actualisation complète de l'étude de risque soit mandatée par le canton uniquement après le forage et la description du premier puits d'exploration. Une actualisation aujourd'hui n'entraînerait pas de nouveautés substantielles par rapport à l'étude de risque existante. C'est seulement une fois que les conditions in-situ du site seront mieux connues que les incertitudes inhérentes à l'évaluation des risques sismiques seront notoirement réduites. L'autorisation de stimulation complète du réservoir devrait être strictement conditionnée à la démonstration de conditions de risque acceptables, sur la base des conditions in-situ du site telles qu'elles auront été déterminées par le biais du forage exploratoire et sur la base d'un plan retravaillé de développement du réservoir. La version actualisée de l'étude de risque devra également être examinée par le canton et par des évaluateurs externes avant de délivrer un permis de stimulation. L'étude de risque actualisée servira alors de guide pour la mise en place d'approches de feux de signalisation adaptatifs.

4.2.4 Nécessité d'actualiser les stratégies de suivi sismique et d'atténuation des risques

Le projet de Pohang est à bien des égards l'exemple parfait de la façon dont il ne faut pas mener un suivi sismique ou dérouler des analyses pour des projets SGS, ce qui rend donc difficile de tirer des conclusions de l'utilité de stratégies de gestion des risques sismiques à partir de ce projet. L'évaluation des métadonnées sismologiques du réseau de surveillance de Pohang, installé par l'opérateur, indique par exemple qu'une erreur conceptuelle a provoqué une résolution limitée du système. Des sismomètres haute-sensibilité à mouvement faible ont été installés sur des sites de surface présentant généralement un bruit important, alors que des accéléromètres basse-sensibilité à mouvement fort étaient installés dans des forages peu profonds. En conséquence, le niveau de détection des signaux sismiques a été dans le premier cas limité par le fort bruit anthropogène, et dans le second cas par la résolution limitée des accéléromètres. Pour tous les systèmes de suivi sismique, il faut évaluer soigneusement si l'équipement choisi peut détecter et isoler les niveaux de signaux sismiques attendus ou désirés, et si le bruit de fond sur les sites est suffisamment bas pour la mission de suivi prévue. Des ouvrages (NMSOP-2 : doi.org/10.2312/GFZ.NMSOP-2; Havscov, 2010 : doi.org/10.1007/978-3-319-21314-9) et des publications scientifiques existent (p. ex., Kraft et al., 2013 ; Plenkers et al, 2015) et décrivent en détail les procédures d'évaluation pour le suivi microsismique.

Plusieurs réseaux sismiques étaient en fonctionnement sur le site de Pohang, sans coordination soignée, et généralement sans accès en temps réel aux données pour l'opérateur des services sismiques. À notre connaissance, le lieu et les magnitudes des tremblements de terre n'étaient donc disponibles qu'avec un délai considérable. En outre, les localisations et les magnitudes sismiques étaient peu précises et aucune localisation sismique relative n'a été calculée par quiconque dans le projet de Pohang dans un temps raisonnable. Selon ce que nous savons, les premières localisations relatives fiables ont été calculées par Kim et al. (2018) en utilisant des données d'un réseau indépendant. De même, aucune magnitude fiable n'était disponible pendant une longue période de la phase de stimulation du projet.

État de l'art actuel : Comme souligné plus haut, la microsismicité induite au début de stimulation hydraulique contient des informations critiques sur la réponse sismique probable de la subsurface à cette exploitation. Selon nous, dans toutes les phases d'un projet géothermique, les changements de comportement spatio-temporel de la microsismicité induite peuvent indiquer des évolutions potentiellement problématiques de l'aléa sismique. Il est donc essentiel de déployer et d'exploiter de manière professionnelle un système de suivi sismique de haute sensibilité en temps réel, pouvant fournir automatiquement des localisations et magnitudes précises, y compris les relocalisations relatives. Les données du suivi doivent alimenter des algorithmes qui fourniront une prévision de la sismicité à venir, et celle-ci doit être disponible en temps réel pour les opérateurs de forage et pour le régulateur. Des modifications dans la distribution de la sismicité induite, telles que l'apparition de linéaments pouvant indiquer la réactivation de failles majeures, devraient être détectées pratiquement en temps réel par les analystes, et déclencher une réévaluation de l'aléa sismique au niveau d'un groupe local d'experts, qui peut décider de mettre l'exploitation en attente et de réévaluer l'aléa et les risques plus précisément. Les autorités doivent veiller à ce que les concepts d'atténuation du risque soient développés par les opérateurs et examinés par des experts indépendants. Last but not least, il est nécessaire qu'un personnel formé et compétent puisse effectuer le suivi et l'analyse sismique.

Au-delà de l'état de l'art : Les techniques de surveillance et de traitement sismiques évoluent rapidement, et de nouveaux types de capteurs (p. ex. sismomètres par fibre optique et détecteurs acoustiques distribués) ainsi que le traitement automatique basé sur l'apprentissage machine offrent un potentiel élevé de détection et de localisation des microséismes bien plus complet, rapide et fiable (voir par exemple Herrmann et al., 2019). Ces méthodes ont le potentiel de garantir des améliorations supplémentaires pour la sécurité des stimulations de réservoir SGS, car les évolutions problématiques peuvent être détectées plus tôt, et la compréhension du processus peut progresser.

Recommandation 4 : GES était selon nous bien conforme aux exigences de suivi sismique, et les tremblements de terre de Pohang ne font que renforcer le besoin d'un suivi et d'une analyse en temps réel extrêmement sérieux. GES présente un plan solide pour répondre aux exigences de suivi et d'analyse les plus modernes présentées plus haut, qui sont d'ailleurs également mentionnées dans les directives du canton. GES étudie également la compréhension du potentiel des nouvelles technologies au-delà de l'état actuel de l'art, et explore comment celles-ci peuvent être utilisées pour améliorer la sécurité du projet de Haute-Sorne. La société investit également dans la mise en place d'un personnel compétent. Nous encourageons GES à continuer dans cette approche. Il manque par contre une planification détaillée du suivi et de l'analyse, y compris des plans de détermination et d'amélioration du modèle de vitesse, une évaluation quantitative des performances attendues et les responsabilités des parties prenantes (personnel GES, sociétés extérieures, personnel du SED, régulateur) ainsi qu'un plan de l'utilisation de ces données en temps quasi réel, par exemple dans le cadre de systèmes adaptatifs de feux de signalisation ou pour les analyses d'experts. Ce plan devrait être remis au canton et approuvé bien avant que le forage exploratoire (phase 1) ne démarre.

4.2.5 Nécessité de couches multiples de sécurité et d'une culture de la sécurité orientée vers l'avenir

Une constatation essentielle concernant le projet de Pohang est, selon nous, que la catastrophe n'a pas été provoquée par une seule erreur ou oubli, mais par une combinaison et chaîne d'événements pendant toute la durée du projet, éventuellement associées à un certain degré de « malchance » (section 3.2). Les leçons à en tirer sont en principe bien connues dans les évaluations de risque et de sécurité : la sécurité n'est pas obtenue avec une seule mesure et une évaluation unique, mais par un processus continu qui implique de **nombreuses couches de sécurité** (également appelées barrières de sécurité) combinées avec une bonne culture de la sécurité ancrée dans la structure organisationnelle et dans la supervision réglementaire. Une bonne culture de sécurité progressive demande également un personnel formé et entraîné, ainsi qu'une ouverture aux critiques internes et externes.

Les rapports GES sur les événements de Pohang soulignent de manière crédible comment les différentes couches de sécurité mises en œuvre dans le projet de Haute-Sorne auraient vraisemblablement évité l'occurrence d'une rupture de propagation. Ces couches sont basées sur la sélection du site, l'exécution du projet, les procédures de suivi et l'évaluation quantitative des risques (voir l'analyse du chapitre 3). Des couches supplémentaires de sécurité pourraient être ajoutées d'après nous (imagerie sismique 3D, voir ci-après). Le sérieux et la rapidité que GES a démontrés en se penchant sur le séisme de Pohang, et la place prise dans le plan de projet de Haute-Sorne par les couches de sécurité sont, d'après nous, des étapes positives et importantes pour garantir une mise en œuvre sûre du projet de Haute-Sorne.

Il est aussi important de réaliser que dans le cas des SGS, l'amélioration de la sécurité du projet est non seulement onéreuse (notamment pour un meilleur suivi sismique), mais peut avoir un fort impact sur les résultats économiques finaux du projet (par exemple, un système de feux de signalisation plus prudent réduira la possibilité d'obtenir un échangeur de chaleur rentable ; Mignan et al., 2019a). En raison de l'expérience limitée avec des systèmes SGS en Suisse et dans le monde, nous croyons que le projet pilote de Haute-Sorne doit mettre la sécurité au premier plan, et les considérations économiques et financières au deuxième plan. La subvention importante de l'Office fédéral de l'énergie pour l'exécution du projet de Haute-Sorne doit être considérée par l'opérateur comme une contribution notoire à la sécurité.

Recommandation 5 : Nous encourageons GES à conserver et continuer à renforcer une culture de la sécurité anticipatrice en ce qui concerne la gestion de la sismicité induite. Ceci comprend le maintien et le développement des capacités et de l'expertise au sein de l'organisation pour ce qui concerne la gestion des risques de sismicité induite, une formation dédiée, et éventuellement des évolutions d'organisation allant dans le sens de la sécurité. Nous suggérons que les autorités cantonales considèrent également une bonne culture organisationnelle de sécurité comme un critère important d'examen et d'attribution du permis.

4.2.6 Nécessité d'une meilleure détermination des failles en utilisant les données de réflexion sismique

La présence de failles potentielles dans le volume de roche affectée par l'exploitation des projets géothermiques est connue depuis longtemps comme un facteur important, mais Pohang a encore renforcé le caractère essentiel de ce facteur. Les failles peuvent souvent être détectées lorsqu'un forage les traverse, bien que le projet de forage de la faille de San Andreas ait montré que même des failles importantes peuvent être difficiles à localiser exactement, même quand on fore à travers. Pour identifier des failles proches de la trajectoire du forage, mais qui ne la coupent pas, ou pour identifier des failles avant que le forage ne commence, des données de réflexion sismique le long de profils 2D ou sous forme de relevés 3D, tels qu'ils sont effectués en routine chaque jour dans le monde, sont une option viable. L'option d'acquisition de données supplémentaires de réflexion sismique a été envisagée pendant le processus d'attribution de permis du projet de Haute-Sorne, mais les capacités d'imagerie sismique dans le socle cristallin sont limitées en raison de l'absence de réflecteurs notables. Finalement, le canton a décidé en 2015, sur la base des conseils de différents experts, que l'information supplémentaire apportée à la détermination des risques sismiques n'était pas suffisante pour exiger une campagne d'imagerie 3D sismique onéreuse. Nous pensons qu'à la lumière de la consultation de données sismiques récentes, collectées sur le terrain, et illustrant l'importance de connaître les failles principales et de caractériser correctement le contexte sismotectonique de la région (figure 10), mais également à la lumière de la secousse principale de Pohang, cette décision doit être réexaminée.

Le jeu de données sismiques actuellement disponibles dans le bassin occidental de Delémont consiste en trois profils 2D acquis et traités pour l'exploration des hydrocarbures au début des années 1970 dans la couche sédimentaire mésozoïque de 1.3 km d'épaisseur. Le site de forage se trouve sur un des profils. La qualité de l'imagerie résultant de l'acquisition et du traitement de ces anciennes données est moyenne à faible. L'acquisition de données de réflexion sismique supplémentaires a été envisagée antérieurement par GES, mais n'a jamais été réalisée, avec l'argument que le réservoir en profondeur est situé dans le socle cristallin, un environnement géologique dans lequel les contrastes de densité et de vitesses sismiques sur lesquels s'appuie la méthode de réflexion sismique, sont en général absents.

Il s'agit d'un argument partiellement valide, même si l'on tient compte des grands progrès effectués par l'industrie dans l'acquisition et le traitement des données de réflexion sismique. Ces progrès sont illustrés de manière convaincante par les différentes générations de données sismiques acquises par la Nagra dans un environnement géologique très similaire, dans l'est du Jura. La comparaison entre les données sismiques 2D des années 1970 et des données acquises récemment le long (pratiquement) des mêmes profils est spectaculaire, avec une résolution bien supérieure, bien moins d'artefacts et en conséquence, un tracé plus précis des failles (figure 10). C'est vrai pour la couverture de sédiments du mésozoïque et, lorsqu'ils sont présents, pour les fossés permo-carbonifères sous-jacents. L'acquisition de données en 3D représente également une amélioration dans l'imagerie du sous-sol et a démontré son importance pour déchiffrer la tectonique du système hydrothermal de Saint-Gall et la sismicité induite (Diehl et al., 2017). Ces données aident également à améliorer la localisation précise des tremblements de terre induits.

Les fossés permo-carbonifères, bien qu'étant des structures très anciennes, sont importants pour le projet, car les failles qui les bordent sont considérées par de nombreux géologues comme réactivables dans le champ de contraintes actuel. Effectivement, dans le Sundgau, la partie la plus méridionale de l'Alsace (F), une telle réactivation a été démontrée (Ustaszewski, 2005). Sur la base de données gravimétriques (par essence de basse résolution), GES a conclu que de tels sédiments permo-carbonifères existent à proximité du site de Haute-Sorne (Meier & Zingg, 2013). Ils pensent que la limite sud du fossé principal est orientée dans la direction est-ouest au nord du site de Haute-Sorne. L'interprétation récente des nouvelles données 2D et 3D de la Nagra montre cependant que ces fossés ne sont généralement pas limités par une seule faille de chaque côté, mais par une série de failles parallèles, avec une distribution en escaliers des sédiments permo-carbonifères.

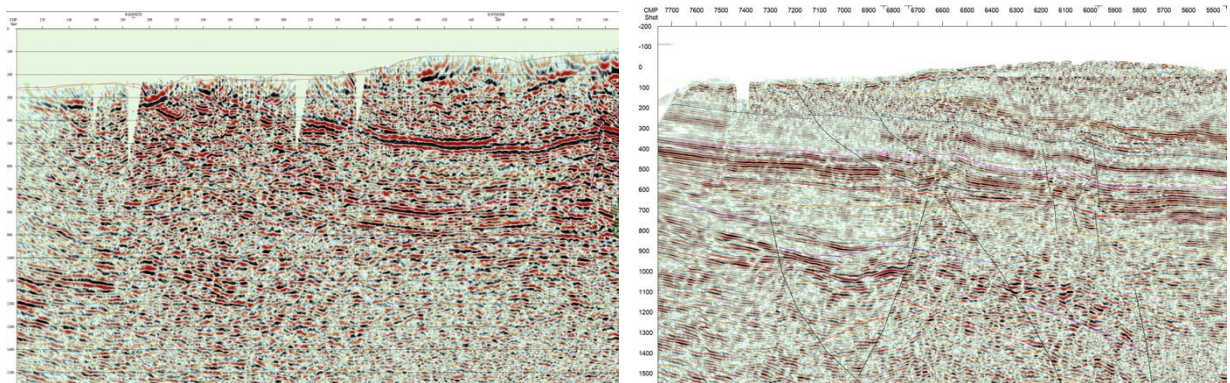


Figure 10 : Les profils N-S dans le Jura argovien en 1980 (à gauche) et 2011 (à droite), montrant les progrès de l'imagerie sismique. Avec l'aimable autorisation de Nagra (cf. aussi Nagra, 2014).

Recommandation 6 : L'absence d'imagerie sismique 3D moderne des environs du réservoir est une critique récurrente du projet de Haute-Sorne par la communauté technique informée. Étant données les questions ouvertes sur la localisation et l'expression des fossés permo-carbonifères, étant donnée l'importance vitale de déterminer les failles à la lumière du tremblement de terre de Pohang, et étant donnés les progrès effectués en imagerie sismique, nous recommandons qu'un relevé sismique 3D mené avec les technologies les plus modernes, ainsi qu'une interprétation sismotectonique subséquente soient effectués avant la stimulation complète. Cette imagerie devrait viser à déterminer les failles dans les deux à trois kilomètres entourant le site de forage. L'imagerie sismique ajoutera une couche de sécurité supplémentaire au projet et contribuera à réduire les incertitudes dans sa planification. Si GES démontre qu'une résolution suffisante est possible avec plusieurs lignes 2D, ceci pourrait être une alternative viable. L'imagerie sismique ne fait pas partie du cœur de compétence du SED, et la planification du projet devrait être menée en collaboration avec des experts dans ce domaine. L'interprétation sismique devrait contribuer également à l'actualisation de l'étude de risque avant la stimulation complète.

4.2.7 Nécessité d'une meilleure détermination des failles en utilisant des données de forage

Une couche de sécurité supplémentaire liée à la présence ou l'absence de zones de failles majeures pourrait être obtenue en effectuant une imagerie de forage pour les zones de failles majeures et en intégrant ces données dans les stratégies d'évaluation et d'atténuation des risques. Ceci s'effectue plus facilement en utilisant des techniques sismiques inter-forages, qui demandent deux forages ou plus, ce qui dans le cas de Haute-Sorne, ne présentera qu'un potentiel limité, car seuls deux forages profonds seront creusés, et ce, très proches l'un de l'autre dans les kilomètres supérieurs. Il devrait être envisagé d'appliquer des techniques d'imagerie inter-forages dans le volume compris entre les deux forages en profondeur, avant la stimulation complète du réservoir (phase 7 dans le plan GES,

figure 11) afin de détecter les failles principales entre les deux puits, et donc au centre de la zone à stimuler.

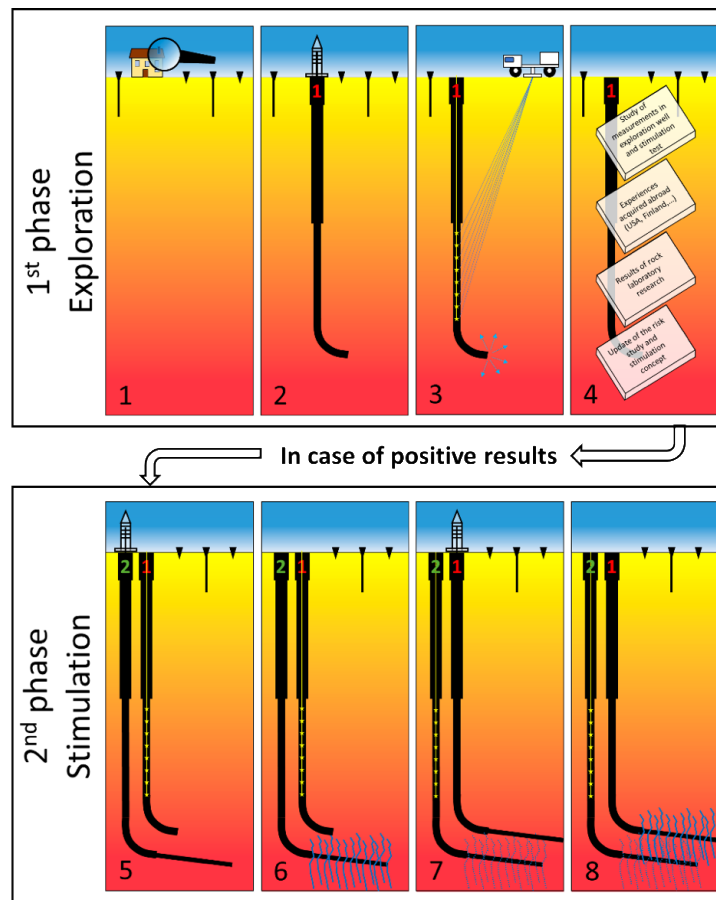


Figure 11 : Phasage du projet de Haute-Sorne tel que le propose GES.

Par ailleurs, il devrait être possible de détecter des failles importantes à partir d'un seul forage en utilisant les réflexions sismiques, les mesures de Profil sismique vertical (PSV) à partir de la surface, l'imagerie radar ou les méthodes magnéto-telluriques. Les technologies évoluent rapidement et de nouveaux capteurs, notamment les capteurs acoustiques répartis utilisant la fibre optique offrent de nouvelles possibilités. Le forage exploratoire de GES peut donc permettre de déterminer les failles et fractures dans les 1 à 2 kilomètres autour du puits. GES prévoit de telles activités, mais ce travail doit être prévu désormais en détail et inclus dans le processus de réévaluation des risques et d'attribution du permis pour la stimulation complète. Il ne s'agit pas du cœur d'expertise du SED, et les conseils d'experts en imagerie sismique doivent être envisagés. Il peut être éventuellement judicieux d'acquérir l'imagerie 3D uniquement après le forage exploratoire, afin d'installer des capteurs dans le puits pendant la campagne d'imagerie.

Recommandation 7 : Nous recommandons que GES rédige un plan détaillé de détection des failles à partir du forage exploratoire et entre les forages 1 et 2 comme couche de sécurité supplémentaire. La détermination des failles grâce aux mesures effectuées à partir des forages doit être intégrée dans l'actualisation de l'étude de risque. Le transfert de connaissances à partir d'autres projets du monde entier, et la collaboration avec des experts dans ce domaine doivent être intégrés.

4.3 Synthèse des recommandations

Selon nous, et en tenant compte des conditions imposées par le canton du Jura, le concept global d'évaluation et de gestion des risques pour le projet de Haute-Sorne présenté par GES est solide et n'a pas besoin d'être fondamentalement modifié à la lumière du séisme de Pohang. Toutefois, nous proposons un certain nombre d'étapes et de mesures supplémentaires pouvant encore améliorer la sécurité du projet suite aux leçons tirées de Pohang. La recommandation essentielle, et la plus onéreuse dans ce cadre est notre suggestion au canton d'effectuer une campagne d'imagerie sismique en 3D avec les techniques les plus modernes avant de permettre la stimulation complète.

Selon nous, la couche de sécurité la plus importante pour le projet de Haute-Sorne consiste à collecter, pendant la phase exploratoire, des données adéquates in-situ, notamment la distribution des fractures, la répartition spatiale des contraintes, et la réponse sismogénique aux injections. La première phase prévue par GES (figure 11) n'entraîne à nos yeux qu'un risque sismique minimal pendant la stimulation d'essai, risque qui se trouve bien en deçà des critères d'acceptation définis par le canton. L'évaluation des risques n'a pas évolué à la lumière du tremblement de terre de Pohang. Nous suggérons donc que GES soit autorisée à exécuter la phase exploratoire. Cette phase d'exploration doit être exploitée pour acquérir autant de données que possible grâce à des mesures in-situ, essentielles pour réduire les incertitudes a priori de l'évaluation des risques sismiques. Ces données et analyses doivent par la suite être utilisées pour alimenter un concept détaillé d'une stratégie de stimulation sécurisée du réservoir, pour calibrer la modélisation numérique et les procédures adaptatives d'évaluation des risques, pour calibrer et tester le suivi sismique, et pour rechercher les systèmes importants de failles inconnus à proximité. Selon nous, une actualisation de l'étude de risque sismique n'est pas nécessaire avant l'exécution de la phase exploratoire, mais elle sera essentielle, et beaucoup plus judicieuse une fois la phase exploratoire terminée. De nombreux projets géothermiques profonds antérieurs sont passés rapidement, après la phase de forage, à l'exécution de la stimulation, car chaque journée passée avec un dispositif de forage présent sur le site coûte au moins CHF 50'000. Prendre le temps d'une nouvelle analyse soignée des données, sans garder le dispositif sur le site, est fondamental en raison des incertitudes existantes et de l'expérience limitée avec les technologies SGS en Suisse et dans le monde.

L'attribution du permis pour la deuxième phase du projet, la véritable stimulation du réservoir, doit être basée sur une actualisation de l'évaluation du risque sismique, comportant un plan d'atténuation tenant compte des données collectées pendant la phase exploratoire, mais aussi des progrès en matière de connaissances des SGS et de la sismicité induite en général, et des expériences acquises dans d'autres projets (notamment les expérimentations en cours dans le Bedret. toLab, la seconde stimulation du projet d'Helsinki (2020), et le projet FORGE en Utah). De la même manière, les derniers résultats pour identifier les mécanismes de déclenchement du tremblement de terre de Pohang peuvent, le cas échéant, être intégrés dans l'actualisation de l'évaluation des risques. De la même façon, les données supplémentaires, notamment collectées lors d'une campagne d'imagerie sismique, doivent être intégrées dans l'actualisation.

La séparation formelle du projet de Haute-Sorne en deux phases, chacune précédée d'une étude de risque évaluée par le canton, peut largement améliorer la qualité et la robustesse de l'évaluation des risques et globalement, la sécurité du projet. Ce concept est déjà prévu indirectement dans le plan de projet remis au canton par GES pour Haute-Sorne, dans les conditions 56 et 57 du canton :

56. Le risque individuel de décès ne doit pas excéder une probabilité annuelle de 1/1 000 000. Ce risque doit être recalculé à l'acquisition de toute nouvelle donnée susceptible de le modifier notablement. La méthode de calcul, décrite dans le rapport GES du 9 mars 2015 (Assessment of the seismic risk induced by the geothermal project of Haute-Sorne) doit au besoin être mise à jour si elle ne correspond plus aux recommandations de l'Office fédéral de l'environnement en la matière.

57. L'analyse du risque sismique sera mise à jour à chaque fois que de nouvelles données ou connaissances (techniques ou scientifiques) sont acquises et qu'elles sont susceptibles de modifier sensiblement le niveau du risque ou sa gestion.

Nous proposons de définir et de formaliser cette procédure d'actualisation et suggérons au canton de demander une mise à jour complète de l'évaluation des risques sismiques de Haute-Sorne après la phase exploratoire et avant la phase de stimulation. Cette actualisation doit être examinée par des experts indépendants, et approuvée par le canton avant que la stimulation complète du réservoir ne commence.

5. Références

- Atkinson, G. M., Eaton, D. W., Ghofrani, H., Walker, D., Cheadle, B., Schultz, R., ... & Liu, Y. (2016). Hydraulic fracturing and seismicity in the western Canada sedimentary basin. *Seismological Research Letters*, 87(3), 631-647.
- Bachmann, C. E., Wiemer, S., Woessner, J., & Hainzl, S. (2011). Statistical analysis of the induced Basel 2006 earthquake sequence: introducing a probability-based monitoring approach for Enhanced Geothermal Systems. *Geophysical Journal International*, 186(2), 793-807.
- Baisch S, Carbon D, Dannwolf U, Delacou B, Devaux M, Dunand F, et al.: Deep Heat Mining Basel: Seismic risk analysis. In: SERIANEX: Report from Department für Wirtschaft, Soziales und Umwelt des Kanton Basel-Stadt. Amt für Umwelt und Energie (2009)
- Bommer, J. J., Stafford, P. J., Edwards, B., Dost, B., van Dedem, E., Rodriguez-Marek, A., ... & Ntinalexis, M. (2017). Framework for a ground-motion model for induced seismic hazard and risk analysis in the Groningen gas field, the Netherlands. *Earthquake Spectra*, 33(2), 481-498.
- Bormann, P. (2012). New manual of seismological observatory practice (NMSOP-2), IASPEI, GFZ German Research Centre for Geosciences, Potsdam.
- Broccardo, M., Danciu, L., Stojadinovic, B., & Wiemer, S. (2017a). Individual and societal risk metrics as parts of a risk governance framework for induced seismicity. In 16th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE16).
- Broccardo, M., Mignan, A., Wiemer, S., Stojadinovic, B., & Giardini, D. (2017b). Hierarchical Bayesian Modeling of Fluid-Induced Seismicity. *Geophysical Research Letters*, 44(22), 11-357.
- Diehl, T., Kraft, E., Kissling, et S. Wiemer (2017), The induced earthquake sequence related to the St. Gallen deep geothermal project (Switzerland): Fault reactivation and fluid interactions imaged by microseismicity, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(9), 7272-7290.
- Edwards, B., Cauzzi, C., Danciu, L., & Fäh, D. (2016). Region-specific assessment, adjustment, and weighting of ground-motion prediction models: Application to the 2015 Swiss seismic-hazard maps. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106(4), 1840-1857.
- Ellsworth, W. L., Giardini, D., Townend, J., Ge, S., & Shimamoto, T. (2019). Triggering of the Pohang, Korea, Earthquake (M w 5.5) by Enhanced Geothermal System Stimulation. *Seismological Research Letters*, 90(5), 1844-1858.
- Giardini, D. (2009). Geothermal quake risks must be faced. *Nature*, 462(7275), 848.
- Gischig, V. S., & Wiemer, S. (2013). A stochastic model for induced seismicity based on non-linear pressure diffusion and irreversible permeability enhancement (Un modèle stochastique de sismicité induite basé sur la diffusion de pression non linéaire et sur une augmentation irréversible de perméabilité). *Geophysical Journal International*, 194(2), 1229-1249.
- Goertz-Allmann, B. P., & Wiemer, S. (2012). Geomechanical modeling of induced seismicity source parameters and implications for seismic hazard assessment. *Geophysics*, 78(1), KS25-KS39.
- Grigoli, F., Cesca, S., Priolo, E., Rinaldi, A. P., Clinton, J. F., Stabile, Bernard Dost, Mariano Garcia Fernandez, Stefan Wiemer, & Torsten Dahm. (2017). Current challenges in monitoring, discrimination, and management of induced seismicity related to underground industrial activities: A European perspective. *Reviews of Geophysics*, 55(2), 310-340.
- Grigoli, F., Cesca, S., Rinaldi, A. P., Manconi, A., López-Comino, J. A., R. Westaway, C. Cauzzi, T. Dahm, et S. Wiemer (2018). The November 2017 Mw 5.5 Pohang earthquake: A possible case of induced seismicity in South Korea. *Science*, 360(6392), 1003-1006.

- Havskov, J., & Alguacil, G. (2004). Instrumentation in earthquake seismology (Vol. 358). Dordrecht, The Netherlands: Springer.
- Herrmann, M., Kraft, T., Tormann, T., Scarabello, L., & Wiemer, S. (2019). A Consistent High-resolution Catalog of Induced Seismicity in Basel Based on Matched Filter Detection and Tailored Post-processing. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*.
- Hirschberg, S., Wiemer, S., & Burgherr, P. (2015). Energy from the Earth. Deep Geothermal as a Resource for the Future, 3655-8.
- Hong, T. K., Lee, J., Park, S., & Kim, W. (2018, décembre). A different view on the occurrence of the 2017 M5. 4 Pohang earthquake. In AGU Fall Meeting Abstracts.
- Hong, T. K., Lee, J., Park, S., & Kim, W. (2018). Time-advanced occurrence of moderate-size earthquakes in a stable intraplate region after a megathrust earthquake and their seismic properties. *Scientific reports*, 8(1), 13331.
- Kim, K. H., Ree, J. H., Kim, Y., Kim, S., Kang, S. Y., & Seo, W. (2018). Assessing whether the 2017 Mw 5.5 Pohang earthquake in South Korea was an induced event. *Science*, 360(6392), 1007-1009.
- Kraft, T., Mai, P. M., Wiemer, S., Deichmann, N., Ripperger, J., Kästli, P., ... & Giardini, D. (2009). Enhanced geothermal systems: Mitigating risk in urban areas. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 90(32), 273-274.
- Kraft, T., Mignan, A., & Giardini, D. (2013). Optimization of a large-scale microseismic monitoring network in northern Switzerland. *Geophysical Journal International*, 195(1), 474-490.
- Kwiatek, G., Saarno, T., Ader, T., Bluemle, F., Bohnhoff, M., Chendorain, M., ... & Leonhardt, M. (2019). Controlling fluid-induced seismicity during a 6.1-km-deep geothermal stimulation in Finland. *Science advances*, 5(5), eaav7224.
- Lee, K. K., Ellsworth, W. L., Giardini, D., Townend, J., Ge, S., Shimamoto, T., ... & Chang, C. (2019). Managing injection-induced seismic risks. *Science*, 364(6442), 730-732.
- Meier P. & Zingg O. (2013) : Rapport Technique – Projet pilote de géothermie profonde Haute-Sorne. *Geo-Energie Suisse*, 69 p.
- Mignan, A., Landtwing, D., Kästli, P., Mena, B., & Wiemer, S. (2015). Induced seismicity risk analysis of the 2006 Basel, Switzerland, Enhanced Geothermal System project: Influence of uncertainties on risk mitigation. *Geothermics*, 53, 133-146.
- Mignan, A., Broccardo, M., Wiemer, S., & Giardini, D. (2017). Induced seismicity closed-form traffic light system for actuarial decision-making during deep fluid injections. *Scientific reports*, 7(1), 13607.
- Mignan, A., Karvounis, D., Broccardo, M., Wiemer, S., & Giardini, D. (2019a). Including seismic risk mitigation measures into the Levelized Cost Of Electricity in enhanced geothermal systems for optimal siting. *Applied energy*, 238, 831-850.
- Mignan, A., M. Broccardo, S. Wiemer et D. Giardini (2019b), Autonomous Decision-Making Against Induced Seismicity in Deep Fluid Injections, A. Ferrari et L. Laloui (eds.), *Energy Geotechnics*, SEG 2018, 369-376, doi : 10.1007/978-3-319-99670-7_46
- Nagra (2014). SGT Etappe 2_ Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage. *Geologische Grundlagen. Dossier III: Geologische Langzeitentwicklung*. Nagra Technischer Bericht NTB 14-02, Wettingen
- Plenkens, K., Husen, S., & Kraft, T. (2015). A multi-step assessment scheme for seismic network site selection in densely populated areas. *Journal of seismology*, 19(4), 861-879.
- McGarr, A. (2014), Maximum magnitude earthquakes induced by fluid injection, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 119, 1008-1019.

- Trutnevyte, E., & Wiemer, S. (2017). Tailor-made risk governance for induced seismicity of geothermal energy projects: An application to Switzerland. *Geothermics*, 65, 295-312.
- Ustaszewski K., Schumacher M.E., Schmid S.M., Nieuwland D. (2005) : Fault reactivation in brittle-viscous wrench systems—dynamically scaled analogue models and application to the Rhine-Bresse transfer zone. *Quaternary Science Reviews* 24, 365–382.
- van der Elst, N. J., M. T. Page, D. A. Weiser, T. H. W. Goebel and S. M. Hosseini (2016), Induced earthquake magnitudes are as large as (statistically) expected, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121, 4575-4590.
- Westaway, R., & Burnside, N. M. (2019). Fault “Corrosion” by Fluid Injection: A Potential Cause of the November 2017 5.5 Korean Earthquake. *Geofluids*, 2019.
- Zbinden, D. (2019). Coupled multi-phase hydro-mechanical modeling of induced seismicity associated with geo-energy applications (Doctoral dissertation, ETH Zurich).