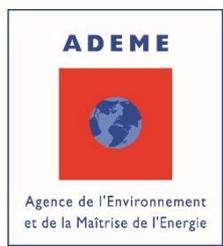


État de l'art sur la sismicité anthropique due aux opérations de géothermie profonde

Rapport final

BRGM/RP-69689-FR

Février 2020



État de l'art sur la sismicité anthropique due aux opérations de géothermie profonde

Rapport final

BRGM/RP-69689-FR

Février 2020

Étude réalisée dans le cadre d'appui aux politiques publiques du BRGM
AP19DGR111

Julie Maury

Avec la collaboration de
Fanny Branchu

Vérificateur :

Nom : Mickael DELATRE
Fonction : Ingénieur de recherche
Date : 24/02/2020
Signature :



Approbateur :

Nom : Mikael PHILIPPE
Fonction : Responsable de l'unité
DGR/DES
Date : 23/03/2020
Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.
Contact : qualite@brgm.fr



Mots-clés : Séisme induit, Séisme déclenché, Géothermie profonde, Communication, France

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Maury J., Branchu F. (2020) – État de l'art sur la sismicité anthropique due aux opérations de géothermie profonde. Rapport final. BRGM/RP-69689-FR, 95p., 22 fig., 10 tabl., 1 ann.

Synthèse

La sismicité anthropique est un sujet de préoccupation récurrent. Nous nous intéressons dans ce rapport aux séismes liés aux opérations de géothermie profonde. En particulier, nous nous concentrons sur leurs explications et sur des cas d'étude, c'est-à-dire des événements sismiques liés à l'activité géothermique. Ces cas d'étude sont traités du point de vue opérationnel : qu'est-ce qui a généré ce(s) événement(s) et quel a été leur impact ?

Ce rapport a une visée pédagogique. Il est à destination des acteurs institutionnels ou de la géothermie qui sont amenés à interagir avec les publics sur ces questions. Il a pour but d'être une ressource pour expliquer les événements sismiques et les dispositifs mis en œuvre pour les éviter.

Nous présentons donc :

- la géothermie profonde ;
- les activités industrielles qui génèrent de la sismicité avec un focus sur la géothermie en particulier ;
- comment la différence est faite entre séisme naturel et [séisme induit/déclenché](#) ?
- les mesures de préventions et de surveillance mises en œuvre dans des projets de géothermie profonde ;
- la réglementation française ;
- des cas d'études de sismicité anthropique liée à la géothermie: Soultz-Sous-Forêts, Bâle, Landau, St Gall, Pohang ;
- les grandeurs caractérisant la sismicité ;
- les mécanismes physiques qui déclenchent de la sismicité.

Nous terminons par un lexique pour bien comprendre les termes utilisés quand nous parlons de sismicité.

Ce rapport fait partie d'un kit de communication sur la sismicité induite par des opérations de géothermie profonde. Une notice de contexte sur la communication sur la sismicité induite dans les opérations de géothermie et un rapport proposant des éléments de communication compléteront ce kit.

Sommaire

1. Introduction	11
2. Présentation de la géothermie.....	15
2.1. LA GÉOTHERMIE PROFONDE : USAGES ET PRODUCTIONS	15
2.1.1. Usages	15
2.1.2. Production	16
2.2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT.....	17
2.2.1. Les ressources	17
2.2.2. Le captage de la ressource, le principe du doublet	17
3. Les activités industrielles à l'origine de sismicité	21
3.1. LES SOURCES DE SISMICITÉ ANTHROPIQUES.....	21
3.2. GÉOTHERMIE COMME PROCESSUS DÉCLENCHANT DE LA SISMICITÉ.....	21
3.2.1. Phases d'un projet de géothermie.....	22
3.2.2. Paramètres impactant le risque de sismicité	22
3.2.3. Zone d'influence de la sismicité (spatiale et temporelle)	24
3.3. PARAMÈTRES OPÉRATIONNELS IMPACTANT L'OCCURRENCE DE SISMICITÉ ANTHROPIQUE.....	25
4. Différenciation sismicité naturelle – sismicité induite.....	27
4.1. LES MÉTHODES QUALITATIVES.....	27
4.2. LES MÉTHODES QUANTITATIVES.....	28
4.2.1. Les modèles physiques	28
4.2.2. Les modèles statistiques.....	29
4.2.3. Les modèles de physique de la source	29
5. Surveillance, prévention et mitigation	31
5.1. SURVEILLANCE DE LA SISMICITÉ ANTHROPIQUE	31
5.2. LE SYSTÈME DES FEUX DE SIGNALISATION.....	32
6. Règlementation française et implémentation par les opérateurs	33
6.1. LES ARRÊTÉS PRÉFECTORAUX	33
6.2. RÉGLEMENTATION ET SON IMPLÉMENTATION À BOUILLANTE, GUADELOUPE..	33

6.3. RÈGLEMENTATION ET SON ÉVOLUTION EN ALSACE	34
6.4. EXEMPLE D'APPLICATION DE CES MESURES PAR LES OPÉRATEURS : LE CAS DE SOULTZ-SOUS-FORÊTS ET RITTERSHOFFEN	37
7. Cas d'étude.....	41
7.1. SOULTZ-SOUS-FORÊTS (FRANCE - 2000 ET 2003).....	41
7.1.1. Le projet.....	41
7.1.2. Sismicité naturelle dans la région.....	42
7.1.3. Phase durant laquelle la sismicité est survenue.....	43
7.1.4. L'évènement	43
7.1.5. Évolution spatio-temporelle des événements	44
7.1.6. Procédure après l'évènement	45
7.1.7. Réglementation.....	45
7.1.8. Résumé des paramètres.....	45
7.2. BÂLE (SUISSE - 2006)	46
7.2.1. Le projet.....	46
7.2.2. Sismicité naturelle dans la région.....	46
7.2.3. Phase durant laquelle la sismicité est survenue.....	47
7.2.4. L'évènement	48
7.2.5. Évolution spatio-temporelle des événements	49
7.2.6. Procédure après l'évènement	49
7.2.7. Réglementation en Suisse	50
7.2.8. Résumé des paramètres.....	51
7.3. LANDAU (ALLEMAGNE - 2009)	51
7.3.1. Le projet.....	51
7.3.2. Sismicité naturelle dans la région.....	52
7.3.3. Phase durant laquelle la sismicité est survenue.....	52
7.3.4. L'évènement	52
7.3.5. Évolution spatio-temporelle des événements	52
7.3.6. Procédure après l'évènement	52
7.3.7. Résumé des paramètres.....	54
7.4. SAINT-GALL (SUISSE - 2013).....	54
7.4.1. Le projet.....	54
7.4.2. Sismicité naturelle dans la région.....	54
7.4.3. Phase durant laquelle la sismicité est survenue.....	55
7.4.4. L'évènement	55
7.4.5. Évolution spatio-temporelle des événements.....	56
7.4.6. Procédure après l'évènement	57
7.4.7. Résumé des paramètres.....	57
7.5. POHANG (CORÉE - 2017)	58

7.5.1. Le projet.....	58
7.5.2. Sismicité naturelle dans la région.....	58
7.5.3. Phase durant laquelle la sismicité est survenue.....	58
7.5.4. L'évènement.....	59
7.5.5. Évolution spatio-temporelle des événements.....	60
7.5.6. Procédure après l'évènement.....	61
7.5.7. Règlementation.....	62
7.5.8. Résumé des paramètres.....	63
7.5.9. Comparaison des événements.....	63
8. Grandeurs caractérisant la sismicité.....	67
8.1. LA MAGNITUDE.....	67
8.2. L'INTENSITÉ MACROSISMIQUE.....	68
8.3. MOUVEMENT DU SOL.....	70
9. Mécanismes déclenchant de la sismicité induite.....	73
10. Terminologie :.....	75
10.1. TERMES MÉCANIQUES.....	75
10.2. TERMES SISMOLOGIQUES.....	75
10.3. TERMES GÉOTHERMIQUES.....	76
11. Conclusion.....	79
12. Pour aller plus loin.....	81
13. Bibliographie.....	83
14. Annexe Notice de contexte.....	89
14.1. LA COMMUNICATION : UN ELEMENT (PARMI D'AUTRES) DE LA POLITIQUE DE RELATIONS AVEC LES PARTIES PRENANTES.....	89
14.1.1. L'intégration territoriale d'un projet ne se limite pas à un processus de communication descendant de l'opérateur.....	89
14.1.2. La communication sur le risque sismique, un élément (parmi d'autres) de la politique de communication d'un projet de géothermie.....	90
14.2. LE CONTEXTE DE CE TRAVAIL (TRAVAIL SITUÉ).....	92
14.3. BIBLIOGRAPHIE.....	95

Liste des figures

Figure 1 :	Proportion et causes de sismicité induite, d'après HiQuake.....	12
Figure 2 :	Ressources en aquifères profonds en métropole et opérations © BRGM.....	18
Figure 3 :	Schéma conceptuel expliquant le fonctionnement d'un doublet géothermique. © BRGM.	19
Figure 4 :	Classement des magnitudes maximales observées selon les sources de sismicité en Europe centrale. D'après (Grünthal, 2014). Du rang 1 au rang 8 les sources sont: séismes tectoniques (i.e. naturels), mines de potasse, mines de cuivre, grands barrages, exploitation d'hydrocarbure, fortes pluies dans un contexte géologique particulier (karst), mines de charbon et projets géothermaux.	21
Figure 5 :	Microsismicité pendant la stimulation hydraulique, à Soult-sous-Forêts, du puits GPK-1 en 1993. Projection horizontale des événements au-dessus (III-1) et en-dessous (III-2) de 3 000 m de profondeur. La sismicité s'organise en des géométries différentes suivant les paramètres d'injection et les caractéristiques mécaniques du milieu. (Cornet, 2015)	25
Figure 6 :	Protocole d'injection cyclique de fluide avec des cycles long-terme, moyen terme et court-terme. D'après (Hofmann et al., 2019).	26
Figure 7 :	Réseau sismologique de Bouillante. À gauche de 2004 à 2009 et à droite à partir de 2009. Les triangles rouges sont les stations actuelles et les triangles jaunes sont des positions possibles (non exhaustives) pour l'extension du réseau. D'après (Jousset et al., 2011).	34
Figure 8 :	Réseau de surveillance sismique de Soultz-sous-Forêts (en bleu) et Rittershoffen (en rouge) et réseaux géodésiques – pour surveiller si de la subsidence ou surrection se produisent (en vert). Les trajectoires des puits sont aussi montrées. Les rectangles en pointillés montrent les concessions de Soultz-sous-Forêts (en bleu) et Rittershoffen (en rouge). D'après (Maurer et al., 2020).	37
Figure 9 :	Vue de la station permanente Betschdorf du réseau de Rittershoffen (© BRGM - F. Branchu).	38
Figure 10 :	Charte de décision utilisée pour les sites de Soultz-sous-Forêts et Rittershoffen si un microséisme se produit. D'après (Maurer et al., 2020).	39
Figure 11 :	Sismicité enregistrée sur le réseau de Soultz (1991-1994). Figure extraite de la thèse de Helm (1996).	42
Figure 12 :	Débit et nombre d'événements par heure ainsi que la surpression en tête de puits. D'après Cuenot et al (2008).	43
Figure 13 :	La stimulation de GPK3 en 2003. Paramètres hydrauliques: pression (rouge) et débit (bleu foncé) dans GPK3, pression (rose), débit (vert) pendant l'injection double et débit (bleu clair) pendant la production dans GPK2. Moment sismique cumulé: tous les séismes (noir), séismes $M < 2$ (violet). D'après (Dorbath et al., 2009) ;	44
Figure 14 :	Carte schématique géologique et tectonique du sud du fossé rhénan. (Haring et al., 2008)..	47
Figure 15 :	Données sur la stimulation du puits Basel 1. Historique des débits d'injection (a), de la pression en tête de puits (b), du taux d'événements déclenchés (c), et de la magnitude des événements calculés par le SED (service sismologique Suisse). (Häring et al., 2008) ...	48
Figure 16 :	Épicentres des séismes (A) et coupe de la relocalisation master-event, perpendiculairement (B) et parallèlement (C) à la direction générale de l'alignement des épicentres par rapport à la localisation du forage.	49
Figure 17 :	Évolution de la sismicité pendant le projet de Saint-Gall (Hirschberg and TA-SWISS, 2015).	56

Figure 18 : Évolution temporelle des stimulations et de la sismicité à Pohang. Les séismes avec leur magnitude locale sont représentés par des points colorés avec leur échelle à gauche. L'injection journalière, le volume de flowback et le volume injecté cumulé sont illustrés par des lignes colorées (échelle à droite).....	60
Figure 19 : Séismes associés aux stimulations de PX-1 (gauche) et PX-2 (droite) projetés sur le meilleur plan dans chaque cas. Pour PX-1 les coordonnées sont relativement au centre de sismicité. Les séismes en bleu sont associés à la première stimulation et ceux en magenta sont associés à la seconde stimulation de PX-1. Pour PX-2 le fond de puits est localisé en (0,0) 375 m derrière le plan tracé. L'intersection du puits avec le plan à 3 800 m de profondeur est marqué par un x. L'événement associé à la perte de boue est tracé en marron, les événements associés à la première stimulation sont marqués en vert, ceux associés à la seconde stimulation sont en bleu et ceux associés à la troisième stimulation de PX-2 sont en jaune. Les précurseurs du séisme sont en rouge.....	61
Figure 20 : Lien entre la magnitude Mw et la profondeur pour des intensités de 4, 5 et 6 pour des événements en Europe centrale. D'après (Grünthal, 2014).	70
Figure 21: Conversion du PGA et PGV en intensité macrosismique. Le PGA est exprimé en %g ou $1g=9.81 \text{ m.s}^{-2}$	71
Figure 22 : Diagramme schématique pour les séismes induits. Modifiés d'après (Ellsworth, 2013).	73

Liste des tableaux

Tableau 1 : Part de la géothermie dans la consommation finale brute d'énergies renouvelables française en 2017*	17
Tableau 2 : Seuil de sismicité au-delà desquels les opérations et la surveillance sismique doivent être modifiées. La colonne de gauche définit les seuils en magnitude et la colonne de droite définit les seuils en PGV qui sont mis en place depuis l'arrêté d'exploitation de la centrale de Soultz-sous-Forêts.....	36
Tableau 3 : Récapitulatif des paramètres du site de Soultz-dous-Forêts.	45
Tableau 4 : Récapitulatif des paramètres du site de Bâle.....	51
Tableau 5 : récapitulatif des paramètres du site de Landau.	54
Tableau 6 : Récapitulatif des paramètres du site de Saint-Gall.	57
Tableau 7 : Récapitulatif des paramètres du site de Pohang.	63
Tableau 8 : Récapitulatif des paramètres liés aux événements sismiques étudiés.....	64
Tableau 9 : Récapitulatif des paramètres liés aux opérations.	65
Tableau 10 : Description simplifiée de l'échelle d'intensité EMS98. D'après (Grünthal, 1998).	69

1. Introduction

La géothermie est une énergie dite « décarbonée » car elle fait partie des énergies renouvelables qui émettent bien moins de gaz à effet de serre que les énergies fossiles¹. L'énergie thermique de la terre, stockée dans la roche et dans l'eau ou la vapeur, constitue la ressource géothermale. Avec une gestion appropriée de cette ressource, la chaleur extraite d'un [réservoir](#) est continuellement reformée par la production naturelle de chaleur et les fluides géothermaux pompés sont rechargés, naturellement et par la réinjection des fluides à des températures plus basses.

Il existe actuellement en Europe une capacité installée de 3 091 MWe répartie sur 127 usines produisant de l'électricité, en 2018². De plus, plus de 300 réseaux de chaleur alimentés par la géothermie sont en opération. En France, il existe 2 opérations de production d'électricité :

- l'usine de Bouillante en Guadeloupe qui a produit 112 GWh électriques en 2017 soit 6 % des besoins de la population (AFPG, 2019),
- l'usine de Soultz-Sous-Forêts qui a été un site pilote de recherche pendant 25 ans (1987-2012) avec une centrale électrique de démonstration d'une puissance brute de 1,7 MW (puissance nette de 1,4 MW) reconfigurée en centrale de production en 2016 (AFPG, 2019).

Concernant la chaleur, 57 installations de géothermie profonde sont en fonctionnement dans le bassin parisien et chauffent environ 600 000 personnes (AFPG, 2019). Les autres sites sont dans le bassin aquitain avec 20 installations, et 5 installations dans le couloir rhodanien, la Limagne et le fossé rhénan.

L'exploitation du sous-sol génère des risques qu'il convient de maîtriser. La sismicité induite est l'un des principaux risques à étudier, de la géothermie dans certains contextes géologiques, mais aussi de l'exploitation des hydrocarbures, de l'exploitation minière, la mise en eau de barrages ou l'extraction d'eau (Foulger *et al.*, 2018). En géothermie, jusqu'à présent, les séismes anthropiques n'ont occasionné, que des dégâts sur les habitations. Ces épisodes marquent les esprits et sont mis en avant lors des discussions sur des projets.

Le [séisme](#) de Pohang (2017, Corée) a remis en question le caractère limité³ des dommages dus à la sismicité anthropique liée à la géothermie. Il a en effet causé 135 blessés, 1 700 relogés et 75 millions de dollars américains de dommages. Il n'aurait cependant jamais pu se produire dans le contexte réglementaire français.

La base de données HiQuake, maintenue par l'université de Durham, recense les cas de sismicité induite abordés dans la littérature existante. D'après cette base de données, on observe que la géothermie est la cause de 6 % d'entre eux (Figure 1) soit 56 événements recensés. Ce nombre

¹ À l'échelle européenne, l'augmentation de production d'électricité à partir de la géothermie depuis 2005 a permis d'éviter l'émission de 1 Mt de CO₂ et la non-consommation de 270 ktep (kilotonnes équivalent pétrole) d'énergies fossiles en 2018. Sur cette même période, l'augmentation de la production de chaleur géothermale a évité l'émission de 1 Mt supplémentaire de CO₂ et la non-consommation de 346 ktep d'énergie fossiles (<https://www.thinkgeoenergy.com/how-geothermal-energy-impacts-air-pollution-and-emissions-in-italy/>)

² <https://www.egec.org/media-publications/egec-geothermal-market-report-2018/>

³ En comparaison à d'autres dommages qui pourraient être liés à la sismicité anthropique. Cela ne signifie néanmoins pas que ces dommages et que ce risque soient acceptables

d'événements est significatif mais est à mettre en relation avec les nombreuses opérations de géothermie profonde qui fonctionnent sans accident.

Les questions que pose le risque de sismicité induite lié à la géothermie profonde peuvent être de 3 ordres :

- la meilleure compréhension du phénomène et la capacité à discerner ce qui relève de la sismicité naturelle et de la sismicité anthropique ;
- l'amélioration des dispositifs techniques et réglementaires pour maîtriser le risque⁴ ;
- la prévention de dommages humains et matériels au sein de la population⁵.

L'objectif de ce rapport est de contribuer au 1^{er} point. En faisant un état de l'art de la sismicité anthropique liée à la géothermie et en revenant sur les événements marquant en la matière.

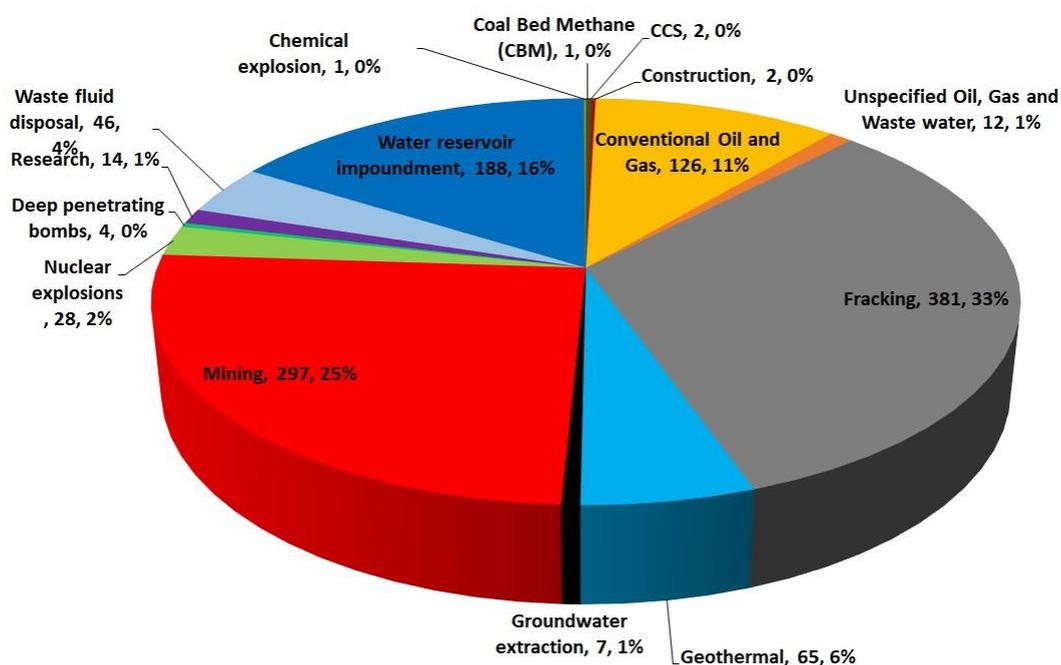


Figure 1 : Proportion et causes de sismicité induite, d'après HiQuake⁶.

⁴ Il existe une littérature scientifique spécialisée importante sur les techniques (dispositifs) de maîtrise du risque de sismicité induite en géothermie (e.g. projet européen GEISER, Majer *et al.*, 2012...). Dans ce rapport nous détaillerons la législation française en vigueur au moment de la rédaction qui encadre les opérations de géothermie au regard de la sismicité induite. Les retours d'expérience réalisés dans ce rapport n'ont pas vocation à fournir directement des préconisations en la matière. La prise en compte du contexte réglementaire et des dispositifs de surveillance pourra néanmoins permettre de mettre en avant des bonnes pratiques.

⁵ Comme toute activité industrielle, l'exploitation géothermique comporte des risques et des nuisances. Le rapport de l'INERIS (Gombert *et al.* 2017) indique que

« Ainsi donc, si l'on exclut les accidents très particuliers de Agua Shuca, Zunil 1 et Ahuachapan 2, survenus dans des circonstances peu transposables au contexte français, notre recensement fait état d'un mort et de neuf blessés en près de trois décennies de retour d'expérience et sur environ 1700 centrales géothermiques actuellement en fonctionnement ». Il convient de noter que les accidents auxquels il est fait référence sont dus à des « explosion, projection, rejet toxique, rejet écotoxique », qui n'ont donc pas de rapport avec la sismicité induite. Étant donné la date de publication de ce rapport, il ne pouvait pas tenir compte de l'accident de Pohang cité précédemment.

⁶ <http://inducedearthquakes.org/graphs/>

Dans ce rapport, nous avons pour but d'expliquer les modifications du sous-sol introduites par l'exploitation de la ressource géothermale qui sont susceptibles de générer de la sismicité. Nous aborderons également la manière dont ces activités sont encadrées réglementairement et comment elles sont surveillées pour limiter la sismicité induite. Nous nous attacherons par la suite à 5 cas d'études d'opérations de géothermie profonde ayant généré de la sismicité pour bien exposer dans quel contexte ces séismes ont eu lieu. Enfin nous expliciterons de manière plus technique les informations généralement fournies pour définir un séisme et sa cause. Nous chercherons systématiquement à faire référence aux exemples d'opérations en France pour exposer en quoi elles se rapprochent ou diffèrent des points abordés. Nous insistons bien sur le fait que toutes les opérations de géothermie profonde ne génèrent pas de la sismicité induite et qu'il n'y a que dans quelques contextes bien spécifiques qu'il convient de se préoccuper de ce phénomène.

Nous nous attachons à donner des ordres de grandeur des phénomènes. Cependant, le sous-sol est un milieu complexe et il est difficile de généraliser. Pour caractériser certaines grandeurs (à quelle distance d'un forage un [séisme induit](#) peut se produire par exemple) nous nous appuyons sur les cas d'étude mais ces valeurs sont uniquement des ordres de grandeur et ne constituent en aucun cas une vérité absolue.

On utilisera le terme de **séisme anthropique** pour inclure les séismes [induits](#) et [déclenchés](#) d'après la terminologie de l'Ineris.

Nous nous attachons à l'explication du phénomène donc nous parlons souvent de séismes. Dans un contexte de prévention, il est souvent nécessaire de parler de [risque sismique](#). Le risque sismique en un endroit donné est la combinaison (1) de la probabilité qu'un séisme de magnitude donnée se produise, (2) des enjeux économiques et humains (concentration de population par exemple) et (3) de la vulnérabilité (est-ce que les bâtiments sont construits pour résister à des séismes de la magnitude regardée). Par conséquent, le [risque sismique](#) sera différent selon la localisation du site de géothermie.

Nous abordons les explications des phénomènes scientifiques à la fin du rapport (chapitres 8 et 9), afin que ce dernier puisse se lire sans aborder ces aspects, si nécessaire. Il faut cependant préciser ici que le déclenchement de sismicité anthropique n'est pas uniquement causé par une injection de fluide dans une [faille](#) mais peut avoir d'autres sources (l'activité anthropique modifie l'état d'équilibre du sous-sol).

Nous utilisons, quand c'est possible, des documents de référence en français, notamment deux rapports de revue de l'Ineris. L'explication originelle n'est pas toujours dans ces documents, mais ils fournissent déjà des premières explications détaillées.

Nous utilisons le système d'unités internationales dans ce rapport. Cependant, les mesures de pression sont souvent données en bar dans les mesures réglementaires ou les rapports. Nous indiquerons donc entre parenthèse la valeur équivalente en bar, sachant que 1 bar = 0,1 MPa.

2. Présentation de la géothermie

2.1. LA GÉOTHERMIE PROFONDE : USAGES ET PRODUCTIONS

2.1.1. Usages

La géothermie profonde valorise l'énergie du sous-sol profond (au-delà de 200 mètres) pour produire de la chaleur et/ou de l'électricité⁷.

Produire de la chaleur

La France compte 59 réseaux de chaleur urbains alimentés par la géothermie profonde (les énergies fossiles, la biomasse ou la chaleur de récupération peuvent aussi alimenter de tels réseaux de chaleur). Ils se situent surtout en Île-de-France, région qui concentre la plus grande densité de ces installations en Europe, mais aussi en Nouvelle-Aquitaine, Grand Est, Occitanie et Centre-Val de Loire.

En dehors du chauffage de bâtiments, la géothermie profonde peut être exploitée pour chauffer des serres ou des bassins de pisciculture (plusieurs installations de ce type existent en France), ou être utilisée pour des procédés industriels. C'est le cas par exemple dans le nord de l'Alsace avec l'usine Roquette Frères située à Beinheim en bordure du Rhin, alimentée en chaleur géothermique à 160 °C via un réseau de chaleur de 15 km de longueur.

Cette géothermie est souvent appelée d'usage direct. En effet, elle valorise généralement la chaleur de l'eau chaude présente dans des [aquifères](#) profonds directement (sans l'aide d'une pompe à chaleur). La température nécessaire pour alimenter directement un réseau de chaleur se situe entre 50 et 90°C, selon l'utilisation qui est faite de la chaleur en surface. Dans des régions à gradient géothermique normal, il faut descendre à des profondeurs situées entre 1 000 et 2 500 m pour trouver des eaux couvrant cette gamme de températures.

Produire de l'électricité

La géothermie profonde permet également de produire de l'électricité lorsque les températures du [réservoir](#) géothermique dépassent 100°C.

Contrairement aux énergies renouvelables variables (solaire, éolien...), il s'agit d'une électricité qui peut être produite, en base, pratiquement 24 h/24 à puissance nominale et ce, pendant toute l'année.

Les ressources géothermiques valorisables sont présentes principalement dans des [réservoirs](#) naturels fortement fracturés, localisés dans des zones de volcanisme actif ou récent, généralement entre 500 et 1500 m de profondeur. Les températures rencontrées peuvent atteindre jusqu'à 250-350 °C. En France, les ressources sont potentiellement présentes dans les territoires d'Outre-Mer, comme c'est le cas en Guadeloupe avec le site de Bouillante. La taille moyenne de ces centrales est comprise entre 10 et 50 MW.

⁷ Pour des éléments sur la géothermie de surface, voir <https://www.geothermies.fr/les-geothermies>

Les ressources valorisables pour la production d'électricité géothermique se rencontrent également dans des zones géologiquement stables mais à des profondeurs beaucoup plus élevées (plusieurs milliers de mètres) dans des [réservoirs](#) fracturés naturellement, comme c'est le cas en Alsace. Malgré la profondeur atteinte, les températures rencontrées sont moins élevées qu'en zone volcanique (130 à 200 °C) et nécessitent une technologie de conversion thermo-électrique différente (celle des centrales à fluide organique, dites [ORC](#)). La puissance de ces centrales est de quelques MW.

Une centrale existe actuellement en France métropolitaine, à Soultz-Sous-Forêts, au nord d'Haguenau dans le Bas-Rhin. D'autres projets de ce type sont actuellement en cours de réalisation en Alsace, et à venir dans d'autres régions, avec la possibilité pour ces projets de combiner de la production d'électricité et de la production de chaleur⁸.

Produire de l'électricité et de la chaleur simultanément

Produire simultanément de l'électricité et de la chaleur permet d'améliorer l'économie des projets à partir du moment où il existe effectivement à proximité de la centrale des besoins thermiques à satisfaire.

Deux projets sont actuellement en cours de réalisation :

- la centrale de cogénération de l'Écoparc Rhénan à Vendenheim (Eurométropole de Strasbourg), dans le cadre du [projet Geoven](#) conduit par la société Fonroche Géothermie ;
- la centrale de cogénération du Parc Innovation de Strasbourg à Illkirch-Graffenstaden (Eurométropole de Strasbourg), dans le cadre du [projet](#) conduit par Électricité de Strasbourg.

2.1.2. Production

En 2018, les capacités des centrales électriques géothermiques du monde représentent 13 329 MWe. Les États-Unis arrivent en tête (2 546 MWe), suivis de l'Indonésie (1 948 MWe) et des Philippines (1 926 MWe)⁹. La France produit 17 MWe (sites de Bouillante et Soultz-Sous-Forêts).

La France est le 2^e producteur de chaleur issue de la géothermie profonde de l'Union européenne (134,6 ktep : kilotonnes d'équivalent pétrole), derrière l'Italie (144 ktep) et devant la Hongrie (115 ktep) et l'Allemagne (100,1 ktep)¹⁰. La géothermie profonde représente 0,1 % des énergies renouvelables électriques françaises et 1 % des énergies renouvelables thermiques (géothermie de surface non comprise).

⁸ http://www.minergies.fr/sites/default/files/upload/carte_des_titres_ght_juillet_2019_v2.pdf

⁹ Renewables 2019 global status report, REN21 https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2019_full_report_en.pdf

¹⁰ CGDD (2019), [Chiffres clés des énergies renouvelables - Edition 2019](#)

	Consommation finale brute d'énergies renouvelables (EnR) en ktep
Total ENR électriques, thermiques et carburants	25 553
Total ENR électriques	8 848
<i>dont électricité issue de la géothermie profonde</i>	11
Total ENR thermiques	13 370
<i>dont géothermie profonde</i>	170
<i>dont géothermie de surface</i>	270

* Source CGDD (2019), [Chiffres clés des énergies renouvelables - Edition 2019](#)

Tableau 1 : Part de la géothermie dans la consommation finale brute d'énergies renouvelables française en 2017.*

2.2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

2.2.1. Les ressources

Les ressources de géothermie profonde se concentrent généralement en France sur 3 types de territoires (Figure 2):

- dans les [aquifères](#) profonds pour un usage direct en réseau de chaleur notamment (typiquement bassin parisien) ;
- dans les zones volcaniques pour la production d'électricité (typiquement Guadeloupe) ;
- dans les fossés d'effondrement pour la production d'électricité et/ou de chaleur par cogénération (typiquement Alsace).

Il faut accéder à la ressource puis la capter afin de pouvoir produire et diffuser l'énergie.

2.2.2. Le captage de la ressource, le principe du doublet

L'exploitation de la ressource géothermique par doublet nécessite deux forages : un forage de production et un forage de réinjection (Figure 3). L'eau chaude est extraite. Une fois en surface, elle cède ses calories à un fluide caloporteur (échangeur de chaleur pour les réseaux de chaleur ou usages industriels). Le fluide géothermal, refroidi, est ensuite réinjecté, suffisamment loin du puits de production de façon à ne pas refroidir le [réservoir](#).

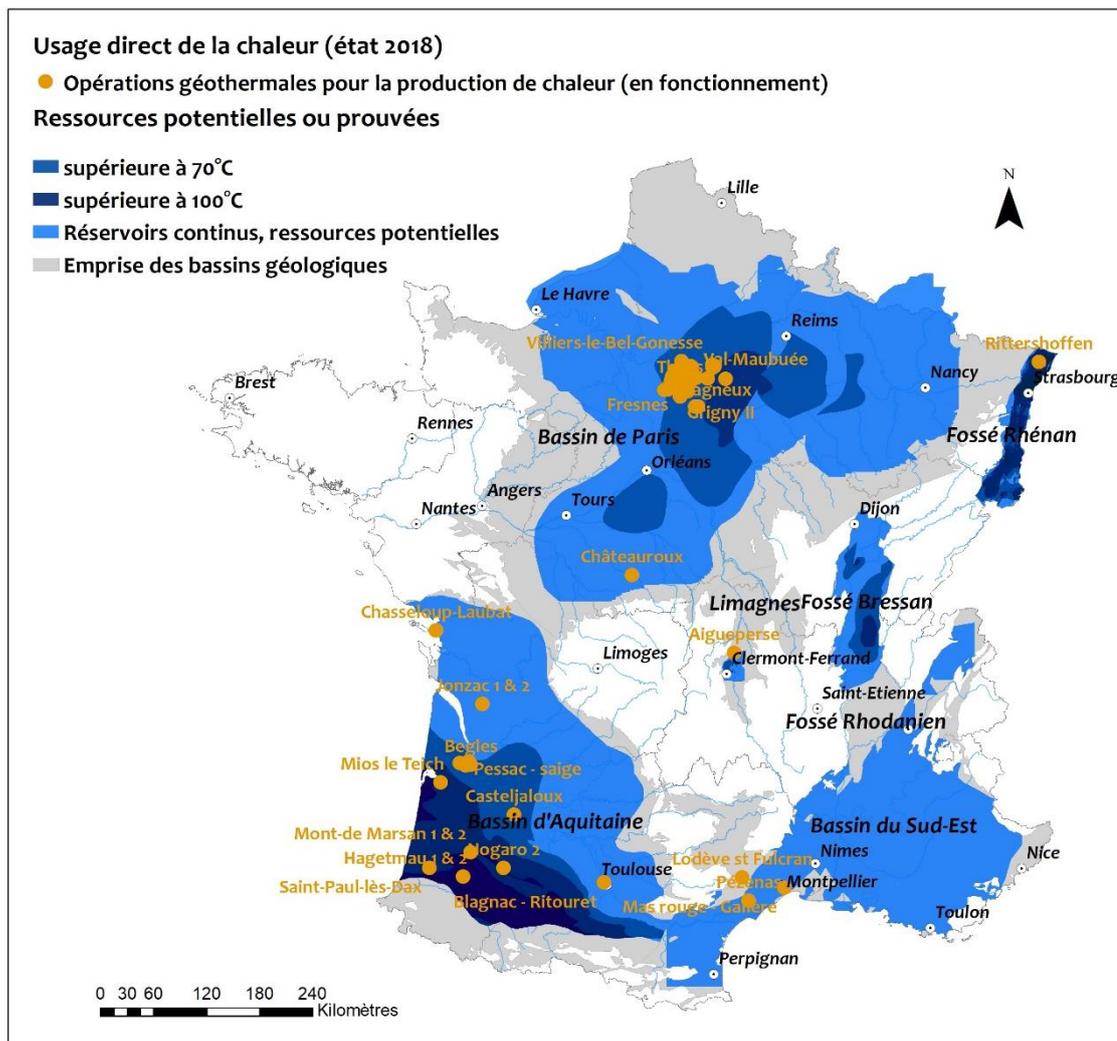


Figure 2 : Ressources en aquifères profonds en métropole et opérations © BRGM.

Les exploitations se construisent sur des réservoirs de forte perméabilité, capables de fournir des débits de production élevés. Quand les caractéristiques de porosité ou de perméabilité sont trop faibles, on peut avoir recours à des stimulations. Le principe de ces méthodes est expliqué dans le projet européen DESTRESS (Zimmermann et Blöcher). Suivant les caractéristiques du réservoir à améliorer, différentes méthodes de stimulation peuvent être utilisées (suivant les cas une seule méthode ou une combinaison de ces méthodes sont utilisées).

Il existe 3 types de stimulations :

- les stimulations hydrauliques : il s'agit de développer de nouvelles fractures ou d'améliorer les caractéristiques hydrauliques de fractures préexistantes en injectant du fluide à fort débit ;
- les stimulations chimiques : il s'agit d'améliorer les chemins hydrauliques par l'injection de fluides avec des additifs chimiques pour dissoudre certains minéraux. Par rapport aux autres stimulations, les stimulations chimiques impactent plutôt le volume proche puits, dans les premiers mètres autour du puits. On distingue généralement trois types de stimulation chimique : le lavage acide, l'acidification de la matrice et l'acidification de fractures. Le lavage acide a pour but de nettoyer le puits et de dissoudre les dépôts dans le forage. Les deux autres méthodes visent la roche elle-même ou les fractures ;

- les stimulations thermiques : il s'agit d'injecter de l'eau froide pendant quelques jours à quelques semaines pour stimuler le réseau de fractures. La différence de température entre l'eau et la roche mène à une redistribution des contraintes qui active le réseau de fractures ou génère de nouvelles fractures. L'effet des stimulations thermiques est similaire aux stimulations hydrauliques.

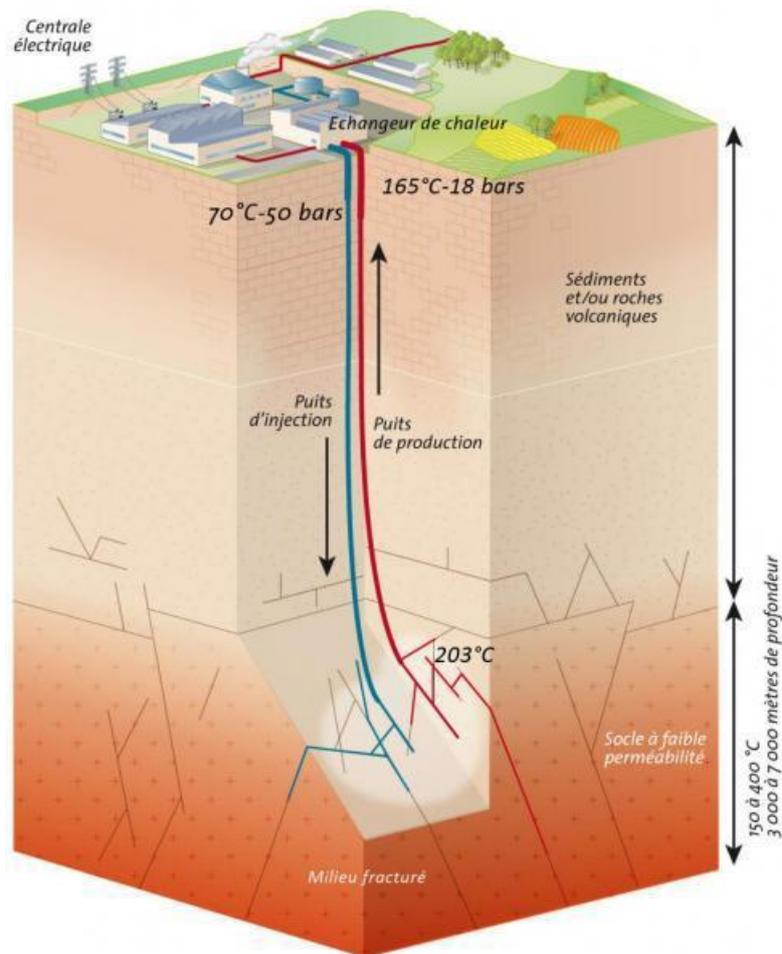


Figure 3 : Schéma conceptuel expliquant le fonctionnement d'un doublet géothermique. © BRGM.

3. Les activités industrielles à l'origine de sismicité

3.1. LES SOURCES DE SISMICITÉ ANTHROPIQUES

La sismicité anthropique a de nombreuses sources, la géothermie n'est que l'une d'entre elles. Contrucci et Klein (2017) ont étudié les différentes origines anthropiques des séismes. Elles retiennent comme activités industrielles pouvant générer de la sismicité : l'injection d'eaux usées, les barrages, les hydrocarbures, l'activité minière incluant les tirs de carrière et la géothermie.

En France métropolitaine, une très grande partie de la sismicité anthropique est générée par les tirs de carrière. Les vibrations dans ce cas sont générées par des explosions en surface, et ont des magnitudes équivalentes allant jusqu'à $M_w > 2$ (catalogue [RéNaSS](#)); cependant l'intensité observée diminue très vite avec la distance de tir. Les tirs de carrière font déjà l'objet d'une réglementation spécifique (arrêté ministériel du 22 septembre 1994) qui impose une limitation de l'accélération maximale mesurée sur le bâtiment le plus proche du tir.

Les événements sismiques dus à la géothermie en Europe sont de plus faible magnitude que les événements de [sismicité induite](#) imputables à d'autres sources anthropiques (Figure 4). Cela signifie que la géothermie peut s'appuyer sur l'expérience de ces autres secteurs pour appréhender ce risque.

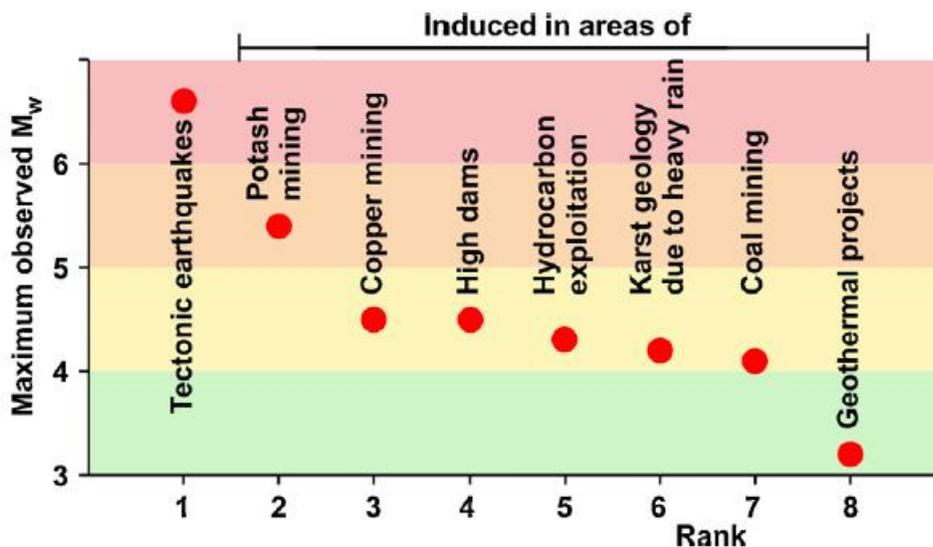


Figure 4: Classement des magnitudes maximales observées selon les sources de sismicité en Europe centrale. D'après (Grünthal, 2014). Du rang 1 au rang 8 les sources sont: séismes tectoniques (i.e. naturels), mines de potasse, mines de cuivre, grands barrages, exploitation d'hydrocarbure, fortes pluies dans un contexte géologique particulier (karst), mines de charbon et projets géothermaux.

3.2. GÉOTHERMIE COMME PROCESSUS DÉCLENCHANT DE LA SISMICITÉ

Lors d'un projet de géothermie, du fluide est pompé dans un puits et réinjecté dans le sous-sol dans le second puits. Les mécanismes, décrits en détail dans le chapitre 0, peuvent donc déclencher de la sismicité. Le risque de sismicité varie suivant les phases d'un projet de géothermie et les caractéristiques géologiques, hydrauliques et mécaniques de la zone.

3.2.1. Phases d'un projet de géothermie

Un projet de géothermie profonde se déroule en plusieurs phases : l'exploration pour déterminer où se trouve la ressource, le forage pour atteindre la ressource, les tests d'injection pour évaluer la ressource et les éventuelles [stimulations](#) pour améliorer l'injectivité, l'exploitation et l'abandon.

- Lors de la phase d'exploration, il n'y a pas de sismicité associée puisque l'on ne modifie pas le sous-sol. Les seules vibrations potentielles sont liées aux opérations de géophysique pour mieux connaître le sous-sol. Il est fréquent d'utiliser des camions-vibreurs pour regarder comment les vibrations se propagent dans le sous-sol, ce qui permet de le caractériser. La réglementation associée à ces opérations est a priori celle des tirs de mine, avec limitation de l'accélération mesurée sur le bâtiment le plus proche.
- Il est possible de générer de la sismicité induite lors de la phase de forage mais c'est généralement de la [microsismicité](#) et elle est très faible. Le [risque sismique](#) lors de la phase de forage a été classé peu probable par l'Ineris (Gombert *et al.*, 2017). Lors du forage de Pohang, étudié en détail dans le chapitre 0, de la microsismicité ($M_{w_{max}} 0.9$) a été détectée pendant le forage lors de pertes de boue.
- La phase de test et de [stimulation](#) est la phase durant laquelle le risque de sismicité anthropique est le plus élevé (Gombert *et al.*, 2017). La plupart des cas de sismicité anthropique enregistrés se sont produits durant cette phase. Lors des [stimulations](#), le but recherché est d'améliorer la productivité et/ou l'injectivité. On essaie alors de réactiver des fractures, ce qui va générer de la [microsismicité](#). Cette phase est d'une durée limitée et la sismicité est surveillée étroitement pendant cette période. Cependant, tous les sites de géothermie profonde ne nécessitent pas de la [stimulation](#).
- La phase de production (ou d'exploitation) est la phase durant laquelle de la microsismicité est couramment enregistrée mais peu d'exemples de séismes ressentis existent (parmi eux, le séisme de Landau de magnitude $M_{L2.7}$ étudié au chapitre 0). Le risque de sismicité anthropique est donc peu probable à ce moment là (Gombert *et al.*, 2017). Les exemples des sites de Soultz et de Rittershoffen en Alsace montrent une absence de sismicité ressentie pendant l'exploitation (Cuenot and Genter, 2015; Maurer *et al.*, 2020).
- À la fin de la production, les puits sont fermés et abandonnés. Il existe peu d'exemples de sites à ce niveau de développement. Cependant, aucune sismicité importante à cette phase n'est attendue, puisque les interventions dans le sous-sol sont en principe arrêtées.

3.2.2. Paramètres impactant le risque de sismicité

Il y a plusieurs paramètres qui peuvent influencer l'occurrence de sismicité (Hirschberg and TA-SWISS, 2015). Avant toute opération, certains paramètres, opérationnels et géologiques, peuvent donner une indication du comportement du [réservoir](#) (ce sont les variations hydrauliques, comme la modification de la circulation du fluide, et mécaniques, comme les redistributions de [contraintes](#), du [réservoir](#) qui vont déclencher de la sismicité) :

- **besoin de stimulation** : comme on l'a vu plus haut, durant la [stimulation](#) hydraulique, le risque de sismicité anthropique est plus important. Cela signifie que les sites qui n'ont pas besoin de [stimulation](#) ont un risque de séisme anthropique beaucoup plus faible. Traduit dans le contexte français, on a observé de la sismicité induite à Soultz (liée principalement aux stimulations hydrauliques et un peu de [microsismicité](#) liée à l'exploitation) par exemple mais beaucoup moins à Rittershoffen (les quelques micro événements générés mais non ressentis sont liés à la [stimulation](#) hydraulique sur un puits et à la production). Les stimulations chimiques et thermiques peuvent également générer de la sismicité mais a priori de manière plus limitée. Il est cependant difficile d'attribuer un microséisme à une réaction chimique ou thermique car

lors de ces deux [stimulations](#) on injecte du fluide, il y a donc également un effet hydraulique. On suppose généralement que ces impacts hydrauliques dominent les effets chimiques et thermiques. En effet, les cas de séisme ressentis se sont en majorité produits lors de [stimulation](#) hydraulique ;

- **le volume de fluide injecté** : plus ce volume sera important, plus la probabilité d'affecter une [faille](#) et donc de déclencher un séisme sera grande (sachant que le volume impacté dépend des propriétés hydrauliques du milieu : perméabilité, emmagasinement...). Pour comprendre ce lien entre volume d'eau injecté et volume de roche impacté, on peut utiliser l'analogie suivante : plus on verse de l'eau dans un bac de sable, plus le volume de sable humidifié grandit. Cette dépendance entre volume injecté et volume impacté (tributaire des propriétés du milieu) implique que pour 2 sites d'injection différents, le risque d'induire un séisme sera différent ;
- **les changements de pression**: plus (le différentiel de) la pression varie et plus ces variations sont rapides, plus le risque de [séisme induit](#) est élevé. Cette variation de pression s'entend au niveau d'une [faille](#). Le lien entre cette variation de pression dans la roche et la variation de pression mesurée dans le forage n'est pas direct, il dépend des propriétés de la roche et des fractures. Il n'est donc pas toujours évident de relier une variation de pression dans le puits à un séisme donné (qui peut indiquer une variation de pression là où le séisme a eu lieu). De plus, le niveau de pression à partir duquel de la [microsismicité](#) est déclenchée est difficile à évaluer. En effet, dans beaucoup de cas, la [microsismicité](#) commence à partir d'un certain niveau de pression. Mais il est aussi possible qu'une très faible variation déclenche un microséisme dans le cas où la [faille](#) affectée était déjà naturellement proche de la rupture. Cette variation de pression se produit typiquement pendant les phases de [stimulation](#) mais aussi en phase de production, localement autour des forages ou si un site est soudainement à l'arrêt par exemple ;
- **débit entrant = débit sortant** : lorsque la réinjection du fluide géothermal est totale (débit entrant = débit sortant), l'opération va atteindre un état permanent (stabilisé) et le changement de pression devrait rester confiné à un certain volume. La [microsismicité](#) dans de tels systèmes devrait se stabiliser dans le temps. Dans des systèmes où le volume réinjecté est différent du volume produit (ou si la réinjection a lieu dans un horizon différent), l'effet de la pression ou de la déformation augmente avec le temps, et la sismicité dans de tels systèmes est plus variable. Des augmentations soudaines du taux de sismicité sont possibles quand des zones à la limite de la rupture sont atteintes par la variation de pression/déformation. La sismicité observée dans ces systèmes est soit sporadique, soit augmente avec le temps ou est constante. En France métropolitaine, le fluide est totalement réinjecté dans le même horizon géologique pour la quasi-totalité des opérations de géothermie profonde. A Bouillante, on est dans le cas d'une réinjection partielle, mais aucun indice de sismicité liée à cette réinjection n'a été relevée avec les moyens d'observation sur place ;
- **proximité d'une faille active** : si une [faille active](#) est proche, l'injection de fluide augmente le risque de séisme ;
- **profondeur** : on suppose en général que les systèmes profonds produisent des séismes anthropiques plus importants car les [contraintes différentielles](#) augmentent avec la profondeur. De la même façon, les séismes naturels sont moins fréquents à faible profondeur (1 à 3 km de profondeur) qu'à grande profondeur (10 km). Cependant, il y a peu de preuves empiriques de cette dépendance avec la profondeur ;
- **type de roche** : les roches cristallines de socle sont généralement supposées plus sismiques que les roches sédimentaires. Les projets géothermiques dans le bassin parisien ou aquitain ont pour cible des horizons sédimentaires alors que les projets géothermiques en Alsace ont pour cible la limite sédiment-socle ;

- **caractéristiques hydrologiques** : un [réservoir](#) en milieu poreux, où le fluide circule dans la matrice rocheuse, présente un risque moindre de sismicité anthropique comparé à un [réservoir](#) fracturé où le fluide circule majoritairement dans des fractures. Cela ne signifie pas qu'il ne peut pas y avoir de sismicité dans le premier cas mais simplement que la sismicité anthropique sera probablement de la sismicité déclenchée, si la variation de pression/déformation atteint une structure existante. Dans le cas des [réservoirs](#) en milieu poreux, la sismicité anthropique est souvent négligeable. C'est ce qu'on observe en France, avec aucune [microsismicité](#) enregistrée dans le bassin de Paris malgré de multiples exploitations géothermiques¹¹ mais une présence de microsismicité autour des sites géothermaux du fossé rhénan.

Ces paramètres sont évalués en amont des opérations mais seront recalibrés au fur et à mesure que la connaissance du site s'affine. Le risque sismique sera ainsi réévalué avec ces nouvelles informations.

Ces paramètres fournissent seulement une indication de l'aléa de sismicité induite : plusieurs paramètres peuvent jouer en même temps pour chaque site, et ces paramètres peuvent avoir une importance variable d'un site à l'autre. Dans le cas de la France métropolitaine, la [microsismicité](#) plus importante dans le fossé rhénan est due en premier lieu au besoin de [stimulation](#) (phase où le taux de sismicité est le plus important) puis aux caractéristiques hydrogéologiques et au type de roche, avec un milieu fracturé.

3.2.3. Zone d'influence de la sismicité (spatiale et temporelle)

Il est impossible de savoir a priori à quelle zone la sismicité anthropique va être circonscrite, puisqu'elle dépend des caractéristiques hydrogéologiques et mécaniques du milieu. Cependant, elle est en général limitée à une zone de taille kilométrique à plurikilométrique autour du forage (voir les cas d'étude chapitre 0) dans le cas de doublets géothermiques dans le fossé rhénan. Si la sismicité est liée à la diffusion de pression dans un volume homogène, cette sismicité s'organise en un nuage circulaire qui grossit avec le temps (la distance au point d'injection, i.e. au forage, du séisme le plus éloigné augmente avec le temps). C'est ce qu'on observe pour les événements localisés en A dans la Figure 5. Sinon la sismicité peut-être localisée suivant un plan dans le cas de réactivation d'une structure préexistante ou dans le cas du développement d'une nouvelle zone de cisaillement ou de création d'une fracture (localisations B, C, D) (Cornet, 2015).

¹¹ Il faut cependant noter que les sites géothermiques du bassin parisien ne sont pas instrumentés pour enregistrer la microsismicité. On peut donc affirmer avec certitude qu'il n'y a jamais eu de séisme anthropique ressenti dans le bassin parisien ni de séisme détectable par le réseau de surveillance national mais il n'est pas impossible que de la microsismicité se produise.

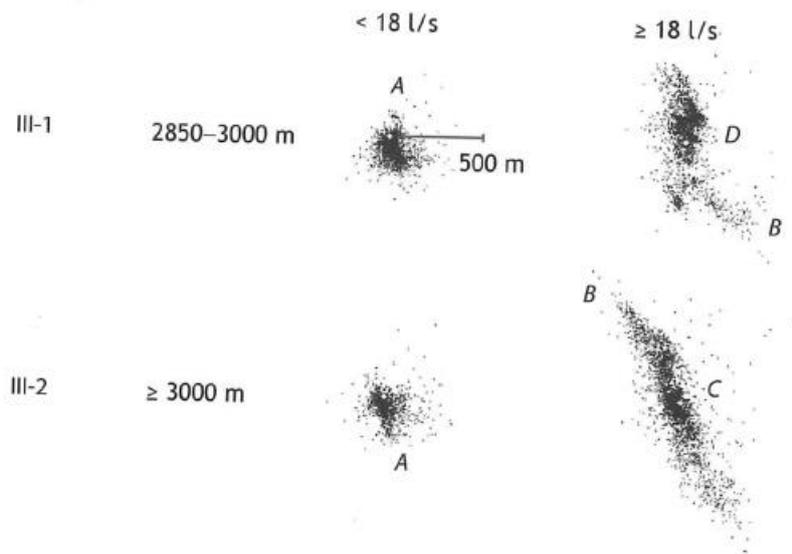


Figure 5 : *Microsismicité* pendant la *stimulation* hydraulique, à Soult-sous-Forêts, du puits GPK-1 en 1993. Projection horizontale des événements au-dessus (III-1) et en-dessous (III-2) de 3 000 m de profondeur. La sismicité s'organise en des géométries différentes suivant les paramètres d'injection et les caractéristiques mécaniques du milieu. (Cornet, 2015)

D'un point de vue chronologique, là encore, il est impossible de donner une réponse stricte mais dans le cas d'injection, la sismicité se produit pendant l'injection et dans les heures voire les jours qui suivent. Pendant l'exploitation (quand la centrale est en fonctionnement), la sismicité peut avoir lieu à n'importe quel moment mais le taux de sismicité est généralement plus bas que celui qui est observé pendant les phases de *stimulation* (la pression d'injection en production est normalement plus faible).

3.3. PARAMÈTRES OPÉRATIONNELS IMPACTANT L'OCCURRENCE DE SISMICITÉ ANTHROPIQUE

Nous avons vu, dans les chapitres précédents, les paramètres pouvant impacter le risque de sismicité anthropique. Lors d'un projet de géothermie (et d'injection de fluide en général) il y a six paramètres principaux sur lesquels il est possible d'influer :

- (1) la pression d'injection ;
- (2) le débit d'injection ;
- (3) le volume net injecté ;
- (4) Le temps d'injection ;
- (5) la température du fluide ;
- (6) la chimie du fluide.

Pour la pression, on se réfère généralement à la pression en tête de puits c'est-à-dire à la pression appliquée à la surface. Cette pression correspond en fait à une surpression appliquée par rapport au niveau de référence. Plus on est profond dans le sol, plus la pression naturelle est grande donc une pression en tête de puits de 10 MPa n'aura pas la même importance à 1 km ou à 5 km. Cette surpression imposée doit être calibrée en fonction de plusieurs paramètres opérationnels, comme le type de *réservoir* mais aussi la profondeur du forage.

Le débit d'injection est un des paramètres opérationnels sur lequel il est possible d'agir. Lors d'une opération de géothermie un débit est imposé et la pression est mesurée. Le débit est le paramètre à ajuster en fonction de l'action que l'on veut réaliser.

Le volume de fluide injecté est aussi un paramètre important comme nous l'avons vu. En faisant la différence entre le volume de fluide produit et le fluide injecté, le volume de fluide extrait du réservoir est obtenu. Ce paramètre est important dans les phases de stimulation mais aussi pendant la production si tout le fluide n'est pas réinjecté. Certains auteurs (McGarr, 2014) ont tenté de relier le volume de fluide injecté à la magnitude maximale des séismes induits, cependant cela suppose que tout le glissement induit par les opérations est sismique d'une part et d'autre part cela n'est pas valable pour les séismes déclenchés comme Pohang.

Le temps d'injection est déterminant dans le design d'opérations de stimulation. Il faut déterminer pendant combien de temps injecter du fluide, et si cette injection se fait par paliers (la pression augmente progressivement) ou tout d'un coup.

De récentes études (Hofmann *et al.*, 2019) ont joué sur la temporalité des paliers d'injections pour tenter de stimuler avec une sismicité limitée. Ces opérations sont nommées stimulations cycliques et consistent en de nombreux cycles de stimulation avec des temps variés mais avec des niveaux de pression et des volumes limités (Figure 6). Cette méthode est en développement donc il n'est pas encore possible de conclure sur son succès.

Les modifications de température et de composition du fluide peuvent aussi impacter le risque de sismicité et sont des paramètres sur lesquels il est possible d'influer. Cependant, dans le contexte métropolitain où la température de réinjection n'est pas très éloignée de la température de la roche, ce paramètre se révèle moins important vis-à-vis de la sismicité. Dans le cas de Bouillante (Guadeloupe), l'absence de sismicité anthropique observée avec la réinjection semble montrer que ce paramètre n'influe pas pour ce site.

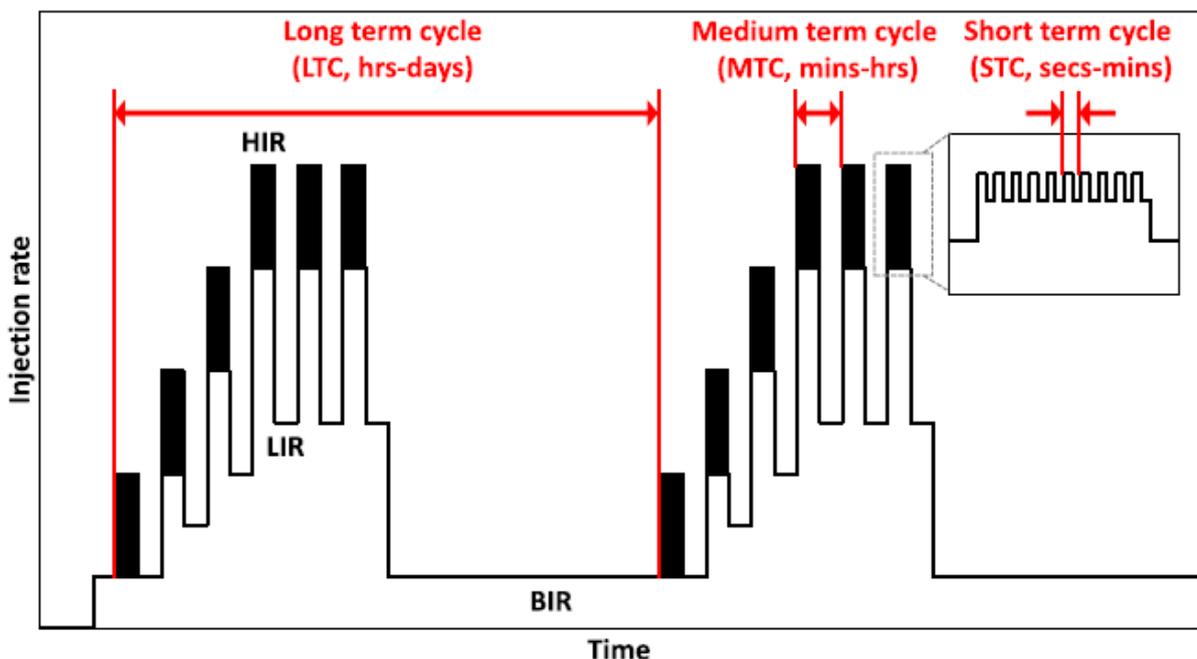


Figure 6: Protocole d'injection cyclique de fluide avec des cycles long-terme, moyen terme et court-terme. D'après (Hofmann *et al.*, 2019).

4. Différenciation sismicité naturelle - sismicité induite

Il n'est pas possible d'identifier un [séisme induit](#) directement par les enregistrements des signaux aux stations : les sismogrammes des [séismes induits](#) sont identiques aux sismogrammes des séismes naturels, puisque dans les deux cas des [failles](#) sont mises en jeu. L'attribution d'un séisme à des causes naturelles, anthropiques, ou les deux doit donc se faire par d'autres moyens.

Il est possible dans la majorité des cas d'attribuer un séisme à une activité humaine à cause de leur proximité temporelle et spatiale avec l'activité anthropique les ayant générés. Mais il arrive, dans certains cas, qu'un tel lien ne soit pas évident. Généralement les [séismes induits](#) sont faciles à attribuer mais les [séismes déclenchés](#) sont plus difficiles à attribuer à cause (1) du chargement tectonique et (2) des distances impliquées. D'autre part, les [séismes déclenchés](#) posent question puisqu'ils ont des magnitudes plus élevées et donc sont plus problématiques vis-à-vis des populations qui attendent une réponse sur l'origine de tels événements. Concernant les deux points problématiques dans l'attribution des [séismes déclenchés](#) :

- (1) l'énergie dissipée pour les [séismes déclenchés](#) provient en général de [forces](#) tectoniques (dues au mouvement des plaques tectoniques) et seulement une petite partie de l'énergie est générée par des activités anthropiques. Le problème est qu'il est difficile d'estimer le chargement tectonique préexistant, surtout en zone intraplaque comme l'essentiel de la France métropolitaine ;
- (2) le critère de distance, qui est un critère très regardé pour classer un [séisme induit](#), peut ne pas s'appliquer dans ces cas de sismicité [déclenchée](#) puisqu'une petite perturbation – dont l'origine peut donc être assez éloignée du point où elle se manifeste - suffit à déclencher le séisme.

Deux types de méthodes existent pour différencier les [séismes induits](#) des séismes naturels :

- les méthodes qualitatives basées sur des questions à réponse binaire (oui ou non) ;
- les méthodes quantitatives basées sur la probabilité qu'un séisme soit induit.

4.1. LES MÉTHODES QUALITATIVES

L'avantage des méthodes qualitatives est leur facilité de mise en œuvre. La deuxième famille d'approche est plus globale mais elle demande de disposer de beaucoup d'informations (qu'il est impossible d'obtenir dans certains cas), d'efforts et de temps (Verdon *et al*, 2019).

La première méthode qualitative a été publiée par Davis et Frohlich (1993) pour estimer si l'injection de fluide déclenche des séismes. Cette méthode est basée sur sept questions :

1. **sismicité usuelle** : est-ce que cet (ces) évènement(s) est(sont) le(s) premiers séisme(s) de ce type dans cette région ?
2. **corrélacion temporelle** : est-ce qu'il y a une corrélation claire entre l'injection et la sismicité ?
3. **corrélacion spatiale** : est-ce que l'[épiceutre](#) (les épiceutres) est (sont) près du puits (dans les 5 km) ?
4. **corrélacion spatiale** : est-ce que des séismes se produisent à ou près de la profondeur d'injection ?

5. **corrélation spatiale** : si ce n'est pas le cas, existe-t-il des structures géologiques connues qui puissent guider le flux vers la localisation des séismes ?
6. **pratiques d'injection** : est-ce que les variations de pression de fluide en fond de puits sont suffisantes pour induire des séismes ?
7. **pratiques d'injection** : est-ce que les variations de pression de fluide à l'[épicer](#) des séismes sont suffisantes pour induire des séismes ?

Si à ces sept questions au moins cinq réponses sont positives alors le(s) séisme(s) est (sont) probablement induit(s). Si au plus trois réponses sont positives alors le(s) séisme(s) est (sont) probablement naturel(s). Avec quatre réponses positives, il y a des indices que le(s) séisme(s) est (sont) induit(s) mais cela reste incertain. À partir de cette méthode de base, de nouvelles questions ont été élaborées (Davis *et al.*, 1995; Frohlich *et al.*, 2016) qui concernent d'autres cas (extraction de fluide ou sismicité historique potentiellement induite). Le nombre de questions et les réponses possibles (oui/non puis l'ajout de peut-être) ont changé dans ces nouvelles méthodes.

Ces méthodes sont utiles parce qu'elles permettent une réponse rapide et tranchée à la question : « est-ce qu'un séisme est induit ? ». Cependant, elles posent plusieurs problèmes, soulevés par Verdon *et al.* (2019) :

1. elles sont difficilement compréhensibles par le grand public et même par les industriels. Seuls les spécialistes savent ce que signifie un score de 3 sur l'échelle de Frohlich. De plus, comme différentes échelles existent, suivant les cas, un score de 3 va avoir des significations différentes ;
2. la même importance est assignée à toutes les questions mais certaines questions devraient avoir plus de poids. Par exemple, si des séismes similaires ont eu lieu avant le début de l'activité industrielle, cela suggère fortement que le séisme a une origine naturelle ;
3. ce mode de questionnement ne permet pas d'avoir une réponse nuancée prenant en compte les incertitudes. Une question à laquelle on répond « oui ? » aura le même poids qu'une question à laquelle on répond « oui ». Cela signifie qu'il n'est pas possible d'exprimer de l'incertitude. De la même manière, les questions pour lesquelles la réponse n'est pas connue aura un score de 0 ce qui fera pencher l'évènement vers « naturel » au lieu de « non déterminé ».

4.2. LES MÉTHODES QUANTITATIVES

Les méthodes quantitatives peuvent être séparées en trois méthodes : les modèles physiques (a), les modèles statistiques de [catalogues de sismicité](#) (b) et les modèles de physique de la source (c).

4.2.1. Les modèles physiques

Les modèles physiques sont robustes mais ils demandent beaucoup d'informations pour pouvoir être réalisés, ainsi qu'un temps de développement assez important. Par exemple, Passarelli *et al.* (2013) ont utilisé un modèle physique pour évaluer la sismicité liée à un dyke (intrusion de roche volcanique dans la roche encaissante). Ce modèle est basé sur l'équation (4) et sur une loi qui lie les paramètres mécaniques de la [faille](#) à la vitesse de glissement sur la [faille](#) (Dieterich, 1994) pour en déduire un nombre d'évènements attendu au cours du temps. À partir de cette estimation et d'un théorème statistique, ils en déduisent la probabilité qu'un évènement soit déclenché. L'avantage de cette méthode est qu'elle utilise des paramètres physiques et fournit le résultat en terme de probabilité (et non en résultat oui/non sans information sur l'incertitude de

cette réponse). Cependant, elle est très lourde à mettre en place, demande beaucoup d'informations (une idée précise du niveau de sismicité avant que le forage ne soit fait et un modèle géomécanique pour estimer la variation de [contrainte](#) induite entre autres) et est dépendante des hypothèses faites pour calculer les paramètres physiques.

4.2.2. Les modèles statistiques

Les modèles statistiques de sismicité prennent en compte les [forces](#) tectoniques et une loi pour simuler les [répliques](#) des séismes. Ces modèles sont utilisés pour reproduire la sismicité avant la perturbation anthropique. À partir des paramètres obtenus, la sismicité après la perturbation est reproduite. Si le résultat obtenu est très différent de la sismicité observée (en tenant compte des incertitudes des paramètres), la sismicité est considérée induite. Cette méthode est adaptée pour établir une corrélation entre la variation du nombre de séismes pendant une période donnée et une activité industrielle uniquement (elle n'est pas adaptée pour estimer si un séisme précis est induit). Ces modèles demandent des [catalogues de sismicité](#) bien établis, qui ne sont pas toujours disponibles, surtout pour la période avant l'activité industrielle. Par exemple, dans le contexte français de sismicité modérée, il y a très peu de données sismiques enregistrées avant les opérations. Le réseau régional n'ayant pas la précision d'un réseau local, il est impossible de déterminer si ce manque d'observations est dû à une couverture limitée du site ou à une absence de séismes naturels. L'autre problème de cette méthode est que, parfois, il n'y a pas de corrélation directe entre une variation de l'activité industrielle et le changement de taux de sismicité (par exemple la séquence de Prague en Oklahoma¹² est considérée comme induite mais aucune corrélation évidente n'a pu être établie entre cette sismicité et le taux d'injection des eaux usées (Keranen *et al.*, 2013)).

4.2.3. Les modèles de physique de la source

Les modèles de physique de la source s'appuient sur la détermination de mécanismes au foyer (représentation graphique de la source d'un séisme) qui peuvent avoir des caractéristiques différentes lors de [séismes induits](#) (dans le cas de rupture en tension lors de l'injection de fluide, ou d'une implosion pour l'effondrement d'une mine...). Cependant, même si dans de rares cas, des mécanismes spécifiques sont obtenus, ces modèles peinent à éclairer les phénomènes mis en jeu pour la sismicité observée. Pour l'injection de fluide par exemple, les ruptures se produisent généralement le long de fractures préexistantes souvent idéalement orientées pour glisser (car le fluide ne fait que faciliter le glissement). Leur mécanisme est donc le même que les autres événements régionaux. En conséquence, cette méthode n'est adaptée qu'à un très faible nombre de cas pour la géothermie.

¹² 3 séismes de magnitude MW5.0, 5.7 et 5.0 ont eu lieu en 2010-2011 à Prague en Oklahoma. Ces séismes se sont produits 18 ans après le début de l'injection d'eaux usées. En général, la sismicité se produit dès le début de l'injection. Ici, ce n'est pas le cas, avec le premier séisme enregistré 17 ans après le début de l'injection. Il est à noter que cette absence de sismicité peut-être partiellement due à l'absence de [sismomètre](#) à proximité, ce qui ne permet pas de détecter les petits séismes.

5. Surveillance, prévention et mitigation

5.1. SURVEILLANCE DE LA SISMICITÉ ANTHROPIQUE

Pour surveiller et gérer la sismicité anthropique, des [sismomètres](#) sont utilisés, comme pour la sismicité naturelle. Les [sismomètres](#), placés à la surface du sol ou parfois dans des forages de quelques dizaines de mètres de profondeur, enregistrent les mouvements du sol. A partir de plusieurs enregistrements, on peut définir la localisation du séisme ([hypocentre](#)) et sa magnitude.

La surveillance globale du territoire français s'appuie sur plusieurs réseaux de [sismomètres](#) :

- le RéNaSS, opéré par plusieurs instituts de recherche (INSU, BRGM) et couvrant le territoire métropolitain ;
- le LDG, opéré par le CEA et couvrant principalement les installations nucléaires ;
- les Antilles et la Réunion sont couverts chacun par un réseau sismologique opéré par l'observatoire volcanologique local, avec l'appui de l'IPGP ; Mayotte, suite à la crise ayant débuté en 2018, est équipé de stations opérées par différents instituts et centralisées par un observatoire nouvellement créé (ReVoSiMa, géré par l'IPGP avec l'aide du BRGM et du RéNass).

En 2020, il est prévu que le réseau RESIF (nouvelles stations et intégration des stations existantes) soit finalisé avec 200 [sismomètres](#) installés en France. Tous ces réseaux permettent une surveillance globale des événements sismiques les plus importants mais ne permettent pas une gestion fine des exploitations du sous-sol.

De ce fait, un réseau de surveillance microsismique est important pour les raisons suivantes :

- il permet d'évaluer plus complètement l'impact des opérations de géothermie sur le sous-sol en terme de sismicité ;
- en installant un réseau de surveillance avant toute opération, la sismicité naturelle sur le site est caractérisée plus précisément au niveau local.

Pour surveiller la [microsismicité](#), il est nécessaire d'avoir plusieurs stations d'écoute à proximité de l'opération. Puisque les magnitudes des événements à détecter sont faibles, ils ne peuvent pas être enregistrés loin du site (les [sismomètres](#) doivent être à moins d'une dizaine de km du site pour enregistrer la [microsismicité](#)). Les [sismomètres](#) sont directement connectés à des centres de surveillance qui détectent automatiquement les événements. Cette surveillance permet de suivre l'évolution du [réservoir](#) et de mettre en place un système d'alerte précoce, en cas d'événement anthropique ou en cas de crise sismique élevée, en modifiant les paramètres opérationnels (débit, pression d'injection...). La surveillance de cette sismicité est couplée à la surveillance du débit d'injection, des pressions d'injection et des volumes injectés et extraits. Tous ces paramètres permettent de mieux suivre l'évolution du [réservoir](#) et d'essayer d'adapter les conditions opérationnelles à des variations importantes.

La sismicité anthropique est le sujet de beaucoup de recherches (par exemple, il y a eu 3 sessions spécifiquement dédiées au sujet à la conférence européenne EGU 2019 avec 79 présentations). Des bonnes pratiques sont dégagées pour la géothermie, afin de pouvoir mieux comprendre les phénomènes et de mettre en place les outils de prévention les plus efficaces possibles. Les bonnes pratiques comprennent (GEOENVI : Ragnarsson *et al.*, 2020) :

- une analyse détaillée de la géologie et une étude sismotectonique pour identifier les [failles](#) capables de générer des séismes importants ;

- l'utilisation de technologies qui maintiennent un équilibre entre le fluide produit et réinjecté et qui minimisent les variations de pression en profondeur ;
- l'installation d'un réseau local de surveillance sismique ;
- des protocoles opérationnels définis conjointement par les opérateurs et l'organisme de régulation (e.g., des protocoles de [stimulation](#) hydraulique et des feux de signalisation) pour réduire la possibilité d'un événement ressenti, et pour réduire l'effet d'un événement s'il devait se produire (e.g. en arrêtant les activités) ;
- un dialogue transparent avec les publics pour les informer et répondre à leurs préoccupations.

5.2. LE SYSTÈME DES FEUX DE SIGNALISATION

Un outil largement utilisé pour contrôler la sismicité est le système de feux de signalisation (Contrucci and Klein, 2017; Mignan, 2013). Le système de feux de signalisation repose sur un réseau local de [sismomètres](#) qui enregistrent la sismicité. La sismicité peut être suivie en temps réel pendant les opérations où le risque de sismicité est important. Comme pour un feu de circulation, un feu vert signifie que tout va bien et que les opérations peuvent continuer. Lorsque le feu est orange, il commence à y avoir un niveau de sismicité trop élevé et donc il faut adapter les opérations. Quand le feu est rouge, le niveau d'alerte est atteint et il faut tout stopper progressivement.

Par exemple dans le cas de Bâle (voir chapitre 7.2) un système de feux de signalisation avait été mis en place, basé sur la réponse de la population (nombres d'appels téléphoniques), la magnitude et le PGV (voir chapitres 8.1 et 8.3 pour leur définition) (Håring *et al.*, 2008). 4 niveaux différents avaient été définis : vert, jaune, orange et rouge. Au niveau jaune, la procédure demandait de continuer à injecter mais de ne pas augmenter le débit et de prévenir le superviseur. Au niveau orange, il fallait avertir le superviseur et maintenir la pression en tête de puits sous la pression de [stimulation](#). Cette pression est définie par tranches de 48 h tous les jours. Au niveau rouge, il fallait avertir le superviseur, arrêter l'injection et [purger](#) le puits jusqu'à ce que la pression minimale en tête de puits soit atteinte. Ce système de feux de signalisation est défini par site et est principalement basé sur dire d'experts (Landtwing, *et al.*, 2013). Ces consignes ont été respectées à Bâle mais la survenance d'un événement sismique fort n'a pas pu être évitée, provoquant des dégâts, de vives réactions au sein de l'opinion et l'arrêt du projet. Cela a nui à la crédibilité du dispositif des feux de signalisation. Il a aussi été appliqué avec succès dans certains cas comme pour le forage géothermique en Finlande de 6 km de profondeur (Ader *et al.*, 2019).

Un des problèmes principaux du système de feux de signalisation est qu'il ne peut pas prendre en compte les événements qui se produisent après la fin des [stimulations](#), alors que c'est une occurrence fréquente (3 exemples sont présentés dans les cas d'étude). Une proposition pour améliorer ce dispositif est d'avoir recours à des feux de signalisation adaptatifs, tels que proposés dans le projet GEISER (Landtwing, *et al.*, 2013). Ils sont basés sur des modèles prédictifs, plutôt que de réagir à un événement d'une magnitude ou intensité donnée. Ces modèles sont basés sur la prédiction de la sismicité au temps $t+1$ (c'est-à-dire dans le futur proche) en fonction de la sismicité observée dans le temps $[0,t]$ (c'est-à-dire du début des observations jusqu'au moment du calcul). Ils sont donc « adaptés » en temps réel. Ces modèles sont en développement et n'ont pour l'instant été testés qu'a posteriori (e.g. Mignan *et al.*, 2017). Une autre méthode de feux de signalisation, proposée par Douglas et Aochi (2014), consiste à calculer le risque de générer un séisme ressenti, en une localisation précise, basé sur le [catalogue de sismicité](#) dans le temps $[0,t]$. Ce calcul suppose que le même niveau de sismicité est observé en $[t, t+1]$ donc il suppose que les niveaux de sismicité ne varient pas brutalement. Le risque peut ensuite être recalculé au temps $t+1$ en se basant sur le [catalogue de sismicité](#) dans le temps $[0, t+1]$. Des niveaux peuvent être générés pour modifier les opérations en conséquence de ce calcul de risque.

6. Règlementation française et implémentation par les opérateurs

La réglementation française concernant la sismicité induite a été clairement expliquée dans les rapports publics du projet GEOENVI. Par conséquent, nous traduisons ici en français ce qui a été exposé dans le cadre de ce projet (Maurer *et al.*, 2020; Valkering *et al.*, 2020) et complétons avec quelques détails pertinents. Nous exposons la réglementation et surtout le contenu des arrêtés préfectoraux tels qu'ils existent fin 2019. Les conséquences règlementaires du séisme de Strasbourg du 12 novembre 2019, déclaré potentiellement induit ou déclenché par le RéNaSS, ne sont pas encore connues et ne peuvent donc pas être prises en compte.

Le principe « pollueur payeur » établi dans la réglementation européenne est traduit dans le code minier. L'exploitant est donc responsable des dégâts qu'il cause. S'il y a un litige en cas de séisme sur son origine anthropique ou naturelle – ou sur le fait de savoir si certains dommages ont bien le séisme anthropique pour cause, une tierce expertise est mandatée (Contrucchi and Klein, 2017).

6.1. LES ARRÊTÉS PRÉFECTORAUX

Il n'y a pas de réglementation nationale sur la sismicité induite parce que le risque de sismicité induite dépend beaucoup des conditions géologiques et hydrauliques des sites. Il est impossible d'avoir une réglementation nationale unique qui serait soit pénalisante pour certains projets et donc trop lourde financièrement, soit trop légère au vu du risque encouru. La sismicité induite est donc encadrée à l'échelle des territoires par les arrêtés préfectoraux d'autorisations d'ouverture de travaux de forage et d'exploitation des concessions. Ces arrêtés définissent des mesures visant à limiter la sismicité anthropique lorsque cela pourrait présenter un risque. Dans le contexte français, il existe des sites de géothermie profonde dans 4 grandes zones :

- le bassin parisien : [aquifère](#) en milieu poreux exploité depuis les années 1970, aucune sismicité anthropique n'est associée à cette zone ;
- le bassin aquitain : [aquifère](#) en milieu poreux similaire au bassin parisien, aucune sismicité anthropique n'est associée à cette zone ;
- le fossé rhénan : [acquifère](#) fracturé nécessitant généralement des [stimulations](#) pour obtenir des conditions d'exploitation commercialement viables, de la sismicité anthropique peut se produire ;
- les zones ultra-périphériques avec le site de Bouillante : contexte volcanique, aucune sismicité anthropique notable n'a été observée.

Concernant les bassins parisien et aquitain, du fait du contexte particulier ne générant pas de sismicité anthropique mesurée et une sismicité naturelle très faible, aucune réglementation particulière sur la sismicité n'est imposée. Sur le site de Bouillante, la sismicité anthropique est traitée dans l'arrêté préfectoral d'exploitation. Il en est de même pour les sites alsaciens.

6.2. RÈGLEMENTATION ET SON IMPLÉMENTATION À BOUILLANTE, GUADELOUPE

Dans le cas de Bouillante, centrale géothermique en Guadeloupe, l'arrêté de réinjection datant de 2011 demande à l'exploitant d'« agir en concertation avec le BRGM » qui surveille la [microsismicité](#). Il n'y a pas d'autre exigence de surveillance, cependant les paramètres de réinjection sont clairement définis.

La sismicité est surveillée par le BRGM avec un réseau de 6 stations installées en 2004 (Jousset *et al.*, 2011). Avant cela, la [stimulation](#) du [réservoir](#) a été surveillée en 1998 et aucune sismicité anthropique n'a été détectée. Le réseau a été légèrement modifié en 2009, il est passé à 5 stations et l'une d'entre elle a été déplacée. À cause du climat tropical les stations se sont abimées et elles ont été réhabilitées en 2010. Cette réhabilitation était nécessaire pour préparer le suivi de la réinjection qui allait avoir lieu (dans les premières années d'exploitation, il n'y avait aucune réinjection). L'analyse des données entre 2004 et 2009 n'a révélée aucune sismicité anthropique et seulement une faible sismicité naturelle à proximité de Bouillante avec seulement 8 événements détectés à proximité du champ en presque 6 ans de surveillance (Contes, 2011). La surveillance de la sismicité a continué jusqu'en 2018, date à laquelle le réseau a cessé d'être fonctionnel. Au vu de l'absence de sismicité anthropique, même pendant la réinjection, il a été décidé de ne pas remplacer ce réseau.



Figure 7: Réseau sismologique de Bouillante. À gauche de 2004 à 2009 et à droite à partir de 2009. Les triangles rouges sont les stations actuelles et les triangles jaunes sont des positions possibles (non exhaustives) pour l'extension du réseau. D'après (Jousset *et al.*, 2011).

6.3. RÉGLEMENTATION ET SON ÉVOLUTION EN ALSACE

La surveillance de la sismicité induite associée à la géothermie profonde a commencé très tôt en France avec le développement du projet [EGS](#) de Soultz-sous-Forêts. Mais pendant longtemps, l'objectif de cette surveillance était la recherche (compréhension du [réservoir](#) : géologie, caractérisation des fractures, géochimie des fluides, température, sismicité induite...), sans aucune base légale. La première mention de surveillance sismologique dans la réglementation apparaît dans les autorisations de forage de Rittershoffen en décembre 2011. Cette autorisation couvre également les tests de puits, les tests de [stimulation](#) et les tests de circulation inter-puits.

Suite à l'occurrence de séismes anthropiques ressentis par la population à Soultz-sous-Forêts en 2000 et 2003, Bâle en 2006 et Landau en 2009 (Contrucci and Klein, 2017; Cuenot *et al.*, 2008; Häring *et al.*, 2008), la sismicité induite est devenue une des sources principales de préoccupation environnementale associée au développement des projets [EGS](#). Cela a incité les autorités (le préfet sur recommandations de la DREAL) à inclure une surveillance et des procédures à suivre en cas de séisme dans les autorisations de forage et d'exploitation.

La surveillance sismologique a été incluse dans les décrets préfectoraux d'autorisation de forage et d'exploitation pour les sites géothermiques en Alsace depuis 2011. Les règles imposées sont les mêmes pour les différents sites parce que ce sont des contextes géologiques et des

technologies d'exploitation similaires. Elles ont été élaborées en concertation entre les opérateurs concernés, la DREAL et des experts académiques¹³.

Les règles imposées dans ces décrets sont :

- information de la population sur l'activité hydraulique et la probabilité de sismicité induite ;
- installation d'un réseau de surveillance au moins 6 mois avant le début du forage pour étudier la sismicité naturelle locale. La description détaillée des caractéristiques du réseau requis est fournie : au moins 4 [sismomètres](#) courte-période plus une station multi-capteurs qui doit inclure un vélocimètre large-bande, un accéléromètre, une station géodésique (un récepteur GPS et un corner-cube pour l'interférométrie radar). Toutes les données de cette station multi-capteurs doivent être transmises et archivées par le RéNaSS (Réseau National de Surveillance Sismique, localisé à l'EOST, Université de Strasbourg). Le RéNaSS est chargé de diffuser les données de cette station en ligne sur son site ;
- définition d'une procédure pour adapter les opérations en cas de séisme anthropique. Cette procédure est basée sur des valeurs limites de taille de séisme. Jusqu'à l'arrêté préfectoral du 18 juillet 2016 pour l'exploitation de la centrale géothermique de Soultz-Sous-Forêts, ces valeurs limites étaient définies en magnitude. Il a été décidé à partir de cet arrêté de raisonner en PGV (défini dans les chapitre 8.3) car c'est une mesure qui est enregistrée directement, sans calcul intermédiaire, d'une part et d'autre part, c'est une mesure directe du mouvement du sol qui est utilisée pour définir des normes parasismiques dans le bâtiment. Le Tableau 2 indique ces différentes limites.

¹³ Signature le 20 juillet 2016 d'un accord entre les opérateurs et l'École et Observatoire des Sciences de la Terre sous le contrôle de la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement d'Alsace-Champagne-Ardenne-Lorraine

Ancien seuil en magnitude	Nouveau seuil en PGV
	PGV \geq 0.5 mm/s: seuil de vigilance, surveillance en continu de la sismicité par l'opérateur et adaptation des opérations si nécessaire pour maintenir la sismicité sous ce seuil.
M \geq 1.5 : vigilance renforcée.	PGV \geq 1.0 mm/s: vigilance renforcée, la DREAL demande à l'opérateur de fournir au RéNaSS les données des 4 stations courte période afin de caractériser l'événement. Les données doivent être fournies dans les 24 h suivant l'événement et contenir les 7 derniers jours de suivi. En même temps, l'opérateur doit prendre des mesures pour revenir en dessous du seuil de vigilance.
M \geq 2.0 : seuil d'arrêt progressif et obligatoire des opérations. La DREAL demande à l'opérateur de fournir au RéNaSS les données des 4 stations courte période afin de caractériser l'événement. Les données doivent être fournies dans les 24 h suivant l'événement et contenir les 7 derniers jours de suivi. En même temps, l'opérateur doit arrêter progressivement les installations. La DREAL doit être immédiatement informée de cet arrêt et les opérations ne pourront reprendre qu'avec son autorisation en fonction des analyses effectuées par le RéNaSS.	PGV \geq 1.5 mm/s: seuil d'arrêt progressif et obligatoire des opérations. La DREAL demande à l'opérateur de fournir au RéNaSS les données des 4 stations courte période afin de caractériser l'événement. Les données doivent être fournies dans les 24 h suivant l'événement et contenir les 7 derniers jours de suivi. En même temps, l'opérateur doit arrêter progressivement les installations. La DREAL doit être immédiatement informée de cet arrêt et les opérations ne pourront reprendre qu'avec son autorisation en fonction des analyses effectuées par le RéNaSS.

Tableau 2 : Seuil de sismicité au-delà desquels les opérations et la surveillance sismique doivent être modifiées. La colonne de gauche définit les seuils en magnitude et la colonne de droite définit les seuils en PGV qui sont mis en place depuis l'arrêt d'exploitation de la centrale de Soultz-sous-Forêts.

Au-delà de l'introduction de la nouvelle unité de mesure des seuils, la nouvelle réglementation précise qu'il est nécessaire que ce seuil soit dépassé au moins sur 2 stations. En effet, toute station sismologique est plus ou moins bruitée c'est-à-dire qu'elle enregistre des signaux non liés à des séismes tels que des sources anthropogéniques (e.g. transformateur EDF) ou des tempêtes hivernales. Afin d'être sûr que l'on est en présence d'un séisme, il faut qu'un signal soit enregistré sur plusieurs stations.

D'autre part, les arrêtés préfectoraux spécifient que la pression d'injection est limitée à 10 MPa (100 bar) en tête de puits.

6.4. EXEMPLE D'APPLICATION DE CES MESURES PAR LES OPÉRATEURS : LE CAS DE SOULTZ-SOUS-FORÊTS ET RITTERSHOFFEN

ES-Géothermie, exploitant des centrales géothermiques de Soultz-Sous-Forêts et Rittershoffen, met en œuvre les modalités de surveillance de la sismicité sur ces sites en appliquant strictement les arrêtés préfectoraux (Maurer *et al.*, 2020). Ces modalités sont précisées dans le cadre du projet européen GEOENVI par (Valkering *et al.*, 2020).

La Figure 8 montre le réseau de surveillance sismique installé autour des sites de Soultz-Sous-Forêts et Rittershoffen depuis 2002 et 2012 respectivement (Maurer *et al.*, 2020).

Le réseau de Soultz-Sous-Forêts était composé à l'origine de 9 stations de surface et aujourd'hui comprend 7 stations dont une station multi-capteurs. La station publique multi-capteurs est la station appelée « OPS » tracée avec une étoile bleue sur la Figure 8.

Le réseau de Rittershoffen était composé à l'origine de 4 stations de surface. La station KUHL a été récemment transférée du réseau de Soultz-Sous-Forêts au réseau de Rittershoffen qui comprend donc aujourd'hui 5 stations.

Dans le cas où des opérations spéciales, comme des [stimulations](#) hydrauliques ou chimiques, auraient lieu, le réseau permanent est densifié avec des stations temporaires (Maurer *et al.*, 2015).

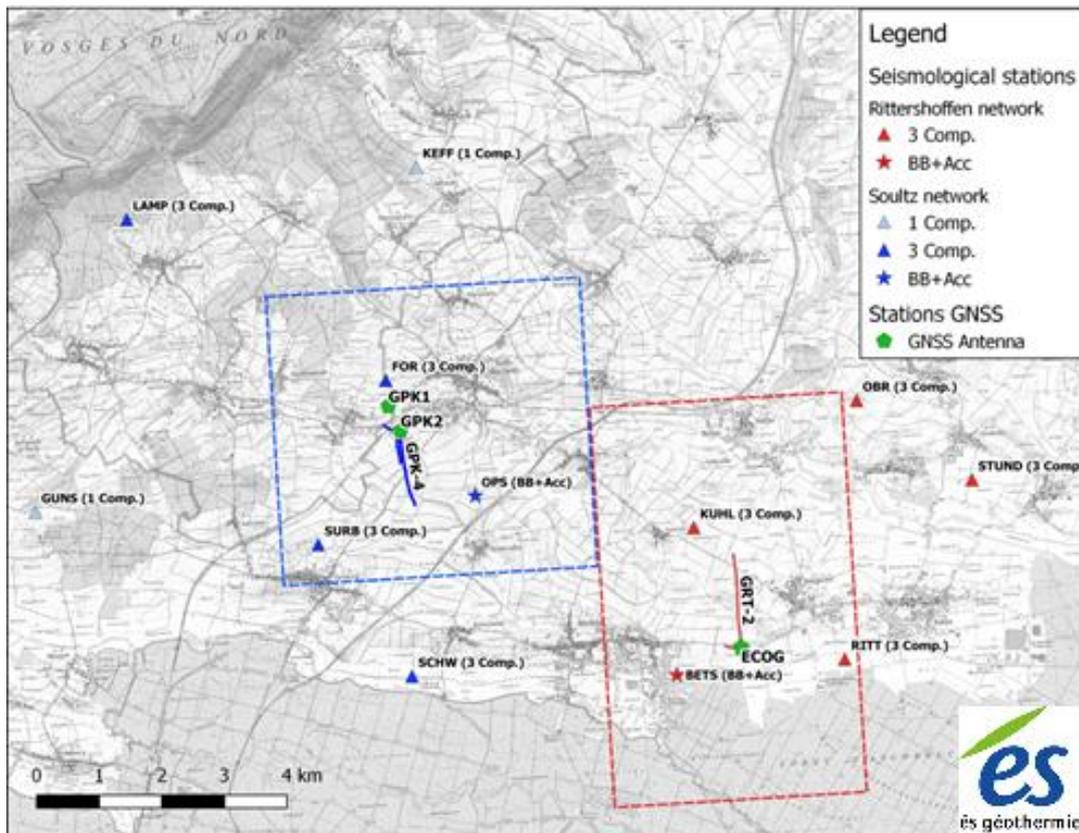


Figure 8 : Réseau de surveillance sismique de Soultz-sous-Forêts (en bleu) et Rittershoffen (en rouge) et réseaux géodésiques – pour surveiller si de la subsidence ou surrection se produisent (en vert). Les trajectoires des puits sont aussi montrées. Les rectangles en pointillés montrent les concessions de Soultz-sous-Forêts (en bleu) et Rittershoffen (en rouge). D'après (Maurer *et al.*, 2020).

Ces stations comprennent un capteur enfermé dans une armoire pour le protéger des éléments extérieurs et si besoin un panneau solaire. Elles sont généralement entourées d'une enceinte grillagée pour prévenir le vandalisme ou les dégâts causés par les animaux par exemple. La Figure 9 montre un exemple de station permanente.



Figure 9 : Vue de la station permanente Betschdorf du réseau de Rittershoffen (© BRGM - F. Branchu).

La détection, localisation et estimation de la magnitude sont calculées automatiquement. Ensuite un sismologue vérifie manuellement les événements détectés pour améliorer leur localisation et leur magnitude. La magnitude de détection est proche de 0 en fonction du niveau de bruit ambiant. Dans le cas d'une crise sismique (de nombreux événements se produisent dans un temps réduit), il est en général nécessaire qu'un sismologue vérifie les signaux car le système de détection automatique peut manquer les événements les plus faibles. Ces observations sismologiques sont reportées régulièrement à la DREAL avec le rapport d'exploitation mensuel.

Un système d'alerte avec une charte de décision a été mis en place pour gérer rapidement les événements dépassant les seuils définis dans la réglementation, respecter les demandes des arrêtés et éviter d'autres événements. Si un événement détecté automatiquement dépasse la magnitude 1.7, un message électronique d'alerte et un appel téléphonique sont envoyés automatiquement à la personne d'astreinte. Depuis que les centrales sont en exploitation, il y a toujours une personne d'astreinte 24 h sur 24 et 7 jours sur 7 qui peut contacter un sismologue si nécessaire. L'événement dépassant le seuil d'alerte est analysé manuellement et son PGV est calculé à chaque station. Si le premier seuil (Tableau 2) est dépassé sur au moins deux stations, la procédure décrite en Figure 10 est lancée.

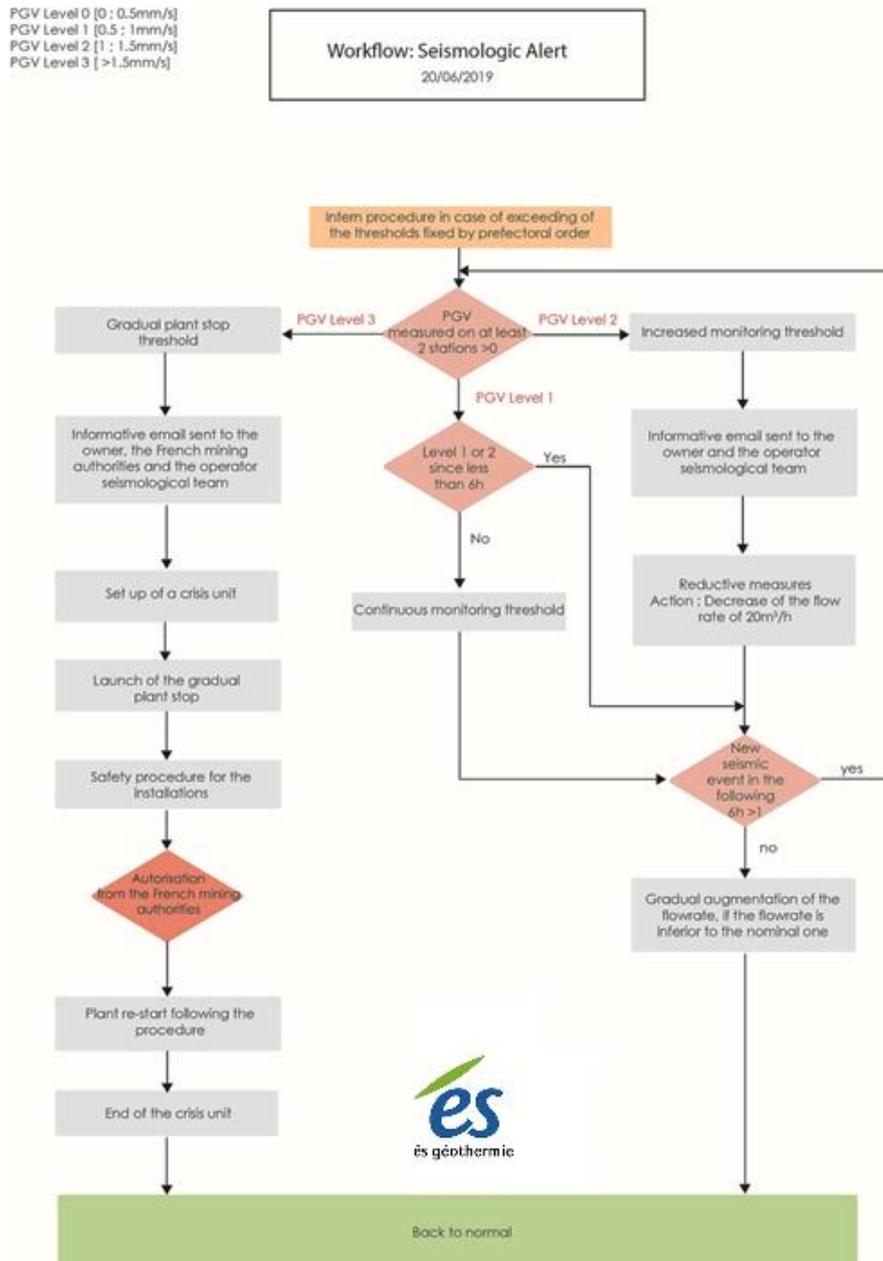


Figure 10 : Charte de décision utilisée pour les sites de Soultz-sous-Forêts et Rittersoffen si un microséisme se produit. D'après (Maurer et al., 2020).

Cette procédure vise à traduire les obligations définies dans les arrêtés préfectoraux en des décisions pratiques. Par exemple il a été décidé de :

- ré-évaluer la période de « vigilance » et « vigilance accrue » toutes les 6 h puisque aucune période de temps n'est définie dans les arrêtés ;
- dans le cas où le second seuil en PGV est atteint, il a été décidé qu'une « mesure appropriée visant à revenir en-deça du seuil antérieur », comme décrit dans l'arrêté, est de réduire les débits par seuils de 20 m³/h.

Cette procédure n'a jamais été appliquée puisqu'aucun événement n'a atteint le premier seuil de PGV dans plus d'une station depuis l'ouverture des centrales (cf Maurer et al., 2020).

7. Cas d'étude

Dans ce chapitre, nous étudions des cas de sismicité induite pour remettre ces événements dans le contexte réglementaire et des usages français actuels. Nous avons sélectionné 5 projets géothermiques internationaux sur le critère de leur proximité avec la France (Soultz-Sous-Forêts en France, Bâle en Suisse, Landau en Allemagne, Saint-Gall en Suisse) ou de l'importance de la sismicité anthropique (Pohang en Corée du Sud). Durant la rédaction de ce rapport, un séisme de magnitude M3.1 (RéNass) s'est produit à proximité de Strasbourg, le 12 novembre 2019. Ce séisme a été suivi d'une crise sismique durant laquelle de nombreux microséismes ont été enregistrés. À la fin de la rédaction de ce rapport (janvier 2020), la qualification de ce séisme en tant qu'événement induit, déclenché ou naturel est en débat (les scientifiques du RéNass l'ont qualifié d'événement anthropique ce qui est contesté par l'industriel). Des experts scientifiques travaillent sur ce sujet mais leurs conclusions n'ont pas encore été rendues publiques. Nous n'aborderons donc pas cet événement dans ce retour d'expérience.

Un séisme anthropique n'est généralement pas un événement isolé mais une crise de [microséismes](#) qui culmine avec cette événement. Pour bien comprendre ce qui s'est passé nous décrivons tous ces événements dans les exemples qui suivent.

Pour chaque cas d'étude, nous exposons :

- le contexte du projet, quels sont les acteurs ?, quel était l'objectif en terme de production ?
- la sismicité naturelle dans la région, quel est son niveau à l'échelle du site et de la région ?
- la phase du projet durant laquelle l'événement s'est produit ;
- l'évolution spatio-temporelle des événements pour identifier l'extension spatiale du nuage de sismicité et sa distance au forage ainsi que sa temporalité (quand s'est produit cet (ces) événement(s) par rapport aux opérations) ;
- la procédure après l'événement, quelles ont été les conséquences pour le projet ?, quelles études ont été menées pour comprendre l'événement ?
- la réglementation en vigueur au moment de l'événement, quand cette information est-elle disponible ?

7.1. SOULTZ-SOUS-FORÊTS (FRANCE - 2000 ET 2003)

7.1.1. Le projet

Le projet de Soultz-Sous-Forêts a débuté sous la forme d'un projet de recherche européen en 1986 (Genter *et al.*, 2010). Il a été initié par une équipe franco-allemande et était initialement financé par des fonds publics français, allemands, suisses et européens. À partir de 1996, il est de plus en plus cofinancé par l'industrie. Beaucoup de données ont été obtenues mais l'objectif initial était le développement, le test et la modélisation de deux [réservoirs EGS](#) dans le socle à 3,5 km et 5 km de profondeur.

Aujourd'hui une puissance brute de 1,7 MWe peut-être produite avec un cycle [ORC](#) (centrale à fluide organique) et injecté dans le réseau électrique français (Baujard *et al.*, 2018; Koelbel and Genter, 2017).

Le projet peut être séparé en trois grandes phases : (1) la préparation, (2) la phase de forage exploration et développement du [réservoir](#) (1987-2007) et (3) la phase de construction de la centrale (*Genter et al.*, 2010). Cette troisième phase peut elle-même être séparée en 2 parties : avec un 1^{er} prototype de cycle ORC (2007-2014) puis un 2nd ORC avec une exploitation commerciale depuis 2016 (Com. Pers. ES-Géothermie). Deux puits ont d'abord été forés (EPS-1 et GPK-1) à faible profondeur (2 km) puis GPK-1 a été approfondi à 3,6 km et un troisième puits (GPK-2) a été foré à 3,9 km. Ce troisième puits a ensuite été approfondi et 2 autres puits (GPK-3 et GPK-4) ont été forés à 5 km de profondeur. Aujourd'hui, GPK-2 est le puits producteur et le fluide est réinjecté dans GPK-3 et GPK-4.

7.1.2. Sismicité naturelle dans la région

À Soultz-sous-Forêts, le [réservoir](#) est localisé dans le socle granitique sous une couche de 1 400 m de sédiments.

Soultz-sous-Forêts est situé dans le fossé rhénan. La sismicité dans le fossé rhénan est modérée, avec de nombreux petits séismes et occasionnellement un événement plus gros. Comme Soultz-Sous-Forêts était à l'origine un projet de recherche, de nombreuses études s'y sont déroulées et la sismicité a été étudiée en détail. En particulier Helm (1996) dans sa thèse observe la sismicité naturelle enregistrée à partir du réseau sismique local (Figure 11). La sismicité naturelle autour de Soultz-sous-Forêts est très faible, avec plus de 60 % des événements localisés dus à des tirs de carrière dans la région de Merlebach.

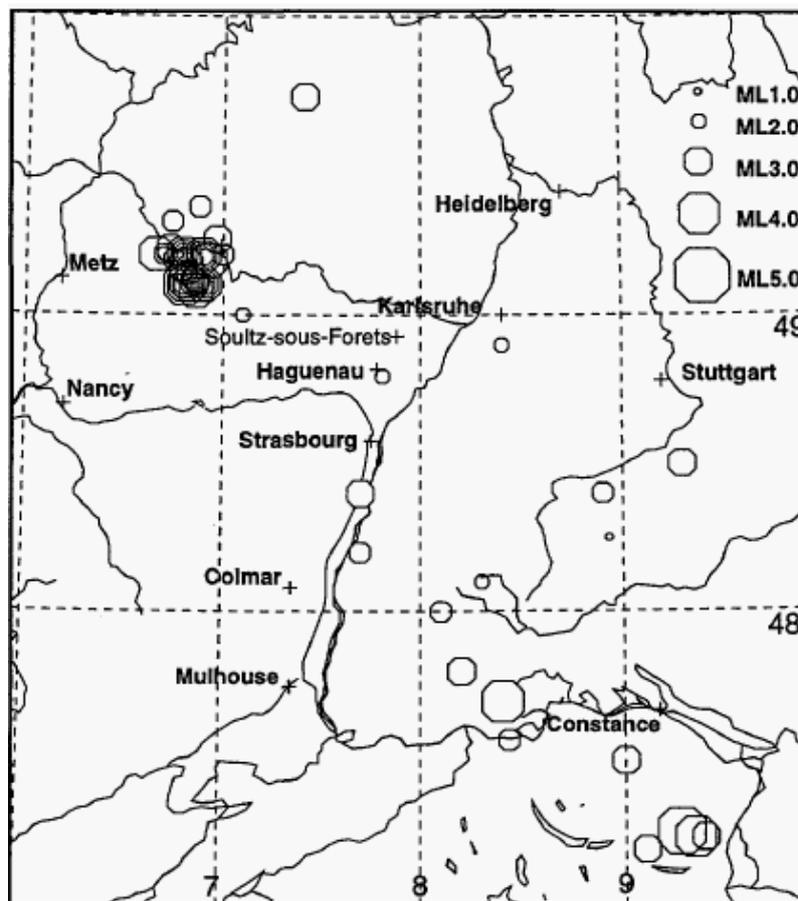


Figure 11 : Sismicité enregistrée sur le réseau de Soultz (1991-1994).
Figure extraite de la thèse de Helm (1996).

7.1.3. Phase durant laquelle la sismicité est survenue

Dans le réservoir profond (5 km), la sismicité induite ressentie s'est produite durant les phases de recherche de ce projet, lors des [stimulations](#) hydrauliques de 2000 et de 2003 pour améliorer l'injectivité. Une phase de [stimulation](#) avait eu lieu précédemment en 1993 mais elle concernait la partie supérieure du [réservoir](#), donc une zone différente (Cornet, 2019). L'ensemble des phases de stimulations hydrauliques et chimiques réalisées dans les puits de Soultz-Sous-Forêts sont compilées dans (Schill *et al.*, 2017).

7.1.4. L'évènement

Cuenot *et al.* (2008) décrivent les étapes de la [stimulation](#) du puits GPK-2 en juin-juillet 2000 durant lesquelles 23 400 m³ (23 400 000 L) de fluide ont été injectés.

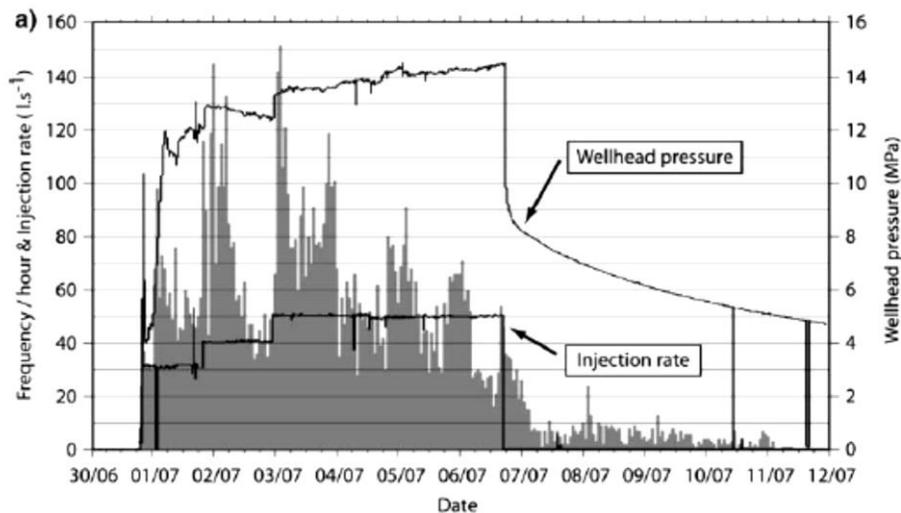


Figure 12 : Débit et nombre d'événements par heure ainsi que la surpression en tête de puits. D'après Cuenot *et al.* (2008).

La [stimulation](#) s'est déroulée comme suit (Cuenot *et al.*, 2008) : du fluide a été injecté à 30 L.s⁻¹ pendant environ 24 h puis 40 L.s⁻¹ pendant 27 h et 50 L.s⁻¹ pendant 90 h. La pression a atteint 12 et 13 MPa (120 et 130 bars) pendant les deux premiers paliers d'injection et a monté à 14,5 MPa pendant le troisième palier (Figure 12) juste avant l'arrêt des [stimulations](#) ([shut-in](#)). Un test a été réalisé une semaine plus tard pour vérifier l'efficacité des tests de [stimulation](#), 4500 m³ de fluide ont été injectés à un débit entre 15 et 35 L.s⁻¹ (Dorbath *et al.*, 2009). La [microsismicité](#) est bien corrélée à la [stimulation](#) avec les premiers événements se produisant presque immédiatement après le début de l'injection. D'autre part, on observe une augmentation de la [microsismicité](#) après chaque augmentation de débit (Figure 12) suggérant une réponse immédiate du [réservoir](#) à l'injection. Le [séisme induit](#) de plus forte magnitude, Md2,6, s'est produit un jour après les tests de vérification.

En 2003, les puits GPK-2 et GPK-3 ont été stimulés en plusieurs phases (Baria *et al.*, 2004; Dorbath *et al.*, 2009), un total de 37 300 m³ ont été injectés. La phase 1 consistait à injecter de la saumure, de densité plus forte que l'eau douce, dans GPK-3 à un débit de 30 L.s⁻¹. Puis la densité du fluide a été abaissée et le débit diminué jusqu'à 20 L.s⁻¹. Ensuite de l'eau douce a été injectée à un débit de 30 L.s⁻¹, augmenté à 60 L.s⁻¹ pendant quelques heures et rabaisé à 50 L.s⁻¹. La [microsismicité](#) a commencé à partir d'une surpression de 3 MPa.

Durant la phase 2, l'injection a eu lieu dans les deux puits à environ 20 L.s^{-1} dans GPK-2 et 50 L.s^{-1} dans GPK-3. La [microsismicité](#) a continué avec le développement de nouvelles régions actives.

Durant la phase 3, la [stimulation](#) du puits GPK-2 a été arrêtée ([shut-in](#)) et du fluide a été injecté dans GPK-3 avec un débit variable avec deux courts pics à 90 L.s^{-1} puis le débit d'injection a été diminué progressivement et la [stimulation](#) a été arrêtée ([shut-in](#)).

La phase 4 consistait à arrêter les [stimulations](#) ([shut-in](#)) dans les deux puits et comme deux événements sismiques se sont produits, le 11 juin 2003, de magnitude $M_{I2.9}$ et 2.7 , GPK-2 a été [purgé](#) à 10 L.s^{-1} pendant 5 jours. Ces deux événements se sont produits à la périphérie du [réservoir](#). La Figure 13 décrit cette [stimulation](#).

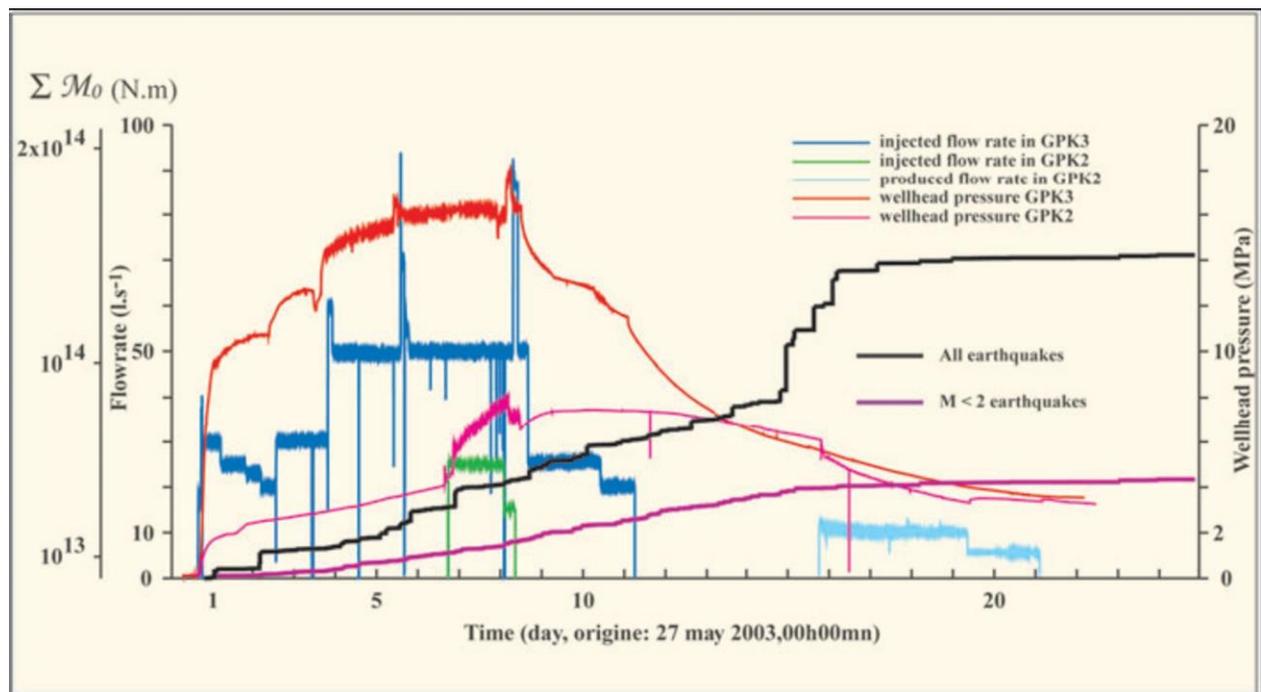


Figure 13 : La [stimulation](#) de GPK3 en 2003. Paramètres hydrauliques: pression (rouge) et débit (bleu foncé) dans GPK3, pression (rose), débit (vert) pendant l'injection double et débit (bleu clair) pendant la production dans GPK2. Moment sismique cumulé: tous les séismes (noir), séismes $M < 2$ (violet). D'après (Dorbath et al., 2009) ;

7.1.5. Évolution spatio-temporelle des événements

Le nuage de sismicité de la [stimulation](#) de 2000 forme une ellipse de 1,5 à 2 km de long et 500 m de large. La sismicité s'est étendue jusqu'à 1,5 km du puits d'injection (Cuenot et al., 2008). La sismicité a commencé quasi immédiatement après le début de la [stimulation](#), 30 événements ont été enregistrés durant la 1^{re} heure (Cuenot et al., 2008). Le plus gros séisme s'est produit une semaine après les [stimulations](#).

Le nuage de sismicité de la [stimulation](#) de 2003 forme une zone de $1,5\text{km} \times 2,5\text{km} \times 1,5\text{km}$ avec une distance au puits de l'ordre de 1,5 km (Michelet and Toksöz, 2007). Les événements les plus importants se sont produits pendant les [stimulations](#).

7.1.6. Procédure après l'évènement

Quelques [séismes induits](#) de 2000 et 2003 ont été ressentis à Soultz-sous-Forêts (Cuenot, 2012). Les habitants se sont plaints ; 10 plaintes ont été recensées pour le séisme de 2000 et 46 pour le séisme plus élevé de 2003. À notre connaissance, une seule plainte a abouti pour le remboursement d'un miroir (Com. Pers. ES-Géothermie). Des articles ont été publiés dans la presse locale et une enquête macrosismique a eu lieu.

7.1.7. Règlementation

Soultz-sous-Forêts était un site de recherche expérimental. La réglementation en terme de surveillance sismique en France dans le cas de la géothermie profonde a évolué en grande partie grâce à ce site. Aux moments des événements, un réseau de surveillance sismique existait avec des objectifs de recherche, sans aucune contrainte réglementaire. Les arrêtés préfectoraux ont inclus la surveillance sismique seulement à partir de 2011 pour les forages de Rittershoffen (voir section 6.1).

7.1.8. Résumé des paramètres

Paramètres impactant le risque sismique		Évènement Soultz-Sous-Forêts
Liés au site	Type de roche	socle granitique
	Caractéristique hydrogéologique	réseau fracturé
	Température	200 °C
	Proximité d'une ville	Non (village, 2 645 personnes en 2006)
Liés à l'activité anthropique	Volume net de fluide injecté	
	2000 : 23 400 m ³ 2003 : 37 300 m ³	
	Débit	
	2000 : paliers 30-40-50 L.s ⁻¹ 2003 : plusieurs paliers entre 20 et 60 L.s ⁻¹ avec un pic à 90 L.s ⁻¹	
	Pression en tête de puits max	
	2000 : 14,5 MPa 2003 : 16 MPa	
Stimulation	Type	Stimulations hydrauliques
	Durée	2000 : 6 jours 2003 : 11 jours
Profondeur du forage		5 km

Tableau 3 : Récapitulatif des paramètres du site de Soultz-dous-Forêts.

Les événements de Soultz-sous-Forêts ont été largement étudiés principalement parce que le site était un démonstrateur de recherche. Le [risque sismique](#) est plus faible que dans les autres cas d'étude que nous allons analyser étant donné que le site était localisé loin de concentrations de population. Les événements déclenchés ont généré des plaintes mais n'ont pas fait de dégâts avérés. Le déroulement des [stimulations](#) et leurs conséquences ont été des points de repère pour calibrer les opérations de géothermie suivantes.

7.2. BÂLE (SUISSE - 2006)

7.2.1. Le projet

Le projet est décrit par l'opérateur Geopower Basel AG.

Le projet géothermal de cogénération de Bâle, Deep Heat Mining (DHM) a été initié en 2006. L'idée était de réaliser un site pilote de production de chaleur et d'électricité à une échelle commerciale, en utilisant le procédé de Hot Fractured Rock (terminologie équivalente à [EGS](#), utilisée avant que le terme [EGS](#) ne devienne courant, qui se réfère au massif rocheux au lieu de la technologie). Les températures dans le fossé rhénan étaient réputées élevées. Un forage exploratoire à Bâle en 2001 avait permis d'obtenir une température d'environ 200 °C à 5 000 m de profondeur. Il était prévu de creuser un forage d'injection et deux forages de production à 5 000 m de profondeur. Le forage d'injection et le premier forage de production devaient être creusés en 2006-2007 et le second forage et la centrale réalisés en 2008-2009 si les deux premiers forages se révélaient un succès.

Il était prévu que cette centrale produise 6 MW d'électricité et 17 MW de chaleur. Tout cela devait chauffer l'équivalent d'environ 2 700 maisons et alimenter 10 000 maisons en électricité. Le coût prévu était de CHF 108 million (environ 100 million d'euros).

Pour parvenir à ce but, la société Geopower Basel AG (GPB) a été fondée en 2004 pour accélérer les travaux. Les membres fondateurs sont IWB, EBL, GVM AG et Geothermal explorers LTD. Puis, quatre sociétés additionnelles (3 producteurs d'énergie suisses et une société allemande) se sont jointes au projet : Axpo, ewz, AET et Energiedienst.

7.2.2. Sismicité naturelle dans la région

Bâle est localisée au nord de la Suisse en limite sud du fossé rhénan (Figure 14). La sismicité dans le fossé rhénan est modérée, avec de nombreux petits séismes et occasionnellement un événement plus important. La partie sud du fossé est plus active et l'évènement le plus important est le séisme historique de Bâle qui a eu lieu en 1356 avec une magnitude estimée entre 6,5 et 6,9.

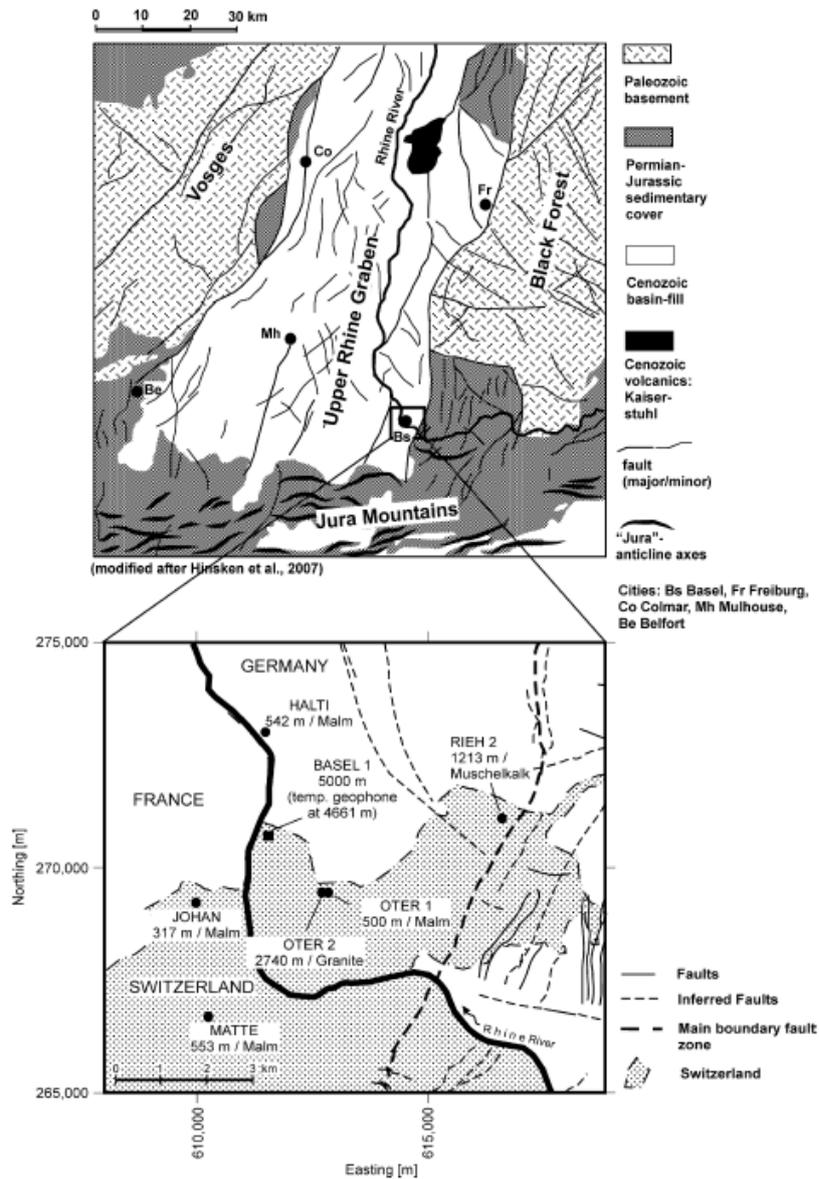


Figure 14 : Carte schématique géologique et tectonique du sud du fossé rhénan. (Haring et al., 2008).

La sismicité récente de Bâle est faible à modérée. Dans un rayon de 10 km autour de la ville, Häring et al. (2008) ont identifié 15 évènements avec une magnitude supérieure à 2 depuis 1975.

7.2.3. Phase durant laquelle la sismicité est survenue

La sismicité s'est produite pendant la phase de [stimulation](#). Ces [stimulations](#) hydrauliques ont été réalisées pour améliorer la perméabilité du [réservoir](#) (Haring et al., 2008). La température était estimée à 190 °C à 5 km de profondeur. Les circulations hydrauliques sont probablement dominées par quelques fractures. La matrice granitique a une perméabilité faible. La température était suffisante pour exploiter le [réservoir](#) mais il n'y avait pas assez de circulation de fluide pour rendre cette exploitation viable.

7.2.4. L'évènement

Un test d'injection de 75 h a été effectué le 23 novembre 2006 pour caractériser les propriétés préexistantes du [réservoir](#). Cela a montré que la circulation est dominée par quelques fractures.

Håring *et al.* (2008) décrit la procédure de [stimulation](#). La [stimulation](#) elle-même a commencé le 2 décembre et a duré jusqu'au 8 décembre 2006. Elle s'est déroulée en 6 phases et 11 500 m³ d'eau ont été injectés. Il y a d'abord eu un test d'injection préliminaire de 75 h le 23 novembre. La [stimulation](#) a commencé par une injection à 1,7 L.s⁻¹ pendant 16 h. Puis le taux d'injection a été augmenté progressivement jusqu'à 55 L.s⁻¹ ce qui a mené à une pression en tête de puits de 29,6 MPa (296 bar). La sismicité a augmenté en même temps et elle a finalement atteint un niveau qui requérait de diminuer le débit. Le débit a été diminué le 8 décembre au matin, après 6 jours d'injection continue. Après 5 h les [stimulations](#) ont été arrêtées ([shut-in](#)) comme l'activité sismique continuait. Comme la sismicité $M_L > 1$ ne diminuait pas suffisamment, il a été décidé de [purger](#) le puits (diminuer sa pression). Le séisme de $M_L 3,4$ s'est produit juste avant cette procédure. Après la [purge](#), la pression est redevenue hydrostatique en 4 jours. Le puits est ensuite resté ouvert et a produit un [flowback](#) (de l'eau est ressortie) d'environ 3 400 m³ en 14 mois.

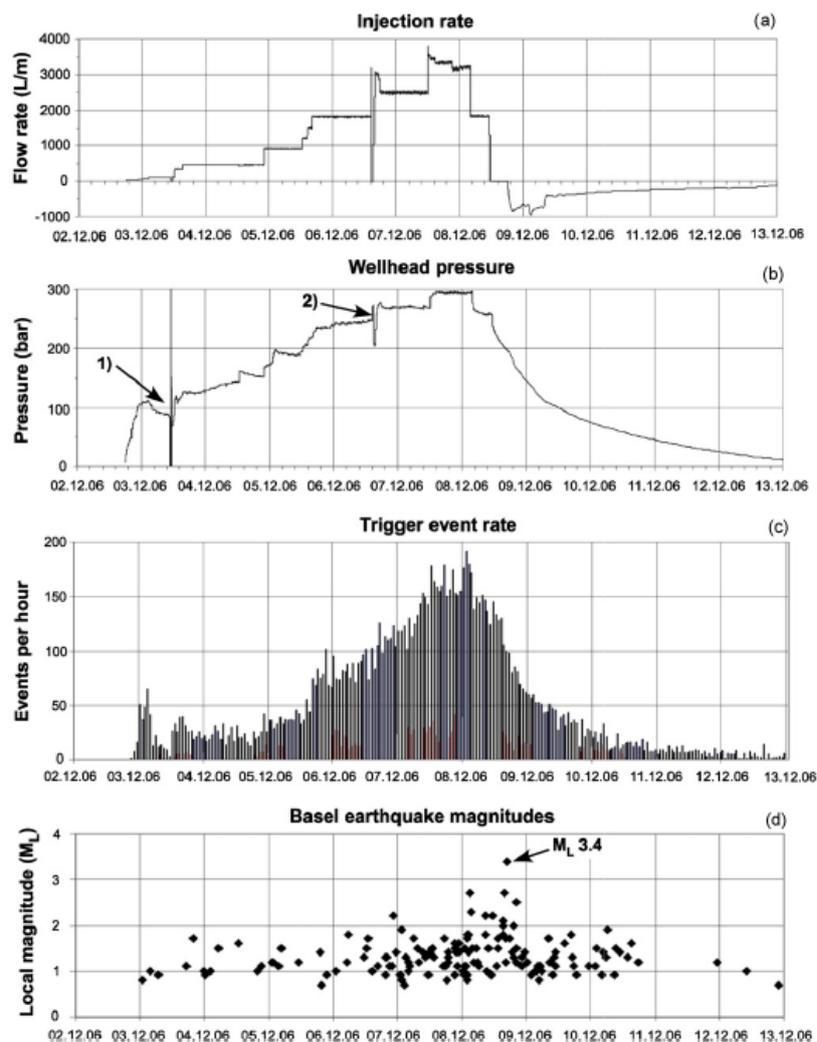


Figure 15 : Données sur la [stimulation](#) du puits Basel 1. Historique des débits d'injection (a), de la pression en tête de puits (b), du taux d'événements déclenchés (c), et de la magnitude des événements calculés par le SED (service sismologique Suisse). (Håring *et al.*, 2008)

La Figure 15 décrit les paramètres observés pendant cette [stimulation](#). Il est à noter que la pression en tête de puits a atteint 30 MPa (300 bar) ce qui serait impossible en France aujourd'hui dans le même contexte (Alsace) puisque les arrêtés préfectoraux de tous les sites de cette région limitent les pressions en tête de puits à 10 MPa (100 bar).

7.2.5. Évolution spatio-temporelle des événements

Deichmann et Giardini (2009) ont relocalisé les événements (Figure 16). Les événements se sont produits le long d'un plan orienté nord-nord-ouest /sud-sud-est presque vertical. L'extension de ces événements est de 1,5 km au maximum avec une distance au fond du forage de moins d'1 km au maximum. Le séisme de magnitude 3,4 s'est produit à 200 m du forage et les 3 événements $M_I > 3$ post-stimulation étaient à environ 500 m du forage, les événements post-stimulation étaient localisés entre 500 m et 900 m de la partie ouverte du forage.

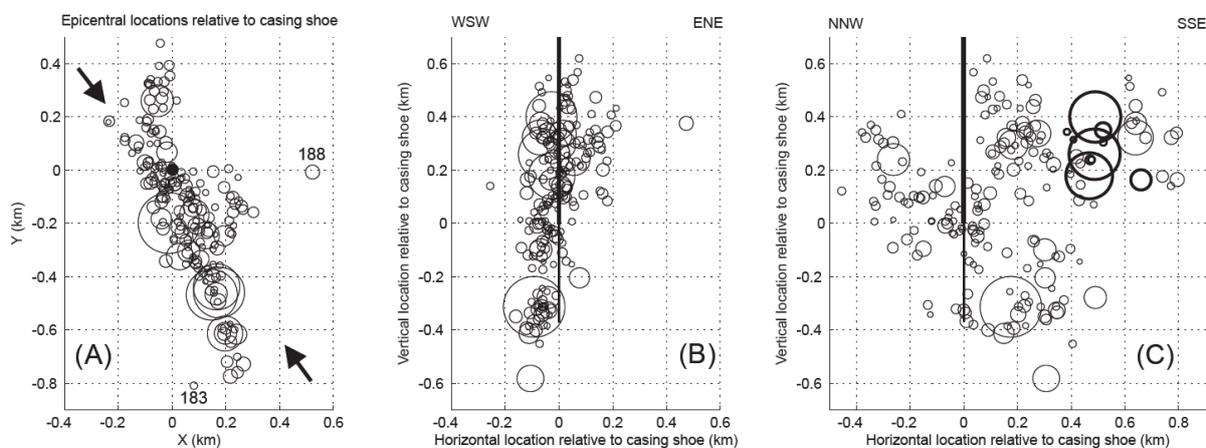


Figure 16 : Épicentres des séismes (A) et coupe de la relocalisation master-event, perpendiculairement (B) et parallèlement (C) à la direction générale de l'alignement des [épicentres](#) par rapport à la localisation du forage.

Le début de la section ouverte du forage est marqué par le point noir dans la figure (A). Dans les figures (B) et (C) la section chemisée du forage est marquée par la ligne épaisse et la partie ouverte par la ligne fine. La taille de chaque cercle est proportionnelle au moment de l'événement. Le choc principal du 8 décembre 2006 est localisé à $X=0$, $Y=-0.2$ dans la figure (A). Les événements tracés en ligne épaisse dans la figure (C) correspondent aux événements entre le 1^{er} janvier et le 2 février 2007 et incluent trois événements $M_I > 3$. Figure extraite de (Deichmann and Giardini, 2009).

On observe une migration globale des événements loin du forage au cours du temps, ce qui va dans le sens de l'hypothèse d'une diffusion de l'eau.

7.2.6. Procédure après l'évènement

Il n'y a pas eu de doute sur l'origine induite de l'évènement comme la séquence de sismicité a commencé pendant la [stimulation](#) et que le séisme était très proche du puits. L'assurance de l'opérateur a payé 7 million CHF (francs suisse, environ 6.5 millions d'euro) de compensation pour les dommages qui ont été attribués au séisme (Baisch *et al.*, 2009). Le projet est suspendu depuis. Une étude a été commissionnée par le canton de Bâle et soutenue par le gouvernement suisse pour analyser le [risque sismique](#) associé à la continuation et au développement du projet géothermal. Les membres du groupe chargés de cette étude sont les sociétés Q-con GmbH, Bureau d'Études Géologiques SA, JUNG-GEOTHERM, GEOTER S.A.S, RESONANCE ingénieurs-conseils SA et RiskCom. Le résultat est publié dans le rapport Serianex (Baisch *et al.*,

2009). Ce rapport conclut que la reprise du projet présente un [risque sismique](#) non négligeable et donc que le site de Bâle n'est pas favorable à l'exploitation de la géothermie profonde dans le socle cristallin. Il laisse la porte ouverte à d'autres sites en Suisse à condition de faire une analyse de risques préalable. L'évènement de Bâle reste un cas d'étude car c'est le premier séisme induit par des opérations de géothermie d'une telle magnitude après l'expérience réussie de Soultz-Sous-Forêts. Par conséquent il a été beaucoup étudié pour comprendre son origine.

Le rapport est organisé en plusieurs annexes, chacune dédiée à un aspect différent (e.g. modèle géologique, sismicité induite, analyse de risques...). Dans le rapport, les sismicités induites et déclenchées sont bien séparées et traitées à part.

Une analyse de risques poussée a été réalisée par cette commission qui évalue le [risque sismique](#) si le projet reprenait. Cette étude conclut sur une forte probabilité de séisme de magnitude supérieure à 2 pendant le projet et même de séisme de magnitude 3,7 (probabilité > 10 %) pendant la [stimulation](#).

Le projet a été arrêté à la fin de 2009. Le puits a été fermé en avril 2011¹⁴. Un an plus tard, et encore plus depuis 2016, l'activité sismique a augmenté à proximité du forage. Suite à cette augmentation de la [microsismicité](#) enregistrée, le puits a été rouvert en 2017 pour faire baisser la pression¹⁵. Le programme consistait en une ouverture et un relâchement contrôlé de la pression par étapes sur 10 semaines. À la fin de ce processus, le puits est resté ouvert¹⁶. Aucun séisme n'a été ressenti à la suite de cette ouverture (plus grande magnitude enregistrée 1.9).

7.2.7. Règlements en Suisse

L'organisme de surveillance sismologique suisse (SED) est responsable de la surveillance de la sismicité naturelle à Bâle.

Le projet a été arrêté par le canton de Bâle sur la base de l'article 10 de la Loi fédérale sur la protection de l'environnement.

Il est à noter qu'avant le début des [stimulations](#), l'organisme de surveillance sismologique suisse (qui n'a aucun pouvoir de régulation) avait signalé à GPB et aux autorités de Bâle ne pas avoir vu de réelle analyse de [risque sismique](#) liée au projet. Les autorités ont confirmé que l'opérateur avait un permis valide et avait suivi toutes les recommandations de ce permis (Giardini, 2009).

¹⁴ <http://www.seismo.ethz.ch/fr/earthquakes/monitoring/geothermal-energy-basel/Project-Description/>

¹⁵ <http://www.thinkgeoenergy.com/basel-to-reopen-geothermal-well-but-not-the-egs-project/>

¹⁶ <http://www.thinkgeoenergy.com/efforts-to-release-pressure-of-geothermal-well-in-basel-successful/>

7.2.8. Résumé des paramètres

Paramètres impactant le risque sismique		Événement Bâle	
Liés au site	Type de roche	socle granitique	
	Caractéristique hydrogéologique	réseau fracturé	
	Température	190 °C	
	Proximité d'une ville	Oui	
Liés à l'activité anthropique	Volume net de fluide injecté		11 500 m ³
	Débit		55 L.s ⁻¹
	Pression en tête de puits max		29,6MPa
	Stimulation	Type	Stimulations hydrauliques
		Durée	~6 jours
	Profondeur du forage		5 km

Tableau 4 : Récapitulatif des paramètres du site de Bâle.

7.3. LANDAU (ALLEMAGNE - 2009)

L'étude de ce séisme est un peu plus limitée car même si une commission d'expertise a été mandatée elle a rendu un rapport en allemand. Nous n'avons donc qu'une compréhension partielle des résultats. Le lien entre le séisme et la géothermie n'est par contre pas mis en doute, comme il a été étudié dans différents documents rédigés en français ou en anglais (e.g. Evans *et al.*, 2012).

7.3.1. Le projet

La centrale de Landau produit de l'électricité et de la chaleur. La centrale produit 3 MWe pour environ 3 000 logements et 6-8 MWth pour environ 300 logements (Baisch *et al.*, 2009). La réduction de CO₂ annuelle est d'environ 6 000 tonnes. C'est la première centrale géothermale avec une production de l'ordre du mégawatt en Allemagne¹⁷. Elle est en service depuis le 21 novembre 2007. C'est un doublet géothermique. C'était un projet pilote de geo x GmbH, une société fondée par PFALZWERKE AKTIENGESELLSCHAFT et Énergie Südwest AG. BESTEC était en charge des travaux de forage, de la planification, de l'installation des circuits thermiques et de l'exploitation jusqu'en 2013. Depuis le début de 2014, Geysir Europe GmbH est l'actionnaire majoritaire de geo x GmbH.

Entre 2005 et 2006, deux puits ont été forés jusqu'à 3 km de profondeur (Evans *et al.*, 2012). Puis, des [stimulations](#) hydrauliques, qui n'ont pas généré de sismicité ressentie, ont eu lieu dans un des puits. Enfin, des tests de [stimulation](#) ont été réalisés en 2007. La centrale a ensuite été mise en production.

¹⁷ <http://www.bestec-for-nature.com/index.php/en/projects-en/landau-en>

7.3.2. Sismicité naturelle dans la région

Landau est situé en Allemagne, dans le fossé rhénan. La sismicité dans le fossé rhénan est modérée, avec de nombreux petits séismes et occasionnellement un évènement plus important. La sismicité naturelle autour de Landau est modérée avec seulement un séisme enregistré entre 2010 et 2013 à moins de 30 km du site (Olbert, 2017). Au niveau historique, un séisme s'est produit en 1903, à 10 km de Landau, d'une magnitude M_I entre 4 et 5 (Evans *et al.*, 2012).

7.3.3. Phase durant laquelle la sismicité est survenue

Un séisme de $M_I 2.7$ s'est produit en phase de production, juste après l'arrêt de la centrale ([shut-in](#)) pour maintenance (Evans *et al.*, 2012).

7.3.4. L'évènement

Evans *et al.* (2012) décrivent ce qu'il s'est passé. Entre février et novembre 2008, la centrale était en production avec un débit de $65 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$. Pendant cette période la pression d'injection est passée de 6 à 3 MPa. En février 2008, 2 séismes de $M_I 1,7$ et $1,8$ ont été enregistrés par les services sismologiques. Un autre $M_I 1,7$ a eu lieu en octobre 2008. Puis, une pompe en fond de puits a été installée et les opérations ont repris avec un débit de $70 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ jusqu'à mi-septembre 2009. La pression d'injection a augmenté de manière constante de 4 à 5 MPa (40 à 50 bars) durant cette période. 3 évènements sismiques ont eu lieu le 9 mai 2009 de magnitude entre $M_I 1,6$ et $M_I 1,9$. Le 15 août 2009, un séisme de $M_I 2.7$ s'est produit juste après l'arrêt de la centrale pour maintenance. Il a été localisé à 1,5-2 km de la centrale à une profondeur entre 2,3 et 3,3 km. 7 autres évènements ont été enregistrés le même jour. Ensuite, 6 autres séismes ont eu lieu entre le 13 et le 15 septembre avec une magnitude maximale de 2,4 (Bönnemann *et al.*, 2010).

7.3.5. Évolution spatio-temporelle des évènements

L'évènement s'est produit entre 1,5 et 2 km du forage. La profondeur de l'évènement correspond à la profondeur du forage.

Pour l'évolution en temps, il n'y a pas de décalage entre les opérations et l'évènement puisque le séisme s'est produit en phase d'exploitation.

7.3.6. Procédure après l'évènement

Un groupe d'experts (Bönnemann *et al.*, 2010) a été mandaté pour étudier le séisme à l'initiative du ministère de l'environnement, des forêts et de la protection des consommateurs de l'État de Rhénanie-Palatinat. Il a été chargé de décrire, d'analyser et d'évaluer l'évènement, d'évaluer les causes possibles et d'élaborer des recommandations concernant les opérations futures.

Le premier point débattu était la localisation, notamment la profondeur de l'évènement. En effet, il existait des divergences entre différents services notamment sur la profondeur qui était soit superficielle soit plus conséquente. Les travaux effectués ont montré que l'évènement est localisé à une profondeur similaire aux opérations de géothermie, à environ 1,5 km du forage.

Le groupe d'experts a conclu que le séisme était fort probablement lié à l'exploitation géothermale. Il serait dû à une augmentation de la pression liée à l'injection.

Le groupe d'expert a émis des recommandations notamment sur :

- la surveillance de la sismicité, par l'ajout de stations pour pouvoir déterminer plus facilement l'existence ou non d'un lien avec les opérations de géothermie et la normalisation du format des signaux sismologiques ;
- la réalisation d'un modèle numérique pour étudier la propagation de la variation de pression causée par les opérations géothermiques et les autres éventuels effets comme la contraction thermique qui résulte de la propagation du fluide ;
- la réalisation d'une analyse de [risque sismique](#) spécifique aux opérations de géothermie à Landau ;
- la création d'un plan pour réagir en cas d'événement sismique. Ce plan doit viser à éviter les dégâts et prendre en compte la possibilité d'un évènement retardé à cause de la propagation lente du fluide ;
- la mise en place de mesures pour évaluer le niveau de vibration en cas de séisme non évitable. Cela permettra un règlement des plaintes rapide en cas de dégâts ;
- le développement de coopérations entre l'industrie et la recherche pour étudier les questions restantes sur la sismicité induite par des fluides.

Depuis qu'un système d'écoute a été mis en place en 2010, plusieurs centaines (entre 300 et 400) d'événements microsismiques ont été enregistrés (Olbert, 2017).

La production a repris en novembre 2009 avec une pression maximale abaissée à 4,5 MPa (Evans *et al.*, 2012).

Des dégâts ont été signalés à l'exploitant, principalement des fissures dans le plâtre (Bönnemann *et al.*, 2010). La plupart des plaintes (63 au total) ont été classées sans suite. Pour 12 plaintes, la responsabilité de l'exploitant n'a pas été exclue, les personnes ont été en conséquence indemnisées entre 200 et 1 200 € suivant les cas.

7.3.7. Résumé des paramètres

Paramètres impactant le risque sismique		Événement Landau
Liés au site	Type de roche	socle granitique
	Caractéristique hydrologique	réseau fracturé
	Température	155 °C ¹⁸
	Proximité d'une ville	Oui (taille moyenne)
Liés à l'activité anthropique	Volume net de fluide injecté	n.a.
	Débit	70 L.s ⁻¹
	Pression en tête de puits max	5 MPa
	Stimulation	n.a.
	Profondeur du forage	3,3 km

Tableau 5 : Récapitulatif des paramètres du site de Landau.

Le séisme de Landau a été interprété comme une conséquence à long terme de la circulation de fluide.

7.4. SAINT-GALL (SUISSE - 2013)

7.4.1. Le projet

La ville de St Gall, en Suisse, avait un réseau de chaleur depuis 25 ans. En 2007, il a été décidé de moderniser sa production d'énergie pour réduire les émissions de gaz à effet de serre et la consommation d'énergie fossile (Moeck *et al.*, 2015). Ce projet a été nommé Energy concept 2050. Le forage de Saint-Gall, à 4,2 km de profondeur, était un de ses éléments clé, St. Galler Stadtwerke en était l'opérateur.

(Moeck *et al.*, 2015) décrivent les étapes du projet. Une étude de faisabilité et des campagnes d'étude géophysique ont été réalisées entre 2008 et 2010. En 2010, un référendum, avec un taux de participation de 53 %, a validé le projet, qui incluait également le principe d'un prêt de 159 millions de francs suisses (82 % en faveur). En 2011-2012, le site a été sélectionné et préparé. Un réseau local sismologique a été planifié et installé en 2012.

7.4.2. Sismicité naturelle dans la région

La région autour de Saint-Gall est une région qui a connu de la sismicité durant les 500 dernières années, mais pas au niveau de la [faille](#) à proximité du forage (Moeck *et al.*, 2015). Le séisme le plus récent s'est produit en 1987 avec une magnitude M_l3,2, à environ 2 km du forage, ce qui est relativement proche mais il existe une incertitude sur la localisation (Diehl *et al.*, 2017).

¹⁸ <https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie//landau-geothermianlage.html>

7.4.3. Phase durant laquelle la sismicité est survenue

Le séisme a eu lieu pendant les tests de puits. C'est l'un des rares cas, en géothermie profonde, où un séisme est survenu durant cette phase. Cela est dû à un contexte particulier : une poche de gaz dont la présence n'avait pas été anticipée a nécessité des opérations de contrôle qui ont déclenché le séisme. Le séisme s'est donc bien produit pendant la phase de test mais il n'est pas directement dû aux opérations de test elles-mêmes, mais à une mauvaise connaissance géologique.

7.4.4. L'événement

Le forage a commencé le 4 mars 2013. En juillet 2013, la cible, une zone de [faille](#) qui avait été estimée non active en raison de l'absence de sismicité récente (Hirschberg and TA-SWISS, 2015), a été atteinte. Le 14 juillet la caractérisation du [réservoir](#) a commencé par un test d'injection en 15 étapes (Moeck *et al.*, 2015). 12 microséismes ont été détectés avec une magnitude maximale de 0.9 (Hirschberg and TA-SWISS, 2015). Du 16 au 19 juillet, le puits a été nettoyé, avec en particulier 2 injections d'acide. Cela a consisté en l'injection de 700 m³ d'acide chlorhydrique dilué pour chaque injection. La [microsismicité](#) était minimale pendant ces étapes, avec une magnitude maximale de 1,2. Le 19 juillet, il y a eu une remontée de gaz (95 % de méthane) soudaine et des opérations ont dû avoir lieu pour maîtriser cette remontée. Cette remontée de gaz est survenue au mauvais moment alors que le puits était ouvert pour préparer les tests suivants (Obermann *et al.*, 2015). Une remontée non maîtrisée de gaz à la surface serait dangereuse et comporte des risques de [blowout](#) et d'explosion. En conséquence, le puits a été immédiatement fermé. Cependant, comme la pression en tête de puits montait (elle a atteint 9 MPa), de la boue de forage très dense a été injectée (environ 700 m³ en 18h) pour maîtriser la pression élevée en tête de puits (Diehl *et al.*, 2017). Ces opérations de maîtrise ont généré un séisme de magnitude 1,6 qui a déclenché le niveau orange des feux de signalisation. Si ce niveau est atteint, il est prévu dans la procédure d'arrêter d'injecter. Cependant, à cause de la remontée de gaz ce n'était pas possible (sinon la pression aurait augmenté en tête de puits avec le risque d'un [blowout](#) c'est-à-dire une explosion de tête de puits). Il a donc été décidé de maintenir la pression. La sismicité a augmenté et un séisme de magnitude M1,1 s'est produit, suivi du séisme de magnitude M1,5 (Mw3,3). Le 24 juillet les opérations de maîtrise ont été arrêtées et la sismicité s'est arrêtée le 25 juillet (Figure 17). La sismicité a repris mi-septembre, probablement en lien avec les opérations de nettoyage du puits (Diehl *et al.*, 2017).

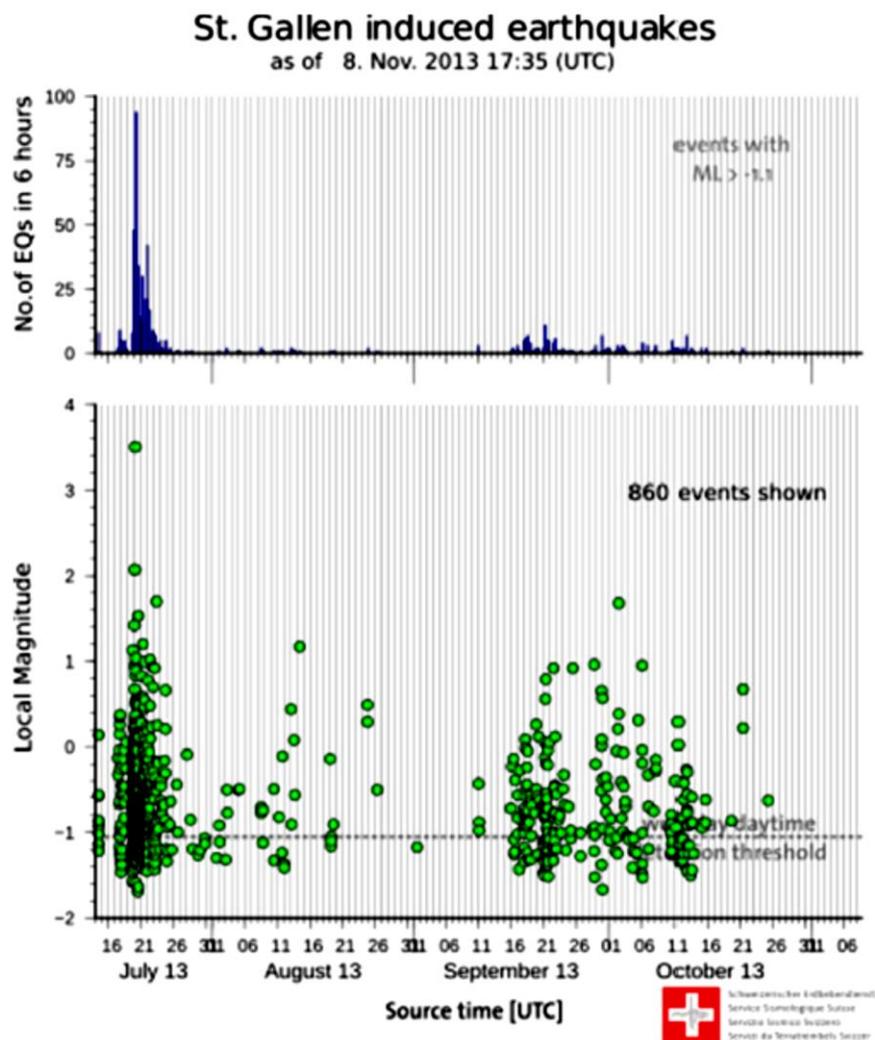


Figure 17 : Évolution de la sismicité pendant le projet de Saint-Gall (Hirschberg and TA-SWISS, 2015).

7.4.5. Évolution spatio-temporelle des événements

Les événements précédant le séisme de magnitude 3.5 sont restés confinés à quelques centaines de mètres autour du forage. En considérant toute la séquence sismique, la sismicité s'est propagée à environ 1 km du forage et le nuage de sismicité à une extension d'environ 2 km (Diehl *et al.*, 2017).

La sismicité s'est arrêtée quand les tests de production ont commencé le 15 octobre (Hirschberg and TA-SWISS, 2015). Cela sous-entend que la sismicité est très sensible aux variations de pression dans le puits et peut-être initiée et arrêtée facilement. Ces résultats suggèrent que dans les systèmes avec une grande conductivité hydraulique, un moyen de mitiger la sismicité est de diminuer la pression en pompant si un des niveaux de feu de signalisation est atteint (Diehl *et al.*, 2017).

7.4.6. Procédure après l'événement

En août 2013, il a été décidé de continuer le projet, avec un fort soutien du public (Moeck *et al.*, 2015).

Au moment de la remontée de gaz, aucune des propriétés du [réservoir](#) (pression, volume et fraction de gaz) n'était connue. Pour les déterminer, il a été décidé de réaliser un test de production en octobre. Ces tests ont révélé un débit de seulement 10 % de ce qui était espéré. Pour évaluer la taille de la poche de gaz, un test de production longue durée est nécessaire. Cependant, à cause de ce débit faible, il faudrait des procédures de [stimulation](#) pour atteindre un débit satisfaisant. Le risque de sismicité serait élevé. L'option la plus raisonnable semble donc de convertir le forage géothermique en forage de gaz. La décision d'arrêter le projet géothermal n'est donc pas due directement au séisme mais au [risque sismique](#) et aux conditions opérationnelles qui ne sont pas bonnes (Moeck *et al.*, 2015).

7.4.7. Résumé des paramètres

Paramètres impactant le risque sismique		Événement Saint-Gall
Liés au site	Type de roche	Carbonates (Malm)
	Caractéristique hydrogéologique	Zone de faille
	Température	145 °C
	Proximité d'une ville	Oui
Liés à l'activité anthropique	Volume net de fluide injecté	700 m ³
	Débit	?
	Pression en tête de puits max	?
	Stimulation	n.a.
	Profondeur du forage	4,2 km

Tableau 6 :Récapitulatif des paramètres du site de Saint-Gall.

Le séisme de Saint-Gall est dû à une venue inattendue de gaz qui a nécessité des opérations de tubage du puits avec de la boue dense pour éviter un [blowout](#). Ces opérations ont déclenché le niveau orange du système de feux de signalisation donc le risque de séisme était identifié. Cependant, la maîtrise du risque de [blowout](#) a été jugée plus importante et donc les opérations de maîtrise de la venue de gaz ont continué. Ces opérations de maîtrise ont augmenté la pression dans le [réservoir](#). C'est donc un accident qui s'est produit dans un contexte très particulier résultant d'une connaissance insuffisante du sous-sol.

7.5. POHANG (CORÉE - 2017)

Cet évènement a été étudié dans un rapport de la commission d'enquête qui est rédigé en anglais (Korean Government Commission, 2019). La plupart des informations sur cet évènement sont issues de ce rapport, les autres sources sont citées.

7.5.1. Le projet

Le projet est décrit dans le projet européen DESTRESS¹⁹ et par Lee *et al.* (2011).

Le projet [EGS](#) de Pohang avait pour but de démontrer le potentiel de production d'énergie géothermique dans un [réservoir](#) à 5 km de profondeur. C'était le premier projet [EGS](#) en Corée. Il a commencé en décembre 2010, se donnant l'objectif de produire 1 MW d'électricité avec un doublet géothermal. Le projet est mené par un consortium de 3 industriels (Nexgeo, POSCO, Innogeo Tech. Inc.), 2 instituts de recherche (KIGAM, KICT) et une université (Seoul National University). L'opérateur est Nexgeo. Le projet a été étendu à un triplet pour augmenter la production d'électricité.

Le projet est financé par le gouvernement (18,5 millions \$) et des industriels (25.3 millions \$) sud-coréens pour un budget total de 43,8 millions de dollars.

Ce projet de 5 ans était séparé en deux phases. La première phase de 2010 à 2012 avait pour objectif de confirmer une température supérieure à 100 °C et d'estimer la quantité d'énergie qui pouvait être extraite du site sélectionné à 5 km de profondeur. Pendant cette phase un premier forage PX-1 de 3 km de profondeur a été foré ainsi qu'un forage d'exploration EXP-1 profond de 1 km (Kim et al., 2018). La seconde phase de 2012 à 2015 devait être dédiée à la construction d'un doublet et aux [stimulations](#) hydrauliques. Le premier forage PX-1 atteint 4 217 m de profondeur et PX-2 4348 m de profondeur. Le gradient de température mesuré est de 41 °/km.

7.5.2. Sismicité naturelle dans la région

Le site est situé dans le bassin de Pohang, un bassin sédimentaire formé au début du Miocène.

La sismicité est modérée en Corée avec 10 séismes de magnitude Mw supérieure à 5 depuis le début de la période instrumentée en 1978. Le séisme le plus récent, avant l'évènement de Pohang, était le séisme de Gohang, M_l5.8, le 12 septembre 2016. Il avait été précédé d'un séisme précurseur 48 minutes plus tôt de magnitude M_l5.1. Ce séisme s'est produit à 40 km du site de Pohang. Le séisme de Gohang s'est produit à environ 15 km de profondeur sur une [faille](#) décrochante très inclinée plongeant vers l'est avec un azimut nord-nord-est.

7.5.3. Phase durant laquelle la sismicité est survenue

Le séisme s'est produit après 5 [stimulations](#) hydrauliques.

Elles ont été réalisées entre le 29 janvier 2016 et le 18 septembre 2017. La 1^{re}, 3^{ème} et 5^{ème} [stimulations](#) ont été effectuées dans le puits PX-2 et la 2^{ème} et 4^{ème} dans PX-1. Chaque [stimulation](#) inclut des périodes multiples d'injection, d'arrêt des [stimulations](#) ([shut-in](#)) et de remontée de fluide ([flowback](#)).

¹⁹ <http://www.destress-h2020.eu/en/demonstration-sites/pohang/>

Les [stimulations](#) avaient pour but de connecter les deux forages (Kim *et al.*, 2018). En particulier, la première [stimulation](#) dans PX-2 devait permettre de caractériser les propriétés du [réservoir](#) et induire la propagation d'une fracture qui pouvait améliorer la perméabilité du [réservoir](#) (Park *et al.*, 2017).

Deux [stimulations](#) ont été réalisées dans PX-1 avec 5663 m³ d'injecté et 3978 m³ sont ressortis ([flowback](#)). Pour PX-2 au total 7 135 m³ ont été injectés et 2989 m³ sont ressortis ([flowback](#)). Au total, en tenant compte de toutes les [stimulations](#), 5841 m³ sont restés dans le [réservoir](#). La pression maximale dans PX-2 était de 89,2 MPa en tête de puits et 27,71 MPa pour PX-1.

7.5.4. L'évènement

Le séisme s'est produit après la 5^{ème} [stimulation](#) pendant l'arrêt des [stimulations](#) ([shut-in](#)) de PX-1 et la remontée de fluide ([flowback](#)) dans PX-2. Avant ce séisme, il y avait eu de la sismicité durant les périodes de [stimulation](#) précédentes.

Au total 5 [stimulations](#) hydrauliques ont été réalisées, leur évolution en temps est présentée en Figure 18. De la sismicité a été associée aux [stimulations](#) de PX-1 mais c'est de la [microsismicité](#) avec seulement une magnitude Mw2 qui s'est déroulée des semaines après la fin de la [stimulation](#). La seconde [stimulation](#) de PX-1 a généré très peu de sismicité.

La sismicité associée aux [stimulations](#) de PX-2 est plus importante et s'organise selon un plan avec la plupart des évènements localisés à ± 60 m de ce plan.

La première [stimulation](#) dans PX-2 a été réalisée du 26 janvier au 20 février 2016 et est décrite par Park *et al.* (2017). 1970 m³ d'eau ont été injectés. La pression en tête de puits a atteint 89,2 MPa au maximum et le débit maximal était de 46 L/s. Plusieurs méthodes ont été testées en terme de stratégie d'injection lors de cette [stimulation](#) : augmentation et diminution du débit par pallier, injection cyclique, injection longue période, [shut-in](#) longue période, injection soudaine à haut débit et [purge](#). La sismicité associée à cette [stimulation](#) a été modérée avec un évènement maximum de magnitude Mw1,4 le 2 février. Il a été observé que le nombre et l'amplitude des évènements étaient plus importants pendant les périodes de [shut-in](#).

La seconde [stimulation](#) de PX-2 a généré de la [microsismicité](#) avec un évènement de magnitude 3.1 quand le puits était en [shut-in](#). La sismicité a continué pendant un mois environ.

La troisième [stimulation](#) était une [stimulation](#) durant laquelle le concept de soft-stimulation a été testé (Hofmann *et al.*, 2019). Cette [stimulation](#) consistait en une injection cyclique avec des phases alternées de débit fort et faible. Durant et immédiatement après cette [stimulation](#) la sismicité a été maîtrisée en dessous du seuil de magnitude Mw2 avec un [flowback](#) initié immédiatement après un évènement de magnitude Mw1.9.

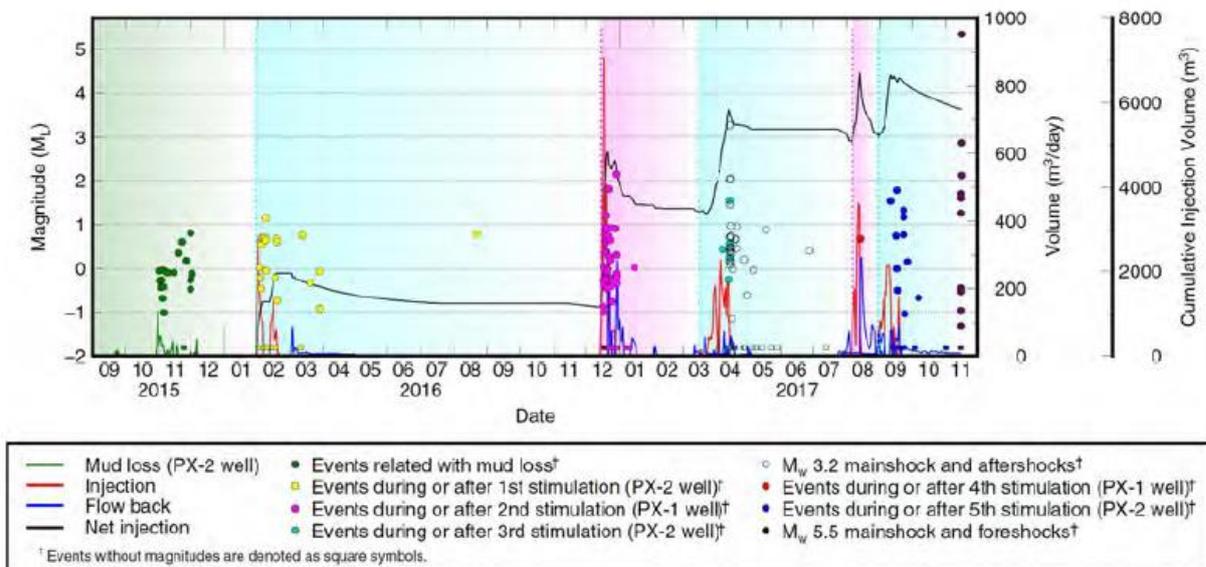


Figure 18 : Évolution temporelle des [stimulations](#) et de la sismicité à Pohang. Les séismes avec leur magnitude locale sont représentés par des points colorés avec leur échelle à gauche. L'injection journalière, le volume de [flowback](#) et le volume injecté cumulé sont illustrés par des lignes colorées (échelle à droite).

Les modèles produits par la commission d'enquête montrent que la variation de pression s'est propagée sur plusieurs centaines de mètres et que la perturbation de pression au niveau de l'[hypocentre](#) du séisme est supérieure à 0,05 MPa. La commission d'enquête a conclu que le séisme de magnitude M_w 5.5 a été déclenché et non pas induit, en particulier à cause de la taille de ce séisme (les opérations réalisées n'induisent pas un chargement assez grand pour relâcher un tel niveau d'énergie).

7.5.5. Évolution spatio-temporelle des événements

La sismicité associée aux deux forages est localisée dans des zones distinctes. La sismicité associée à la [stimulation](#) de PX-1 est limitée, localisée autour de la profondeur de la partie ouverte du forage dans un volume de 800 m de hauteur, 500 m de long et 230 m de large. Aucun plan ne peut être associé à cette sismicité, elle illumine tout un volume. Elle a continué pendant des semaines après la [stimulation](#).

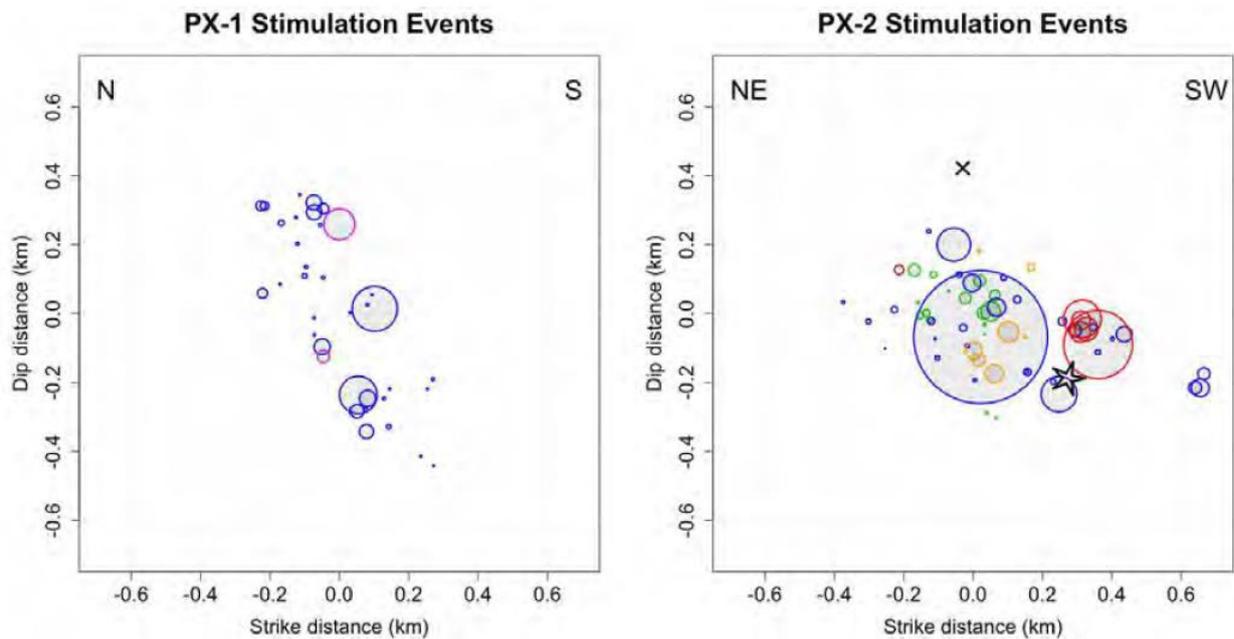


Figure 19 : Séismes associés aux [stimulations](#) de PX-1 (gauche) et PX-2 (droite) projetés sur le meilleur plan dans chaque cas. Pour PX-1 les coordonnées sont relativement au centre de sismicité.

Les séismes en bleu sont associés à la première [stimulation](#) et ceux en magenta sont associés à la seconde [stimulation](#) de PX-1. Pour PX-2 le fond de puits est localisé en (0,0) 375 m derrière le plan tracé. L'intersection du puits avec le plan à 3 800 m de profondeur est marqué par un x. L'événement associé à la perte de boue est tracé en marron, les événements associés à la première [stimulation](#) sont marqués en vert, ceux associés à la seconde [stimulation](#) sont en bleu et ceux associés à la troisième [stimulation](#) de PX-2 sont en jaune. Les précurseurs du séisme sont en rouge.

Par contre la sismicité associée à PX-2 forme un plan de 1 000 m de long et 500 m de large avec une épaisseur de 200 m. Elle s'étend jusqu'à environ 800 m de la partie ouverte du forage mais commence à 200 m du forage. 49 jours après la [microsismicité](#) associée à la dernière [stimulation](#) de PX-2 et 58 jours après la dernière activité de [stimulation](#), des séismes précurseurs se sont produits, suivis du séisme de magnitude Mw5,5. Ce dernier s'est produit à quelques centaines de mètres du forage, dans la zone adjacente aux [séismes déclenchés](#) par les [stimulations](#).

Le séisme a rompu une zone de 600*1 000 m² environ.

7.5.6. Procédure après l'évènement

135 personnes ont été blessées lors du séisme de magnitude Mw5,5, 1 700 personnes ont dû être relogées dans des logements d'urgence. Le séisme a généré plus de 75 millions de dollars de dommages à plus de 57 000 structures et a eu un impact économique de 300 millions de dollars, d'après la banque de Corée.

Le gouvernement a indemnisé les victimes sur la base de réglementations préexistantes sur les catastrophes naturelles, comme par exemple 7 735 \$ pour une maison détruite et 3 868 \$ pour une maison partiellement détruite²⁰.

²⁰ <https://thediomat.com/2019/12/the-social-fallout-from-pohangs-man-made-earthquake/>

La société géologique de Corée, mandatée par le gouvernement coréen, a mis en place une commission composée de deux comités, un panel de chercheurs internationaux formant le comité ORAC (Oversea research advisory committee) et des chercheurs coréens formant le comité KERT (Korean expert research team). Son objectif était de déterminer si les activités de [stimulation](#) liées à la géothermie étaient la cause du séisme. Ces chercheurs sont spécialisés en sismologie, géomécanique, géologie, hydrogéologie ou géophysique. Ils devaient répondre à la question de savoir si le séisme de Pohang était induit. Le rapport du comité ORAC est disponible en anglais. Ce comité a travaillé un an, de mars 2018 à mars 2019, en utilisant les données fournies par les l'équipe du projet, les chercheurs de l'agence météorologique coréenne et des chercheurs d'universités non-impliquées dans le projet ou le comité.

La commission d'enquête a montré en étudiant la sismicité de chaque [stimulation](#) et l'évolution des paramètres hydrauliques qu'il y avait un manque de connectivité entre les deux puits et que chaque puits appartenait à un régime hydraulique différent.

Le comité a conclu que les activités de [stimulation](#) ont déclenché le séisme, plus précisément elles ont réactivé une [faille](#) qui, à son tour, a déclenché le séisme. D'autre part, leur rapport a mis en lumière qu'au moment du forage du puits, une [faille](#) avait été recoupée. C'est sur cette [faille](#), qui plus tard a rompu, que le séisme de magnitude Mw5,5 s'est produit. Il est apparu que la sismicité associée aux [stimulations](#) de PX-2 se localisait sur cette même structure. Si cette analyse avait été réalisée plus tôt, les opérations auraient vraisemblablement été menées différemment. Dans tous les cas, cela suggère que ce type d'information doit être analysée durant la vie d'un projet et qu'une analyse de risques qui en découle devrait être fournie aux autorités.

7.5.7. Règlements

Il n'y avait pas de réglementation spécifique sur les [séismes induits](#) en Corée du Sud, mais le gouvernement local demande actuellement au gouvernement coréen d'introduire une législation sur la compensation des victimes de séisme. Cette demande est en réponse au nombre de plus en plus élevé de personnes intentant un procès au gouvernement²¹. La promulgation de cette législation a été retardée jusqu'à présent (fin 2019) en raison de conflits entre le parti au pouvoir et l'opposition²².

Les pressions en tête de puits étaient très élevées (89 MPa = 890 bars), de tels niveaux n'auraient pas pu être appliqués sur des sites équivalents en France (sites EGS) puisque la réglementation de ces sites limite la pression en tête de puits à 10 MPa (100 bar).

²¹ <https://thediplomat.com/2019/12/the-social-fallout-from-pohangs-man-made-earthquake/>

²² https://english.khan.co.kr/khan_art_view.html?code=710100&artid=201911131935237&medid=enkh

7.5.8. Résumé des paramètres

Paramètres impactant le risque sismique		Événement Pohang	
Liés au site	Type de roche	socle granitique	
	Caractéristique hydrogéologique	réseau fracturé	
	Température	190 °C	
	Proximité d'une ville	Oui	
Liés à l'activité anthropique	Volume net de fluide injecté	5 841 m ³ (4 186 m ³ pour PX-2 et 1 685 m ³ pour PX-1)	
	Débit	Max 46.8 L.s ⁻¹	
	Pression en tête de puits max	89,.2 MPa (dans PX-2)	
	Stimulation	Type	5 stimulations hydrauliques dans deux puits
		Durée	Étalée sur 2 ans
	Profondeur du forage	4,3 km	

Tableau 7 : Récapitulatif des paramètres du site de Pohang.

7.5.9. Comparaison des événements

Les tableaux ci-dessous résume les caractéristiques des événements induits ainsi que des paramètres opérationnels.

	Soultz-sous-Forêt (France)	Bâle (Suisse)	Landau (Allemagne)	Saint-Gall (Suisse)	Pohang (Corée)
Magnitude	Md2.6 en 2000 MI2.9 en 2003	MI3.4	MI2.7	MI3.5 (Mw3.3)	Mw5.5
Date	2000 et 2003	2006	2009	2013	2017
Origine anthropique : certaine ou débattue	Non	Non	Oui, commission enquête	Non	Oui, commission enquête
Distance du forage	Évènements les plus éloignés à 1,5 km du site	200 m	1,5 à 2 km du puits	Quelques centaines de mètres	Quelques centaines de mètres
Distance temporelle d'action significative sur site	2000 : 1 semaine après les stimulations hydrauliques 2003 : pendant la stimulation hydraulique	Pendant les opérations de maîtrise de la sismicité, shut-in du puits	Juste après l'arrêt des opérations	Pendant les opérations de maîtrise de venue de gaz	58 j après dernière stimulation
Poursuite de l'exploitation	Oui	Non	Oui	Non (mais pour des raisons de viabilité)	Non
Domages	10 plaintes pour le séisme de 2000 et 46 pour le séisme de 2003	6,5 millions d'euro de compensation	63 plaintes dont 12 potentiellement recevables indemnisées entre 200 et 1 200€	12 plaintes	135 blessés, 1 700 relogés, 75 millions \$ de dommages

Tableau 8 : Récapitulatif des paramètres liés aux événements sismiques étudiés.

Les séismes se sont produits à proximité des sites opérationnels avec des décalages en temps qui vont jusqu'au mois. Seuls les séismes de magnitude supérieure à 3 ont conduit à l'arrêt du projet, ce sont aussi ces événements qui ont induit des coûts importants.

		Soultz-Sous-Forêts (France)	Bâle (Suisse)	Landau (Allemagne)	Saint-Gall (Suisse)	Pohang (Corée)
Phase du projet		stimulation	stimulation	exploitation	tests d'injection	stimulation
Paramètres d'exploitation	Débit	2000 : 30-40-50 L.s ⁻¹ 2003 : 20 et 60 L.s ⁻¹ , pic à 90 L.s ⁻¹	50 L.s ⁻¹	70 L.s ⁻¹	n.a	Max 46,8 L.s ⁻¹
	Surpression max	2000 : 14.5 MPa 2003 : 16 MPa	30 MPa	5 MPa	?	89 MPa
	Volume total injecté	2000 : 23 400 m ³ 2003 : 37 300 m ³	5 600 m ³	n.a.	700 m ³ de boue de forage en 18h	PX-1 : 1 695 m ³ PX-2 : 4 146 m ³ Total : 5 841 m ³
Cause identifiée		Injection de fluide ayant généré une surpression	Injection de fluide ayant généré une surpression au niveau d'une faille critiqueusement chargée	Circulation du fluide sur le long terme ayant généré une surpression	Maîtrise de venue de gaz qui a causé une pression élevée	Injection de fluide qui a activé une faille ce qui a déclenché l'événement

Tableau 9 : Récapitulatif des paramètres liés aux opérations.

On peut conclure de ces observations que les séismes anthropiques les plus importants se produisent en période de [stimulation](#) donc il est nécessaire de bien surveiller cette étape. On observe également que les surpressions les plus grandes ont été appliquées à Pohang et Bâle, si on exclut le cas particulier de Saint-Gall (mais dans ce cas aussi une surpression importante a dû être générée dans le [réservoir](#) même si elle n'a pas été estimée), et ce sont les deux cas où des séismes de magnitude assez importante se sont produits.

8. Grandeurs caractérisant la sismicité

8.1. LA MAGNITUDE

La sismicité est généralement caractérisée par la magnitude, pour des raisons historiques. La magnitude permet de quantifier la puissance d'un séisme (Contrucci and Klein, 2017); elle est directement reliée à l'énergie libérée par la source du séisme et est corrélée à la surface mobilisée lors du phénomène et au déplacement moyen. La magnitude est généralement utilisée pour comparer les séismes entre eux. Il existe en réalité plusieurs méthodes pour la calculer, et de ce fait plusieurs échelles, dont la plus connue est de celle de Richter. Peter Shearer (2011) décrit bien cette grandeur et les différents types de magnitude existants.

La première définition de magnitude a été établie par Richter dans les années 1930. Cette magnitude est aujourd'hui appelée la magnitude locale M_l . Une relation approximative a été définie pour M_l ne dépendant que de A , l'amplitude maximale des ondes sismiques, exprimée en microns et de X , la distance épacentrale, exprimée en kilomètres :

$$M_l = \log_{10} A + 2.56 \log_{10} X - 1.67 \quad (1)$$

La plupart des séismes régionaux et [séismes induits](#) sont exprimés en magnitude M_l . Son inconvénient est qu'elle a été déterminée pour une région spécifique, la Californie donc son utilisation dans d'autres régions peut être questionnée. En France c'est la magnitude M_l qui est utilisée dans les [catalogues de sismicité](#).

D'autres mesures de magnitudes ont été développées plus tard, telles que la magnitude d'ondes de volume, m_b , ou la magnitude d'ondes de surface, M_s . Ce qu'il faut retenir de ces différentes magnitudes est qu'elles sont définies de manière différente et ne sont pas équivalentes sur toute une gamme de magnitude. M_s et m_b ont été définies de manière à être équivalentes à M_l pour les événements locaux en Californie.

Une magnitude très utilisée dans la communauté scientifique est la magnitude de moment, M_w . Elle est entièrement dérivée du moment qui est lié à une propriété physique de la source, à savoir le couple de forces exercé par la rupture :

$$M_w = \frac{2}{3} [\log_{10} M_o - 9.1] \quad (2)$$

Le couple de forces, ou moment sismique peut être ramené à l'expression suivante :

$$M_o = G \bar{D} S \quad (3)$$

G est le module de cisaillement, une propriété mécanique de la roche, D est le déplacement moyen de la [faille](#) et S est l'aire de la [faille](#). Le moment est généralement exprimé en N.m et il est assimilable à une énergie.

Cette magnitude de moment, quand elle est disponible, est la magnitude privilégiée ; cependant, elle n'est calculable que lorsque suffisamment d'enregistrements sont disponibles, ce qui limite en pratique cette échelle de magnitude à des valeurs supérieures à $M_w=5$ pour des séismes observés par les réseaux nationaux et internationaux, et $M_w>2$ pour des réseaux locaux suffisamment denses (plus de 6 stations ayant enregistré l'événement).

Il existe différentes échelles de magnitude et les observatoires ont des enregistrements sismiques différents à leur disposition pour la calculer. Par ailleurs, l'estimation de la plupart des magnitudes implique de connaître avec précision la position du séisme : des écarts dans cette position peuvent conduire à des magnitudes plus fortes ou plus faibles - ce qui explique que la magnitude d'un séisme peut être revue au fur et à mesure que sa position est mieux connue (il est couramment admis dans la communauté sismologique que la magnitude d'un séisme est précise au mieux à 0,5 près). Ces deux phénomènes combinés expliquent qu'il est courant de voir circuler différentes valeurs de magnitudes (Auclair and Appéré, 2019).

Pour présenter autrement la compréhension de cette échelle de magnitude, on peut reprendre l'explication de Auclair (2019) : l'échelle de magnitude est une échelle logarithmique c'est-à-dire qu'elle se comporte comme une loupe grossissante de facteur environ 30 ($10^{3/2}$). Un séisme de magnitude 3 est 30 fois plus puissant qu'un séisme de magnitude 2 et 900 (30×30) fois plus puissant qu'un séisme de magnitude 1. Une autre conséquence de l'échelle logarithmique est qu'il est possible d'avoir des séismes de magnitude négative. Cela signifie juste que l'énergie libérée est faible (30 fois plus faible pour un séisme de magnitude -1 que pour un séisme de magnitude 0). Ces magnitudes négatives sont même très fréquentes pour la [microsismicité](#).

Ces relations permettent de donner des ordres de grandeur des séismes dans le sens « taille de la zone qui a glissée ». Les équations (2) et (3) peuvent être combinées pour relier l'aire de la zone qui a glissé à la magnitude. Il est possible, avec des relations empiriques (Pearson, 1982; Wells and Coppersmith, 1994) de relier la magnitude à la taille de glissement sur une [faille](#). Ces relations sont différentes suivant la taille du séisme. Un séisme de magnitude Mw7 (i.e. un séisme naturel dans une zone active, comme le Japon) correspond à une taille de rupture de 50 km environ. Un séisme de magnitude Mw2 (taille limite des [séismes induits](#) acceptables souvent adoptée) correspond à une rupture d'environ 100 m. Un microséisme de magnitude 0 correspond à une rupture d'environ 10m.

8.2. L'INTENSITÉ MACROSISMIQUE

L'intensité macrosismique permet de caractériser la sévérité d'une secousse sismique en un endroit donné (Auclair and Appéré, 2019). Cette valeur est établie à partir des témoignages des gens sur place, mis en forme par un questionnaire standard. Cette mesure est importante car elle permet de se rendre compte rapidement des dégâts potentiels ; de plus, grâce au grand nombre de témoignages qui peuvent être recueillis, l'intensité macrosismique permet d'obtenir des résultats utiles même en l'absence de mesure instrumentale – il s'agit donc d'une méthode de grande valeur pour étudier les séismes survenus dans les secteurs non couverts par l'instrumentation ou les séismes historiques. En France le Bureau Central Sismologique Français (BCSF) centralise le recueil et le traitement de ces témoignages depuis 2005 (<http://www.franceseisme.fr/>). Pour tout séisme de magnitude supérieure à M13.5, une enquête est déclenchée qui regroupe les données issues d'enquêtes préfectorales et des témoignages de la population sur le site. En cas de dégâts, une enquête sur le terrain peut être déclenchée.

L'intensité macrosismique permet de classer la sévérité du mouvement du sol localement, sur la base des effets observés, que cela soit sur les bâtiments ou le ressenti des personnes (Shearer, 2011). Il existe différentes échelles d'intensité ; l'échelle utilisée en Europe est l'échelle EMS-98, adoptée suite aux travaux de l'European Seismology Commission. Cette intensité est utilisée pour tous les types de séismes, naturels ou anthropiques. Le Tableau 10 explique les différents degrés d'intensité de manière simplifiée. L'intensité observée par une personne dépend à la fois de la magnitude d'un événement et de sa profondeur (Figure 20) ainsi que de la distance entre une personne et l'[épicentre](#) (point à la surface situé à la verticale d'un séisme) du séisme. Plus on s'éloigne de l'[épicentre](#), moins on ressent le séisme. Cela se comprend bien en utilisant

l'analogie de Auclair et Appéré (2019) avec le son : pour se faire entendre de son interlocuteur, il suffit d'élever la voix (magnitude plus grande) ou de se rapprocher (distance moins élevée). Un séisme de magnitude $M_w < 2.7$ à 5 km de profondeur, comme le séisme induit de Soultz-Sous-Forêts, sera enregistré par les instruments mais peu ressenti. En revanche, un séisme de magnitude $M_w 3.2$ à 5 km de profondeur, comme le séisme induit de Bâle, sera largement ressenti par les personnes à proximité. Par contre, ce même séisme de magnitude $M_w 3.2$, s'il se situe à 20 km de profondeur, ce qui est raisonnable pour un séisme naturel, ne sera pas ressenti. Dans le cas des séismes anthropiques dus à la géothermie, l'intensité maximale est généralement inférieure à V.

Intensité EMS	Définition	Description des effets typiques observés
I	Non ressenti	Non ressenti
II	À peine ressenti	Ressenti uniquement par quelques personnes au repos dans les maisons
III	Faible	Ressenti à l'intérieur des habitations par quelques personnes. Les personnes au repos ressentent des vibrations ou un léger tremblement
IV	Largement observé	Ressenti à l'intérieur par un grand nombre de personnes, à l'extérieur par seulement quelques personnes. Quelques personnes peuvent être réveillées. Les fenêtres, portes et la vaisselle vibrent.
V	Fort	Ressenti à l'intérieur des habitations par la majorité des personnes, à l'extérieur ressenti par quelques-uns. Beaucoup de personnes endormies se réveillent. Quelques personnes sont effrayées. Les bâtiments vibrent. Les objets suspendus se balancent fortement. Les petits objets sont déplacés. Les portes et fenêtres s'ouvrent ou se ferment.
VI	Dégâts légers	De nombreuses personnes sont effrayées et se précipitent dehors. Quelques objets tombent. De nombreuses maisons subissent des dégâts non-structuraux légers comme de très fines fissures et des chutes de petits morceaux de plâtre
VII	Dégâts	La plupart des personnes sont effrayées et se précipitent dehors. Les meubles se déplacent et beaucoup d'objets tombent des étagères. De nombreuses maisons ordinaires bien construites subissent des dégâts modérés : petites fissures dans les murs, chutes de plâtres, chutes de parties de cheminées; des bâtiments plus anciens peuvent présenter de larges fissures dans les murs et la chute de cloisons de remplissage.
VIII	Dégâts importants	De nombreuses personnes éprouvent des difficultés à rester debout. Beaucoup de maisons ont de larges fissures dans les murs. Quelques bâtiments ordinaires bien construits présentent des chutes sérieuses de murs, tandis que des structures anciennes peu solides peuvent s'écrouler.
IX	Destruction	Panique générale. De nombreuses constructions peu solides s'écroulent. Même des bâtiments bien construits présentent des dégâts très importants : chutes sérieuses de murs et effondrement structural partiel.
X	Destruction importante	De nombreux bâtiments bien construits s'effondrent.
XI	Dévastateur	La plupart des bâtiments bien construits s'effondrent, même ceux ayant une bonne conception parasismique sont détruits.
XII	Complètement dévastateur	Pratiquement tous les bâtiments sont détruits.

Tableau 10 : Description simplifiée de l'échelle d'intensité EMS98. D'après (Grünthal, 1998).

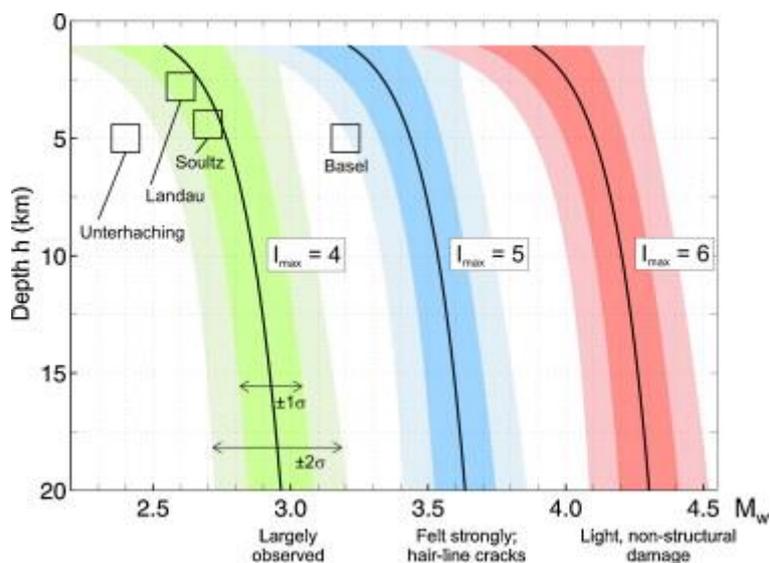


Figure 20 : Lien entre la magnitude M_w et la profondeur pour des intensités de 4, 5 et 6 pour des évènements en Europe centrale. D'après (Grünthal, 2014).

8.3. MOUVEMENT DU SOL

La sévérité d'une secousse sismique peut également être mesurée de manière instrumentale, comme vu plus haut. Les [sismomètres](#) enregistrent directement le mouvement du sol en un endroit donné (là où ils sont situés). Deux grandeurs physiques permettent de quantifier le niveau de vibrations générées par un séisme : l'accélération ou la vitesse maximale du sol, suivant le type d'instrument. Le PGA (Peak Ground Acceleration) ou le PGV (Peak Ground Velocity) correspondent à l'amplitude maximale enregistrée sur un sismogramme (en accélération ou en vitesse).

Le PGA et le PGV sont des grandeurs très utilisées, car ce sont des mesures directes d'une part (contrairement à la magnitude qui nécessite des calculs), et ce sont des grandeurs qui sont utilisées par les ingénieurs du génie parasismique pour dimensionner des structures (Contrucci and Klein, 2017). C'est pour ces raisons que ces grandeurs commencent à être utilisées dans les arrêtés préfectoraux régulant le développement et l'exploitation des sites géothermiques comme nous l'avons vu dans le chapitre 1, ainsi que pour les tirs de carrière depuis maintenant une vingtaine d'années.

Il est difficile de relier directement le PGA ou le PGV à la magnitude puisque cette mesure du mouvement du sol dépend : de la magnitude, de la profondeur du séisme, des caractéristiques de la roche entre l'[hypocentre](#) et le point de mesure. Pour donner un ordre de grandeur, le séisme du Teil du 11 novembre 2019 de magnitude $M_{5.2}$ et profondeur 2 km a généré un PGV de $0,4 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ et un PGA de $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ à une station localisée à environ 30 km de l'[épicerentre](#)²³.

Un lien entre le mouvement du sol mesuré et les intensités macrosismiques peut être défini (Figure 21). Le seuil de 1 mm/s ($0,1 \text{ cm/s}$ dans la Figure 21) défini dans les arrêtés préfectoraux alsaciens comme niveau de vigilance renforcée (section 6.1) correspond à une perception faible d'un événement.

²³ http://www.franceseisme.fr/images/ShakeMap_stationlist-930.txt

Intensités EMS98	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X+
Dégâts potentiels bâtiments vulnérables	aucun	aucun	aucun	aucun	très légers	modérés	quelques effondrements partiels	nombreux effondrements partiels	nombreux effondrements	effondrements généralisés
Dégâts potentiels bâtiments peu vulnérables	aucun	aucun	aucun	aucun	aucun	aucun	très légers	modérés	effondrements partiels	nombreux effondrements
Perception humaine	aucune	très faible	faible	modérée	forte	brutale	très brutale	sévère	violente	extrême
PGA (%g)	<0.02	0.07	0.3	1.1	4.7	8.6	16	29	52	>96
PGV (cm/s)	<0.007	0.03	0.1	0.5	2.3	5.5	13	31	73	>174
PSA 0.3s (%g)	<0.010	0.05	0.3	1.5	8.3	16	31	59	112	>214
PSA 1.0s (%g)	<0.001	0.009	0.07	0.5	3.2	7.1	15	34	73	>160
PSA 3.0s (%g)	<0.0008	0.005	0.03	0.2	1.0	2.2	4.8	10	22	>48

Echelles de conversion : PGA, PGV / intensité basée sur Caprio et al. (2015); PSA / intensité basée sur Atkinson et Kaka (2007)

Figure 21: Conversion du PGA et PGV en intensité macrosismique.
Le PGA est exprimé en %g ou $1g=9.81 \text{ m.s}^{-2}$.

9. Mécanismes déclenchant de la sismicité induite

Un séisme peut être la conséquence de deux phénomènes principaux :

- une [faille](#) qui s'était formée il y a un certain temps se met à glisser,
- une nouvelle [faille](#) se forme.

Pour une [faille](#) qui existe déjà dans une roche, ses caractéristiques mécaniques dépendent de différents facteurs (le type de roche dans laquelle elle se situe, la façon dont elle s'est ouverte, sa taille...). Ces caractéristiques mécaniques vont permettre de déterminer son comportement quand elle est soumise à une sollicitation. En particulier, elle possède une friction qui traduit sa capacité à résister au mouvement (il est plus facile de faire glisser de l'acier sur de la glace que du caoutchouc sur de l'asphalte). Cette friction, μ , est comprise entre 0 et 1 et est généralement proche de 0,6. La condition pour qu'une [faille](#) rompe se traduit par une équation reliant la [contrainte](#) cisailante à la [contrainte](#) normale et à la pression : $\tau = \mu(\sigma_n - P)$. Si une [faille](#) est stable, les [contraintes](#) s'appliquant sur elle sont telles que :

$$\tau < \mu(\sigma_n - P) \quad (4)$$

Deux événements peuvent provoquer un glissement : (a) une augmentation de la pression (le côté droit de l'équation (4) diminue) ou (b) une redistribution des [contraintes](#) (Figure 22).

- La pression peut augmenter en raison des circulations de fluide, comme c'est le cas en milieu volcanique ou géothermal par exemple. Cette augmentation peut également être due à de l'injection de fluide, dans le cadre d'une activité de géothermie.
- La [contrainte](#) peut aussi varier à cause d'un changement local de [contrainte](#), lors d'un séisme à proximité par exemple, ou à cause des variations dans un [réservoir](#) lors du pompage ou de l'injection de fluide (McGarr *et al.*, 2002).

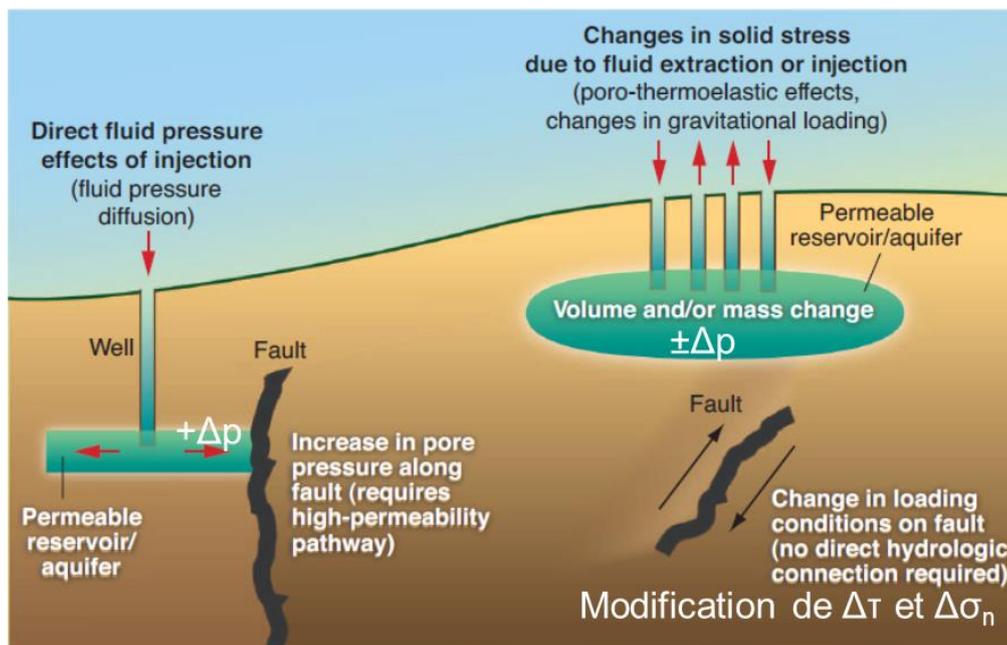


Figure 22 : Diagramme schématique pour les [séismes induits](#). Modifiés d'après (Ellsworth, 2013).

Les mécanismes que nous venons de voir sont dus à des interactions hydromécaniques. Deux autres phénomènes peuvent générer de la sismicité, les modifications chimiques et thermiques (Hirschberg and TA-SWISS, 2015). Ces deux autres sources de sismicité ont, à notre connaissance, un effet moins important²⁴ que les variations de pression. Tous ces effets sont couplés entre eux et ils s'impactent les uns les autres (les modifications chimiques peuvent impacter la circulation du fluide par exemple, ce qui a un effet hydraulique qui peut générer de la sismicité) mais nous pouvons lister les effets majeurs des modifications chimiques et thermiques. Dans le cas d'altération chimique, l'acidification ou le dépôt de minéraux peuvent modifier le comportement d'une [faille](#) et en particulier faciliter son glissement. Certains minéraux peuvent être dissous ce qui diminue les points de contact des deux côtés d'une [faille](#) et la rend susceptible de glisser. Ce phénomène peut se produire lors de [stimulations](#) chimiques ou lors de la mise en place de la circulation du fluide par exemple. L'autre source de sismicité est la variation de température causée par l'injection de fluide plus froid que la roche dans laquelle il est injecté. Le refroidissement ouvre les fractures ce qui réduit leur friction (μ dans l'équation (4) ce qui diminue le côté droit de l'équation) et facilite leur glissement. De plus, à cause de la contraction thermique il est possible que de nouvelles fractures se créent ce qui peut déclencher des microséismes (Majer *et al.*, 2007). Il faut noter que dans le cas des exploitations en métropole les différences de température sont de l'ordre de plusieurs dizaines de degrés (à l'exception des sites où des stimulations thermiques sont réalisés comme à Rittershoffen (Vidal *et al.*, 2016)) donc pas aussi importantes qu'en contexte volcanique.

²⁴ Les séismes ressentis jusqu'à présent l'ont été à cause de circulation de fluide donc au premier ordre à cause d'une variation de pression. Cependant ce fluide est en général à température moins chaude que la roche environnante et sa composition chimique peut varier par rapport à la composition du fluide d'origine. On ne peut donc totalement exclure que des modifications thermiques ou chimiques aient partiellement eu un rôle dans le déclenchement de séisme.

10. Terminologie

10.1. TERMES MÉCANIQUES

Dans ce rapport nous utilisons des terminologies couramment utilisées mais certains termes doivent être définis, notamment pour clarifier la différence sismicité induite et sismicité déclenchée.

Catalogue de sismicité : liste de séismes d'une région donnée avec leur localisation et leur magnitude. Un séisme est ajouté quand il est détecté par les [sismomètres](#) d'une région. Il existe un catalogue de sismicité français, distribué par le RéNaSS.

Contrainte : une contrainte est une [force](#) appliquée à une unité de surface. La contrainte qu'une particule P1 exerce sur une particule P2 à travers une surface peut être décomposée en deux composantes, une contrainte normale, σ_n , qui est perpendiculaire à la surface et une contrainte cisailante, τ , qui est parallèle à la surface. Dans le cas d'une [faille](#) qui glisse, plus la contrainte normale est grande plus le risque de glissement est faible mais plus la contrainte cisailante est grande plus le risque de glissement est grand. Si une boîte est posée sur une table, si on appuie dessus perpendiculairement à la table, on va générer une contrainte normale qui va l'empêcher de glisser mais si on le pousse vers le bord de la table par exemple on va générer une contrainte cisailante qui va le faire glisser. Dans le sol les contraintes sont très élevées et augmentent avec la profondeur à cause de la gravité (il suffit de penser qu'il est très facile de porter un caillou mais on aura beaucoup plus de mal à porter un rocher donc sous des kilomètres de roches on peut imaginer le niveau de contrainte). De plus à cause de la tectonique des plaques qui « poussent » ou « tirent » les plaques, des contraintes horizontales s'ajoutent à cet effet de la gravité.

Contrainte différentielle : différence entre la plus grande et la moins grande [contrainte](#) compressive.

Force : action d'un objet sur un autre. Une force a un point d'application, une direction, un sens et une intensité. Quand on appuie sur un bouton notre doigt exerce une force sur ce bouton.

10.2. TERMES SISMOLOGIQUES

Pour plus de définitions concernant la sismologie, consulter la documentation du musée de sismologie de l'université de Strasbourg²⁵. La plupart des définitions ci-après sont extraites de ce site.

Faille : fracture ou zone de rupture dans la roche, le long de laquelle les deux bords se déplacent significativement l'un par rapport à l'autre, parallèlement à la trace de la fracture.

Faille active : faille le long de laquelle il y a eu des mouvements à une époque géologique récente et qui est donc jugée susceptible d'engendrer un tremblement de terre.

Hypocentre et épïcentre : l'hypocentre est le foyer du séisme (l'endroit où il s'est produit), il est caractérisé par une longitude, une latitude et une profondeur. L'épicentre est le point de la surface

²⁵ <http://musee-sismologie.unistra.fr/comprendre-les-seismes/glossaire/#c34810>

terrestre situé à la verticale du foyer d'un séisme (pour différencier les deux termes il suffit de se rappeler que « épi » veut dire sur, au-dessus, l'épiderme est la partie superficielle de la peau).

Microsismicité (Contrucci and Klein, 2017) : tout type d'activité sismique dont la magnitude est inférieure au seuil de détection des réseaux sismologiques. Cette magnitude de détection est en général de l'ordre de $M=2$ et correspond à peu près à la magnitude à partir de laquelle un événement naturel ou induit peut-être ressenti par les populations en surface (cependant cela dépend également de la profondeur de l'événement).

Réplique : séismes de moindre importance succédant au plus grand (dit séisme principal) d'une série de séismes situés dans une zone proche.

Risque sismique : aléa sismique (probabilité qu'un séisme se produise) combiné aux enjeux (économiques et humains) et à la vulnérabilité (évaluation des conséquences d'un séisme sur le plan économique et humain) en un endroit donné.

Séisme : libération brutale d'énergie due à un mouvement sur une [faille](#). Ce mouvement engendre des secousses plus ou moins violentes à la surface du sol en fonction de l'énergie en jeu, de même qu'un caillou jeté dans l'eau générera des vaguelettes plus ou moins importantes suivant la taille du caillou par exemple.

Séisme déclenché : activité sismique provoquée ou accélérée par une perturbation extérieure. Cette perturbation extérieure peut-être naturelle, comme le passage des ondes d'un grand séisme lointain, ou due à l'activité humaine. La perturbation de [contrainte](#) est une fraction de la [contrainte](#) ambiante sur la [faille](#) qui génère le glissement (*Induced seismicity potential in energy technologies*, 2013). Cela signifie qu'un événement sismique naturel se serait probablement produit à plus ou moins long terme sans cette perturbation (Contrucci and Klein, 2017). Un séisme déclenché peut avoir une taille importante (souvent plus grande qu'un [séisme induit](#)) parce qu'il relâche beaucoup d'énergie emmagasinée contrairement à un [séisme induit](#) qui est limité par la quantité d'énergie fournie par le processus anthropique.

Séisme induit : activité sismique générée par une activité humaine qui ne serait jamais apparue sans l'intervention de l'homme (Contrucci and Klein, 2017). La perturbation de [contrainte](#) induite par l'homme est du même ordre de grandeur que la [contrainte](#) ambiante sur la [faille](#) qui génère le glissement (*Induced seismicity potential in energy technologies*, 2013).

Sismomètre : détecteur des mouvements du sol qui comporte un capteur mécanique, un amplificateur et un enregistreur.

10.3. TERMES GÉOTHERMIQUES

Une grande partie des termes utilisés sont en anglais et n'ont pas d'équivalent en français (ou ces équivalents ne sont pas utilisés couramment). Une partie des définitions des termes techniques provient du glossaire de [Schlumberger](#) traduit en français.

Aquifère : formations géologiques qui sont assez perméables et poreuses pour permettre les écoulements verticaux et transversaux de l'eau ainsi que de l'emmagasiner.

Blowout : éruption soudaine et incontrôlée de fluide à la surface.

EGS (Engineered/Enhanced Geothermal System ou géothermie « améliorée »): technologie qui rend exploitable l'énergie de [réservoirs](#) initialement peu développés en améliorant leur potentiel

de production. Les [réservoirs](#) à améliorer ont une perméabilité, une chaleur ou une réserve de fluide insuffisante ou une combinaison de ces trois éléments.

Flowback : écoulement du fluide hors du puits après un traitement en préparation d'une nouvelle phase de traitement ou en vue d'un nettoyage pour une mise en production.

ORC (centrale à fluide organique) : un cycle thermodynamique qui utilise un fluide organique comme fluide de travail (fluide secondaire) dans un circuit fermé pour la production d'électricité. La chaleur du fluide géothermal (fluide primaire) est transférée à ce fluide. Ce fluide organique peut utiliser de la chaleur basse température.

Purge : équilibrer ou relâcher la pression d'un système. A la fin de tests haute pression, la pression doit être relâchée de manière maîtrisée pour pouvoir réaliser les phases suivantes des opérations.

Réservoir : une structure souterraine naturelle stockant des liquides, comme de l'eau ou de la vapeur.

Shut in : interruption du débit; se dit d'un puits, d'une installation, d'une pompe lorsque les robinets d'entrée et de sortie sont tous deux fermés.

Stimulation : un traitement utilisé pour améliorer ou retrouver la productivité d'un puits. Cela peut être fait par l'injection d'eau à une certaine pression (stimulation hydraulique), par un choc thermal en injectant de l'eau froide dans la roche chaude (stimulation thermique), ou en dissolvant des minéraux (stimulation chimique).

11. Conclusion

La géothermie est une source d'énergie décarbonée qui peut jouer un rôle important dans l'atteinte des objectifs de diminution des gaz à effet de serre. C'est en outre une énergie renouvelable si elle est exploitée correctement. Cependant, comme toute activité industrielle, son exploitation comporte des risques. La sismicité induite est celui qui préoccupe le plus les publics (voir annexe, chapitre 14.1.2). Il est nécessaire de bien le prendre en compte mais c'est un risque qui peut être maîtrisé et qui n'est pas associé à tous les projets de géothermie. Le but de ce rapport était de clarifier ce risque de sismicité induite lié à la géothermie. Les caractéristiques de la sismicité induite ont été abordées ainsi que les facteurs favorisant son apparition. Une attention particulière a été portée à la réglementation française existante. Des cas concrets de sismicité induite liée à des opérations de géothermie profonde ont été étudiés pour évaluer l'ampleur du problème, les paramètres impactant le risque et les remettre en perspective par rapport au contexte français actuel.

Pour comprendre le risque de sismicité anthropique associé à la géothermie profonde en France, les points suivants sont à retenir :

- la géothermie est une activité susceptible de produire des séismes anthropiques, comme le sont d'autres activités industrielles. Le plus grand risque est associé aux séismes déclenchés qui sont en général plus grands que les séismes induits et donc susceptibles de causer plus de dégâts. Une bonne connaissance du sous-sol permet de limiter ce risque de séisme déclenché puisqu'il est associé à des failles préexistantes ;
- des événements de sismicité anthropique ne se sont produits que sur quelques sites spécifiques au regard du grand nombre de sites géothermiques en fonctionnement en France. Ces événements se sont produits plutôt pendant les phases de stimulation d'un projet, phases qui sont limitées à quelques jours consécutifs sur plusieurs semaines. L'occurrence de sismicité est liée aux caractéristiques du sous-sol donc spécifique à chaque site mais les paramètres d'injection de fluide influent aussi sur l'importance de cette sismicité. Il est donc important de bien calibrer ces paramètres et de les faire évoluer en fonction de la microsismicité observée ;
- la différenciation entre séisme naturel et séisme anthropique ne peut pas être réalisée à partir d'observations directes. Il est nécessaire d'associer différents critères pour faire cette distinction et c'est le jugement d'experts qui prévaut ;
- il existe des mesures de prévention et de mitigation de la sismicité. En particulier, une bonne connaissance préalable du sous-sol au niveau du site est essentielle. De plus, la surveillance sismique permet de suivre l'activité sismique pour modifier les paramètres opérationnels en conséquence ;
- la sismicité anthropique est régulée en France par des arrêtés préfectoraux associés à chaque site puisque cette sismicité dépend du contexte géologique régional. Quand il y a lieu, ces arrêtés imposent de la surveillance sismique ainsi qu'une valeur limite des pressions d'injection ;
- les cas d'études montrent que les accidents de sismicité anthropiques se sont produits en général lors de la phase de stimulation et à des pressions d'injection supérieures aux valeurs limites imposées par la réglementation française. Cela ne signifie pas qu'aucune microsismicité n'a lieu durant d'autres phases mais son niveau est généralement plus faible. L'évènement sismique de Strasbourg du 12 novembre 2019, potentiellement induit, fera l'objet d'une note qui sera ajoutée au rapport.

Le risque de sismicité induite est donc bien présent pour les exploitations de géothermie profonde mais il est limité à certains contextes particuliers et, temporellement, il se produit plutôt pendant une phase courte. Si les mesures de mitigations existantes sont bien appliquées, le risque est limité.

12. Pour aller plus loin

- Pour avoir des explications simples et différentes manières de comprendre un séisme : Le séisme sous toutes ses coutures (Auclair and Appéré, 2019).
- Pour une compréhension plus détaillée des séismes et de la sismologie (en anglais) : Introduction to seismology (Shearer, 2011).
- Pour une analyse détaillée des séismes anthropiques, ses sources, son aléa et sa prévention : Etat des connaissances concernant les aléas et les risques liés à la sismicité anthropique (Contrucci and Klein, 2017).
- Pour une meilleure compréhension de la géothermie : <https://www.geothermies.fr/>.
- Pour un étude des risques et impacts liés à la géothermie : Etat des connaissances sur les risques, impacts et nuisances potentiels liés à la géothermie profonde (Gombert *et al.*, 2017).

13. Bibliographie

- Ader, T., Chendorain, M., Free, M., Saarno, T., Heikkinen, P., Malin, P.E., Leary, P., Kwiatek, G., Dresen, G., Bluemle, F., Vuorinen, T., 2019. Design and implementation of a traffic light system for deep geothermal well stimulation in Finland. *J Seismol.* <https://doi.org/10.1007/s10950-019-09853-y>
- AFPG, 2019. La géothermie en France. Etude de filière 2019.
- Auclair, S., Appéré, É., 2019. Le séisme sous toutes ses coutures: les dessous d'une terre en mouvement.
- Baisch, S., Carbon, D., Dannwolf, U., Delacou, B., Devaux, M., Dunand, F., Jung, R., Koller, M., Martin, C., Sartori, M., 2009. Deep heat mining basel: seismic risk analysis. SERIANEX Group, Departement für Wirtschaft, Soziales und Umwelt des Kantons Basel-Stadt, Basel.
- Baria, R., Michelet, S., Baumgärtner, J., Dyer, B., Gerard, A., Nicholls, J., Hettkamp, T., Teza, D., Soma, N., Asanuma, H., 2004. Microseismic monitoring of the world's largest potential HDR reservoir. Presented at the Proceedings, Twenty-Ninth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering.
- Baujard, C., Genter, A., Cuenot, N., Mouchot, J., Maurer, V., Hehn, R., Ravier, G., Seibel, O., Vidal, J., 2018. Experience learn from a successful soft stimulation and operational feedback after 2 years of geothermal power and heat production in Rittershoffen and Soultz-sous-Forêt plants (Alsace, France). Geothermal Resource Council Reno.
- Bönnemann, C., Schmidt, B., Ritter, J., Gestermann, N., Plenefisch, T., Wegler, U., 2010. Das seismische Ereignis bei Landau vom 15 August 2009 (the seismic event near Landau of 15th August 2010). Final report.
- Contes, C., 2011. Monitoring du champ géothermique de Bouillante (Guadeloupe) par analyse de la microsismicité, apport de l'étude des codas sismiques et modélisation 3D (rapport de stage). BRGM, Orléans.
- Contrucci, I., Klein, E., 2017. Etat des connaissances concernant les aleas et les risques liés à la sismicité anthropique (No. DRS-17-149681-07390D). Ineris.
- Cornet, F.H., 2019. The engineering of safe hydraulic stimulations for EGS development in hot crystalline rock masses. *Geomechanics for Energy and the Environment* 100151. <https://doi.org/10.1016/j.gete.2019.100151>
- Cornet, F.H., 2015. *Elements of crustal geomechanics*. Cambridge University Press.
- Cuenot, N., 2012. Impacts environnementaux et géothermie profonde sur le site de Soultz-sous-Forêts.
- Cuenot, N., Dorbath, C., Dorbath, L., 2008. Analysis of the microseismicity induced by fluid injections at the EGS site of Soultz-sous-Forêts (Alsace, France): implications for the characterization of the geothermal reservoir properties. *Pure and Applied Geophysics* 165, 797–828.
- Cuenot, N., Genter, A., 2015. Microseismic activity induced during recent circulation tests at the Soultz-sous-Forêts EGS power plant, in: *Proceedings World Geothermal Congress,(2015)*, Melbourne, Australia. pp. 19–25.
- Davis, S.D., Frohlich, C., 1993. Did (or will) fluid injection cause earthquakes?- criteria for a rational assessment. *Seismological Research Letters* 64, 207–224.

- Davis, S.D., Nyffenegger, P.A., Frohlich, C., 1995. The 9 April 1993 earthquake in south-central Texas: Was it induced by fluid withdrawal? *Bulletin of the Seismological Society of America* 85, 1888–1895.
- Deichmann, N., Giardini, D., 2009. Earthquakes Induced by the Stimulation of an Enhanced Geothermal System below Basel (Switzerland). *Seismological Research Letters* 80, 784–798. <https://doi.org/10.1785/gssrl.80.5.784>
- Diehl, T., Kraft, T., Kissling, E., Wiemer, S., 2017. The induced earthquake sequence related to the St. Gallen deep geothermal project (Switzerland): Fault reactivation and fluid interactions imaged by microseismicity: Induced Seismicity St. Gallen. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 122, 7272–7290. <https://doi.org/10.1002/2017JB014473>
- Dieterich, J., 1994. A constitutive law for rate of earthquake production and its application to earthquake clustering. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 99, 2601–2618.
- Dorbath, L., Cuenot, N., Genter, A., Frogneux, M., 2009. Seismic response of the fractured and faulted granite of Soultz-sous-Forêts (France) to 5 km deep massive water injections. *Geophysical Journal International* 177, 653–675. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04030.x>
- Douglas, J., Aochi, H., 2014. Using Estimated Risk to Develop Stimulation Strategies for Enhanced Geothermal Systems. *Pure Appl. Geophys.* 171, 1847–1858. <https://doi.org/10.1007/s00024-013-0765-8>
- Ellsworth, W.L., 2013. Injection-Induced Earthquakes. *Science* 341, 1225942–1225942. <https://doi.org/10.1126/science.1225942>
- Evans, K.F., Zappone, A., Kraft, T., Deichmann, N., Moia, F., 2012. A survey of the induced seismic responses to fluid injection in geothermal and CO₂ reservoirs in Europe. *Geothermics* 41, 30–54. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2011.08.002>
- Foulger, G.R., Wilson, M.P., Gluyas, J.G., Julian, B.R., Davies, R.J., 2018. Global review of human-induced earthquakes. *Earth-Science Reviews* 178, 438–514. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.07.008>
- Frohlich, C., DeShon, H., Stump, B., Hayward, C., Hornbach, M., Walter, J.I., 2016. A historical review of induced earthquakes in Texas. *Seismological Research Letters* 87, 1022–1038.
- Genter, A., Evans, K., Cuenot, N., Fritsch, D., Sanjuan, B., 2010. Contribution of the exploration of deep crystalline fractured reservoir of Soultz to the knowledge of enhanced geothermal systems (EGS). *Comptes Rendus Geoscience* 342, 502–516. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2010.01.006>
- Giardini, D., 2009. Geothermal quake risks must be faced. *Nature* 462, 848–849. <https://doi.org/10.1038/462848a>
- Gombert, P., Lahaie, F., Cherkaoui, A., 2017. Etat des lieux des risques, impacts et nuisances liés à la géothermie profonde (No. DRS-16-157477-00515A). Ineris.
- Grünthal, G., 2014. Induced seismicity related to geothermal projects versus natural tectonic earthquakes and other types of induced seismic events in Central Europe. *Geothermics* 52, 22–35. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2013.09.009>
- Grünthal, G., 1998. European macroseismic scale 1998. European Seismological Commission (ESC).
- Häring, M.O., Schanz, U., Ladner, F., Dyer, B.C., 2008. Characterisation of the Basel 1 enhanced geothermal system. *Geothermics* 37, 469–495. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2008.06.002>

- Hirschberg, S., TA-SWISS (Eds.), 2015. Energy from the earth: deep geothermal as a resource for the future?, TA-Swiss. vdf Hochschulverl, Zürich.
- Hofmann, H., Zimmermann, G., Farkas, M., Huenges, E., Zang, A., Leonhardt, M., Kwiatek, G., Martinez-Garzon, P., Bohnhoff, M., Min, K.-B., Fokker, P., Westaway, R., Bethmann, F., Meier, P., Yoon, K.S., Choi, J.W., Lee, T.J., Kim, K.Y., 2019. First field application of cyclic soft stimulation at the Pohang Enhanced Geothermal System site in Korea. *Geophysical Journal International* 217, 926–949. <https://doi.org/10.1093/gji/ggz058>
- Induced seismicity potential in energy technologies, Committee on Induced Seismicity Potential in Energy Technologies. ed, 2013. , US National Research Council. Washington, DC.
- Jousset, P., Delatre, M., François, B., Roger, J., Depuiset, F., Loiseau, J., Buvat, S., Vasseur, J., Miezkhaliski, R., Contes, C., 2011. Structure et dynamique du champ géothermique de Bouillante: apport de la sismicité 2006-2010 (No. BRGM/RP-60598-FR). BRGM.
- Keranen, K.M., Savage, H.M., Abers, G.A., Cochran, E.S., 2013. Potentially induced earthquakes in Oklahoma, USA: Links between wastewater injection and the 2011 Mw 5.7 earthquake sequence. *Geology* 41, 699–702. <https://doi.org/10.1130/G34045.1>
- Kim, K.-I., Min, K.-B., Kim, K.-Y., Choi, J.W., Yoon, K.-S., Yoon, W.S., Yoon, B., Lee, T.J., Song, Y., 2018. Protocol for induced microseismicity in the first enhanced geothermal systems project in Pohang, Korea. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 91, 1182–1191. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.062>
- Koelbel, T., Genter, A., 2017. Enhanced Geothermal Systems: The Soultz-sous-Forêts Project, in: Uyar, T.S. (Ed.), *Towards 100% Renewable Energy*. Springer International Publishing, Cham, pp. 243–248. https://doi.org/10.1007/978-3-319-45659-1_25
- Korean Government Commission, 2019. 포항지진과 지열발전의 연관성에 관한 정보조사연구단 요약보고서 Summary report of the Korean Government Commission on relations between the 2017 Pohang Earthquake and EGS Project , Geological Society of Korea. 대한지질학회.
- Landtwing, D., Mignan, A., Wiemer, S., 2013. GEISER - Guidelines for best practice (to help regulators in devising seismic hazard assessment specifications for the selection, licensing and long term operation of EGS sites in different geological setting).
- Lee, T.J., Song, Y., Yoon, W.S., Kim, K., Jeon, J., Min, K., Cho, Y., 2011. The first enhanced geothermal system project in Korea. Presented at the Proceedings of the 9th Asian Geothermal Symposium, p. 9.
- Majer, E., Nelson, J., Robertson-Tait, A., Savy, J., Wong, I., 2012. Protocol for addressing induced seismicity associated with enhanced geothermal systems. US Department of Energy 52.
- Majer, E.L., Baria, R., Stark, M., Oates, S., Bommer, J., Smith, B., Asanuma, H., 2007. Induced seismicity associated with Enhanced Geothermal Systems. *Geothermics* 36, 185–222. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2007.03.003>
- Maurer, V., Cuenot, N., Gaucher, E., Grunberg, M., Vergne, J., Wodling, H., Lehujeur, M., Schmittbuhl, J., 2015. Seismic monitoring of the Rittershoffen EGS project (Alsace, France). Presented at the Proceedings World Geothermal Congress, pp. 19–25.
- Maurer, V., Cuenot, N., Richard, A., Hehn, R., Peterschmitt, A., Ravier, G., 2020. Geophysical Monitoring of EGS Fields in the Upper Rhine Grabben, in: Proceedings of the WGC. Presented at the World Geothermal Congress, Reykjavik, Iceland.

- Maurer, Vincent, Gaucher, E., Grunberg, M., Koepke, R., Pestourie, R., Cuenot, N., 2020. Seismicity induced during the development of the Rittershoffen geothermal field, France. *Geotherm Energy* 8, 5. <https://doi.org/10.1186/s40517-020-0155-2>
- McGarr, A., 2014. Maximum magnitude earthquakes induced by fluid injection: Limits on fluid injection earthquakes. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 119, 1008–1019. <https://doi.org/10.1002/2013JB010597>
- McGarr, A., Simpson, D., Seeber, L., 2002. Case histories of induced and triggered seismicity. *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*, W. W. Lee et al. (eds), Acad. Press, San Diego, Calif, 81A 647–661.
- Michelet, S., Toksöz, M.N., 2007. Fracture mapping in the Soultz-sous-Forêts geothermal field using microearthquake locations. *J. Geophys. Res.* 112, B07315. <https://doi.org/10.1029/2006JB004442>
- Mignan, A., 2013. GEISER - Hazard models for specific test areas.
- Mignan, A., Broccardo, M., Wiemer, S., Giardini, D., 2017. Induced seismicity closed-form traffic light system for actuarial decision-making during deep fluid injections. *Sci Rep* 7, 13607. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-13585-9>
- Moeck, I., Bloch, T., Graf, R., Heuberger, S., Kuhn, P., Naef, H., Sonderegger, M., Uhlig, S., Wolfgramm, M., 2015. The St. Gallen project: development of fault controlled geothermal systems in urban areas. Presented at the Proceedings World Geothermal Congress, pp. 1–5.
- Obermann, A., Kraft, T., Larose, E., Wiemer, S., 2015. Potential of ambient seismic noise techniques to monitor the St. Gallen geothermal site (Switzerland): MONITORING THE ST. GALLEN GEOTHERMAL SITE. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 120, 4301–4316. <https://doi.org/10.1002/2014JB011817>
- Olbert, K., 2017. Automatic processing of induced seismicity at the geothermal reservoirs Landau and Insheim. Kiel.
- Park, S., Xie, L., Kim, K.-I., Kwon, S., Min, K.-B., Choi, J., Yoon, W.-S., Song, Y., 2017. First Hydraulic Stimulation in Fractured Geothermal Reservoir in Pohang PX-2 Well. *Procedia Engineering* 191, 829–837. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.250>
- Pearson, C., 1982. Parameters and a magnitude moment relationship from small earthquakes observed during hydraulic fracturing experiments in crystalline rocks. *Geophys. Res. Lett.* 9, 404–407. <https://doi.org/10.1029/GL009i004p00404>
- Ragnarsson, Á., Óladóttir, A.A., Hauksdóttir, S., Maury, J., Maurel, C., Manzella, A., Ámannsson, H., Drouin, V., Haraldsdóttir, S.H., Guðjónsdóttir, S.R., Guðgeirsdóttir, G., Bianchi, F., Bonini, B., Botteghi, S., Bustaffa, E., Cori, L., Del Ventisette, C., Giamberini, M.S., Gorini, F., Lelli, M., Montanari, D., Minichilli, F., Montegrossi, G., Scrocca, D., Chiarabba, C., Lattanzi, P., Pandeli, E., Manfrida, G., Fiaschi, D., Parisi, M.L., Tosti, L., Harcouet-Menou, V., Bos, S., Luchini, M., Lenzi, A., Montomoli, S., Paci, M., Taccone, R., Batini, F., Bosia, C., Cuenot, N., Maurer, V., Ravier, G., Dumas, P., Gök, O., Aksoy, N., Nador, A., 2020. Report on environmental concerns Overall state of the art on deep geothermal environmental data - GEOENVI projet (GEOENVI).
- Schill, E., Genter, A., Cuenot, N., Kohl, T., 2017. Hydraulic performance history at the Soultz EGS reservoirs from stimulation and long-term circulation tests. *Geothermics* 70, 110–124. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2017.06.003>
- Shearer, P.M., 2011. *Introduction to seismology*, 2. ed., repr. with corr. ed. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Valkering, P., Delvaux, S., Harcouet-Menou, V., Bos, S., Branchu, F., Ravier, G., Cuenot, N., Manzella, A., Botteghi, S., Donato, A., Giamberini, S., Bozkurt, C., Nador, A., Guðjónsdóttir, S.R.,

Guðmundsdóttir, M., Ketilsson, J., Garabetian, T., Dumas, P., 2020. Decision-making process mapping - GEOENVI projet (GEOENVI).

Verdon, J.P., Baptie, B.J., Bommer, J.J., 2019. An Improved Framework for Discriminating Seismicity Induced by Industrial Activities from Natural Earthquakes. *Seismological Research Letters*. <https://doi.org/10.1785/0220190030>

Vidal, J., Genter, A., Schmittbuhl, J., 2016. Pre- and post-stimulation characterization of geothermal well GRT-1, Rittershoffen, France: insights from acoustic image logs of hard fractured rock. *Geophysical Journal International* 206, 845–860. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw181>

Wells, D.L., Coppersmith, K.J., 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the seismological Society of America* 84, 974–1002.

14. Annexe

Notice de contexte

Le projet Gnostic a pour objectif de produire un rapport scientifique sur les événements de sismicité induite liés à la géothermie profonde et des éléments de communication de « seconde ligne » pour les personnes qui seraient amenées à répondre aux questions des populations/à être proactifs à ce sujet.

Cette notice vise à replacer ces éléments de communication dans un contexte plus global.

14.1. LA COMMUNICATION : UN ÉLÉMENT (PARMI D'AUTRES) DE LA POLITIQUE DE RELATIONS AVEC LES PARTIES PRENANTES

14.1.1. L'intégration territoriale d'un projet ne se limite pas à un processus de communication descendant de l'opérateur

Depuis plusieurs décennies, nous voulons sortir des dynamiques de « forçage », où l'aménageur tente d'imposer une décision déjà prise aux territoires et à ses habitants. Cela implique un modèle de décision plus collégial, des négociations et donc un dialogue. D'un modèle DAD (« Décider » d'un projet, l' « Annoncer », le « Défendre »), pour des raisons démocratiques et de pertinence des projets, nous tendons vers des situations où l'on « Propose », « Ecoute », « Requalifie » (PER)²⁶. Les relations aux parties prenantes sont donc bien plus qu'une campagne de communication des opérateurs au moment des enquêtes publiques.

On peut considérer avec Wüstenhagen²⁷ qu'au niveau des publics locaux, l' « acceptabilité » des projets²⁸ repose sur trois piliers :

- la justice procédurale (est-ce que le processus décisionnel a permis une juste participation de toutes les parties prenantes ?) ;
- la justice distributionnelle (La répartition des coûts et des bénéfices du projet, y compris en matière de risque, est-elle juste ?) ;
- la confiance (envers l'opérateur et les acteurs institutionnels).

²⁶ D'après Mermet Laurent *et al.* (2004). On pourrait également parler du modèle CAC, où le besoin est identifié par les territoires, qui Concertent, Analysent les propositions recueillies puis Choisissent le projet qui leur convient le mieux. Étant donné le besoin de démocratie et le caractère local des énergies renouvelables, on peut penser que ce modèle sera de plus en plus de mise.

²⁷ Wüstenhagen, R *et al.* (2007)

²⁸ Cela concerne les projets innovants d'énergie renouvelable dans leur globalité, mais ne signifie pas pour autant que la technologie considérée soit neutre : elle a ses propriétés intrinsèques (rôle dans la transition énergétique, maturité, répartition des coût/bénéfices...) qui seront réévaluées par les populations pour leur donner une nouvelle réalité.



Illustration 1 : Le triangle de l'acceptabilité sociale d'après Wüstenhagen, R et al. (2007)

La confiance est régie par un principe asymétrique : elle se construit lentement mais peut être détruite très rapidement.

La place que prendront les risques dans les échanges avec les parties prenantes, au-delà de leur matérialité dépendra donc de tous ces facteurs. Par exemple, si une partie de la population estime que l'opérateur n'est pas digne de confiance, elle percevra les risques comme plus élevés. C'est en considérant les contextes sociaux et culturels que l'on peut comprendre le poids alloué, par exemple, à différents risques, dans les discours des opposants (Chavot P. *et al.*, 2018).

La défiance vis-à-vis d'un opérateur et de l'État peuvent couvrir puis se révéler à la faveur d'un événement, rendant très difficile le regain d'une « License sociale à opérer ». Aux Pays Bas, en aout 2012, un séisme de 3.6 à Groningen, causé par l'exploitation de gaz naturel, fait suite à plusieurs épisodes de sismicité induite, qui n'avaient pas été reconnus comme tels. Cela réouvre le débat sur la répartition des bénéfices de ce projet. La crise de confiance entre les populations et l'opérateur et l'État (qui tire d'importants bénéfices, à différents niveaux, de cette exploitation gazière) réduira beaucoup l'impact des mesures compensatoires adoptées (Van der Voort, N. *and al.* (2015)).

14.1.2. La communication sur le risque sismique, un élément (parmi d'autres) de la politique de communication d'un projet de géothermie

a) Communiquer sur tout le reste

S'il est indispensable de communiquer (et « engager ») sur le [risque sismique](#), cela s'inscrit dans une communication beaucoup plus large, sur l'ensemble des aspects du projet.

Les aménageurs, après avoir évalué les besoins locaux et élaboré un projet qui leur paraisse y répondre, doivent le mettre en débat, et donc présenter, de façon proactive, leur projet, son

inscription dans la transition énergétique au niveau local, ses impacts, positifs et négatifs, pour le territoire d'accueil, au niveau économique, social et environnemental. La communication vient en complément d'un processus d'écoute et d'engagement (ou participation), qui impactent le projet. Ces processus se nourrissent mutuellement et s'organisent dans la durée.

Pour communiquer de façon pertinente, il est nécessaire de disposer de données « consistantes ». A cet égard, Stern PC. et al. (1996), dans leurs travaux sur le risque, cités par Trutnevte E. et al. (2018) font d'intéressantes préconisations qui peuvent être généralisées au-delà des analyses de risque. Ils conseillent de « getting the science right » (qu'on pourrait traduire par « recourir pertinemment à la science » : mener une analyse de risque dans les règles (scientifiques) de l'art pour informer les décisions) et de « getting the right science » (que l'on pourrait traduire par « recourir aux sciences pertinentes » : mener les analyses de risques qui préoccupent les parties prenantes : santé publique, impact économique, écologique et sociaux en donnant la priorité aux sujets les plus importants pour les décisions). Le recours, notamment aux sciences sociales et sciences de la communication, est vivement recommandé²⁹.

b) Communiquer et engager sur le risque sismique

La sismicité induite est souvent présentée comme première préoccupation des publics (Meller C. et al. 2017, Knoblauch, T. A. K et al. 2019). Les exploitations de géothermie profonde sont territorialisées et donc singulières³⁰. Dans le cas français, les travaux disponibles (Chavot P. et al., 2018) montraient bien l'importance de la sismicité induite dans les préoccupations exprimées par les populations en 2015, tout en soulignant l'importance des contextes sociaux-culturels à prendre en compte dans la construction des positionnements des parties prenantes.

À partir d'une enquête sur des scénarios théoriques comparatifs en Suisse et en Allemagne, Knoblauch, T. A. K et al. (2019) indiquent qu'une approche coût/bénéfice des parties prenantes (« je ne m'oppose pas au projet si j'estime qu'il m'apporte plus d'avantages que d'inconvénients »), qui fonctionne globalement pour les projets d'énergie renouvelable, ne fonctionne que partiellement avec la sismicité induite. Le recours aux arguments de « tampering with nature » ou « messing with nature » (« jouer aux apprentis sorcier avec la nature ») ou « bouleverser l'ordre naturel » s'appliquerait parce que l'on modifierait ce qui est perçu comme des équilibres géologiques structurels. Porteur d'une forte charge morale, cela, pourrait nuancer le bilan coût/avantage auprès de certains publics³¹.

²⁹ Les « bonnes pratiques pour traiter de la sismicité induite associée aux systèmes géothermiques améliorés », sont une référence sur le [risque sismique](#) en géothermie pour les professionnels du secteur (Majer E. et al. (2014). Ce document a pour objectif d'actualiser deux protocoles réalisés à ce sujet (2009 et 2012) dans le cadre de l'Agence Internationale de l'Énergie et financés par le département étasunien de l'énergie. S'il témoigne d'un engagement parfois timide des parties prenantes, il prône en revanche la constitution et la diffusion d'informations riches sur l'ensemble du projet.

³⁰ Par exemple, en Italie, à Viterbo, qui a connu une histoire de contamination de l'eau par Arsenic, c'est principalement la potentielle pollution de l'eau qui a été débattue. À Termini Imerese, où le chômage est très élevé, les préoccupations étaient les retombées économiques (Pellizzone A et al. 2017).

³¹ Knoblauch, T. A. K et al. (2019) « The results thus indicate that when risk perceptions are especially high, such as among German women, the compensatory weighing of risks and benefits does not fully apply. »

Communiquer sur le risque implique la prise en compte de la « construction sociale du risque »³², des valeurs, des appartenances des publics, de la façon dont elles s'organisent collectivement³³ et de la qualité de la relation construite avec les aménageurs (justice procédurale, distributionnelle, confiance). Alors que certains points soulevés par les populations paraissent parfois irrationnels ou emprunts d'égoïsme (NIMBYsme ou BANANAïsme³⁴) aux opérateurs, replacer leur constitution dans l'épaisseur du tissu social permet de les comprendre³⁵. La communication doit donc être vue comme un processus itératif qui se construit dans l'interaction.

La sismicité induite est source de controverses et doit être gérée en partenariat avec la société (Trutnevyte E. *et al.* 2018). Il faut donc disposer de supports de communication adéquats pour engager le dialogue à ce sujet et sensibiliser (pas nécessairement rassurer). Les documents fournis ci-dessus veulent contribuer à cet objectif en offrant des éléments factuels et scientifiques pour alimenter et informer les échanges. Ils s'adressent aux interlocuteurs des publics d'un projet (collectivités, DREAL, opérateurs... « deuxième ligne ») qui sauront les intégrer dans les contextes propres des projets.

14.2. LE CONTEXTE DE CE TRAVAIL (TRAVAIL SITUÉ)

À l'heure actuelle³⁶, le risque de sismicité induite lié à la géothermie profonde ne concerne, en France, que l'Alsace : des [réservoirs](#) fracturés naturellement permettent de développer des installations de géothermie à partir de fluides de 130 à 200 °C pour produire chaleur et/ou électricité. Il existe deux sites en fonctionnement et deux en développement³⁷. Il y a d'autres projets, sur des territoires également propices, comme le Massif central, les Pyrénées ou le couloir rhodanien³⁸. C'est parce qu'il y a des [réservoirs](#) naturellement fracturés qu'il y a du potentiel pour la géothermie profonde haute température (et donc un risque de sismicité induite si un site est développé), mais aussi un risque de sismicité naturelle, même s'il peut être modéré.

Ce risque de sismicité induite n'existe, par exemple, pas pour le Bassin parisien qui connaît la plus grande concentration de chauffage urbain d'origine géothermique d'Europe, et ce pour deux raisons. La première est due à la structure géologique de la zone : ce bassin sédimentaire n'est pas sujet à séisme d'après les observations historiques. La seconde s'explique par le type d'exploitation géothermique. Elles visent des températures allant de 25 ([aquifère](#) de l'Albien) à 90 °C ([aquifère](#) du Dogger), à une profondeur allant d'environ 600 (Albien) à 1 500 m (Dogger), pour un usage majoritairement direct de la chaleur ou via l'utilisation de pompe à chaleur dans l'Albien, principalement pour alimenter les réseaux d'eau chaude sanitaire et de chauffage. Les

³² « Si les gens sont indignés parce qu'ils surestiment l'aléa, la solution est de leur expliquer mieux. Mais s'ils surestiment l'aléa parce qu'ils sont indignés, la solution est de trouver la raison de leur indignation et de la changer » Sandman, P.M., 1993

³³ En ayant recours par exemple aux concepts de « Territoires d'appartenance » Devine-Wright, P., 2009 ou de « Mondes sociaux » Garrety, k., 1997.

³⁴ NIMBY "Not In My Back Yard", "Pas dans mon arrière cours", BANANA : "Build Absolutely Nothing Anywhere Near Anything" « Ne construire absolument rien, nulle part, à côté de rien »

³⁵ Vouloir dissocier les dimensions techniques (donc le risque) des dimensions sociales des projets semble à certains tellement inapproprié qu'au lieu de parler de risque, Bruno Latour préconise d'employer la notion d' « objet chevelu » pour montrer l'imprévisibilité et la complexité de réalisation irréductiblement sociotechnique.

³⁶ Début 2020

³⁷ Les sites existants sont ceux de Soultz-Sous-Forêts et de Rittershoffen, ceux en cours de réalisation sont à Vendenheim et à d'Illkirch.

³⁸ La carte des titres miniers au 1^{er} janvier 2019 est consultable http://www.minergies.fr/sites/default/files/upload/carte_des_titres_ght_juillet_2019_v2.pdf

formations géologiques exploitées pour la production de chaleur ont de bonnes caractéristiques hydrogéologiques (transmissivité et porosité). Des acidifications sont généralement employées pour nettoyer les ouvrages après les travaux de forage et restaurer la connectivité entre les ouvrages et le [réservoir](#) (environnement proche puits). Ces opérations sont ponctuelles et mises en place suite aux travaux de forages ou lors de la conversion d'anciens puits.

Si un événement sismique se produit, la question, pour des territoires tels que l'Alsace, peut alors être de faire la part entre ce qui relève de la sismicité naturelle et de la sismicité induite.

C'est la problématique qui s'est posée à Strasbourg, le 12 novembre 2019, quand un séisme de M. 3.1 a été ressenti et suivi d'une seconde secousse de M2,6 le 13 novembre 2019. Il a été, dans un premier temps, identifié comme [séisme induit](#) par le ReNaSS³⁹, avant que la question ne soit réouverte.

Les investigations pour déterminer la source du séisme sont toujours en cours. Quelle que soit l'issue, cela impacte de toute façon l'« opinion », la filière⁴⁰ et la réglementation.

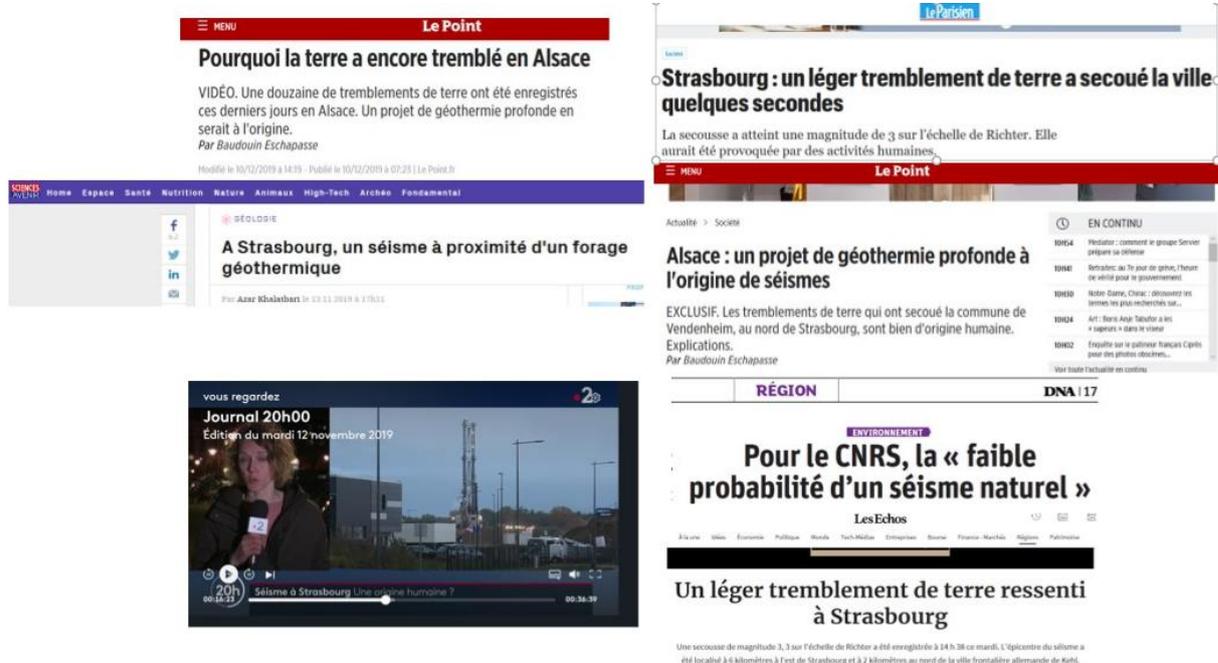


Illustration 2 : Sélection sorties presse suite à l'événement sismique du 12 novembre 2019 à Strasbourg.

Si un séisme est ressenti et attribué aux activités d'une installation géothermique, c'est le maître d'ouvrage⁴¹ qui doit indemniser les dommages. Il souscrit pour cela une assurance.

La question de la distinction entre sismicité induite et sismicité naturelle, si elle se pose, sera probablement tranchée par des dires d'experts, ce qui rend déterminant leur positionnement⁴².

³⁹ Réseau National de Surveillance Sismique

⁴⁰ Également impactant pour la filière, la disparition dans le projet de Programmation Pluriannuelle de l'énergie du 20 janvier 2019, du tarif de rachat de l'électricité produite à partir de la géothermie en métropole.

⁴¹ Responsabilité civile du maître d'ouvrage, responsabilité civile forage et exploitation, responsabilité civile pollution

⁴² La qualité d'expert repose sur trois critères : son statut de sachant, sa neutralité, son mandat.

Il convient de mentionner un événement qui a particulièrement touché cette communauté d'expert en sismicité. À la suite du tremblement de terre, naturel, d'Aquila le 6 avril 2009 ($M_I=5,9$, $M_w=6,1$, 309 morts, 1 500 blessés, 65 000 personnes évacuées, 22 000 personnes à reloger), lors du procès en première instance, six scientifiques et un responsable de la Protection civile italienne ont été condamnés à six ans de prison ferme pour homicide involontaire, pour n'avoir pas donné clairement l'alerte. Ce jugement a été annulé par la suite, mais il a fait réagir l'ensemble de la profession qui a rappelé l'impossibilité de prévoir les séismes et dénoncé les travers qu'impliquerait une telle orientation judiciaire : être toujours précautionneux et alarmiste.

Le contexte de la rédaction de ces éléments est donc post-crise (séisme de Strasbourg novembre 2019), à un moment où la question de la différenciation entre sismicité naturelle et induite est posée par la population et les pouvoirs publics qui se tournent vers les experts, dans une attente légitime de réponse.

14.3. BIBLIOGRAPHIE

- Chavot P., Heimlich C., Masseran A., Serrano Y., Zoungrana J., *et al.* (2018). Social shaping of deep geothermal projects in Alsace: politics, stakeholder attitudes and local democracy. *Geothermal Energy*, 2018, 6 (26)
- Devine-Wright, P. (2009). Rethinking NIMBYism: the role of place attachment and place identity in explaining place-protective action. *J. Community Appl. Soc. Psychol.* 19 (6), 426–441.
- Garrety K. (1997). Social worlds, actor-networks and controversy: the case of cholesterol, dietary fat and heart disease. *Soc Stud Sci.* 1997;25:727–73.
- Knoblauch, T. A. K., Trutnevyte, E., & Stauffacher, M. (2019). Siting deep geothermal energy: Acceptance of various risk and benefit scenarios in a Swiss-German cross-national study. *Energy Policy*, 128, 807–816. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.01.019>
- Majer E., Nelson J., Savy J., Wong I., (2014). Best Practices for Addressing Induced Seismicity Associated with Enhanced Geothermal Systems (EGS), Lawrence Berkeley National Laboratory <https://escholarship.org/uc/item/3446g9cf>
- Meller, C., Schill E., Bremer j., Kolditz O., Bleicher A., Benighaus C., Chavot P., Gross M., Pellizzone A., Renn O., Schilling F., Kohl T., (2017). Acceptability of geothermal installations : A geoethical concept for GeoLaB. *Geothermics* (2017). DOI : [10.1016/j.geothermics.2017.07.008](https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2017.07.008)
- Mermet L., Dubien I., Emerit A., Laurans Y., (2004). Les porteurs de projets face à leurs opposants : six critères pour évaluer la concertation en aménagement. In : *Politiques et management public*, vol.22 n°1, 2004. Pp.1-22. [Doi : 10.3406/pomap.2004.2829](https://doi.org/10.3406/pomap.2004.2829)
- Pellizzone A., Allansdottir A., De Franco R., Muttoni G., Manzella A., (2017). Geothermal energy and the public: a case study on deliberative citizens' engagement in central Italy. *Energy Policy*. 2017;101:561–70
- Sandman, P.M., (1993). Responding to Community Outrage: Strategies for Effective Risk Communication. American Industrial Hygiene Association, Fairfax, VA. <https://psandman.com/media/RespondingtoCommunityOutrage.pdf>
- Stern P.C., Fineberg H.V. (eds), (1996). *Understanding Risk: Informing Decisions in a Democratic Society*. The National Academies Press: Washington DC, 1996
- Trutnevyte E., Ejderyan O., (2018). Managing geoenergy-induced seismicity with society, *Journal of Risk Resaerch*, novemner 2018 DOI: 10.1080/13669877.2017.1304979
- Van der Voort, N. and Vanclay, F., (2015). Social impacts of earthquakes caused by gas extraction in the Province of Groningen, The Netherlands. *Environmental Impact Assessment Review*, 50: 1-15.
- Wüstenhagen, R., Wolsink, M., Bürer, M.J., (2007). Social acceptance of renewable energy innovation: an introduction to the concept. *Energy Policy* 35, 2683–2691. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.12.001>



Centre scientifique et technique
Direction des géoressources
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr