



Centre de compétence suisse
en géothermie profonde
pour la production
d'électricité et de chaleur

une entreprise de



Synthèse des études relatives à la sismicité induite

Projet pilote de géothermie profonde Haute-Sorne

25 avril 2014

Adresse de la société

Geo-Energie Suisse SA, Reitergasse 11, 8004 Zurich
Centre de compétences suisse pour la géothermie profonde
www.geo-energie.ch



Dr. Peter Meier, CEO

T +41 61 500 07 21

M +41 79 248 48 65

p.meier@geo-energie.ch

Olivier Zingg, Chef de projet Suisse romande

T +41 61 500 07 22





M +41 79 321 43 20





o.zingg@geo-energie.ch

Préambule

Le présent rapport relatif à la sismicité induite est une synthèse des résultats des rapports d'expertise et des études de risque (rapports scientifiques) réalisés pour le compte de la société Geo-Energie Suisse SA. Il est déterminant pour l'évaluation de la sismicité induite en rapport avec la construction et l'exploitation des installations souterraines de la centrale géothermique dans le cadre de l'étude d'impact sur l'environnement.

Les rapports scientifiques sur lesquels cette synthèse s'appuie sont de nature technique et destinés à des experts. Ils ne sont pas partie intégrante de l'étude d'impact sur l'environnement mais sont mis à disposition des autorités cantonales et des experts qu'elles auront mandaté afin de leur fournir une base d'évaluation complète, détaillée et transparente des études réalisées. Tous les résultats significatifs de ces études sont repris dans la présente synthèse. Il est de plus à noter que les aspects liés à la géologie sont décrits dans le rapport technique accompagnant le RIE.

Rapport scientifique d'expert	Auteur
E1 Etude et modélisation géophysique et géologique	 Geo Explorers, Liestal Auteurs: Dr. Senecio Schefer et Dr. Andreas Ebert Géologues Experts en exploration et en géologie structurale
E2 Etude gravimétrique	 Université de Neuchâtel, Centre d'Hydrogéologie et de Géothermie Auteur: Dr. Yassine Abdelfettah Senior research fellow, géophysicien Expert en investigations géophysiques et gravimétriques
E3 Analyse de la sismicité naturelle	 Schweizerischer Erdbebendienst Service Sismologique Suisse Servizio Sismico Svizzero Servizi da Terratrembels Svizzer Service sismologique suisse, ETH Zürich Auteurs: Dr. Nicholas Deichmann, Dr. Toni Kraft, Dr. Tobias Diehl, Prof. Stefan Wiemer Sismologues Experts en sismologie et en sismicité induite
E4 Etude de risque déterministe	 Geothermal reservoir engineering Q-con GmbH, Bad Bergzabern, Deutschland Auteurs: Dr. Stefan Baisch, Dr. Robert Vorös, Pia Pulm Géophysiciens Experts en analyse de risque sismique, direction de projet de l'étude de risque postérieure au projet de Bâle, SERIANEX

<p>E5 Etude de l'aléa sismique probabiliste</p>	 <p>Schweizer Kompetenzzentrum für Tiefengeothermie zur Strom- und Wärmeproduktion ein Unternehmen von</p>  <p>Geo-Energie Suisse SA, Zürich Auteurs: Dr. Andres Alcolea, Dr. Falko Bethmann Ingénieur civil, sismologue Experts en modélisations hydrogéologiques et sismicité induite</p>
<p>E6 Modélisation et concept d'exploitation du réseau de surveillance sismique</p>	 <p>Geo Explorers, Liestal Auteur: Oliver Genoni Géophysicien Expert en monitoring sismique</p>
<p>E7 Etablissement des preuves</p>	 <p>Steiger Baucontrol Auteur : Andreas Steiger Ingénieur civil Expert pour l'établissement des preuves, les protocoles de fissures et les mesures de vibrations</p>

Remarque préliminaire concernant les valeurs de magnitude utilisées dans cette étude :

Toutes les magnitudes indiquées dans cette étude sont données en magnitudes de moment (Mw) (Chap. 1.5) ou ont été déterminées via des modélisations théoriques. Celles-ci doivent être étalonnées dans le cadre de la stimulation d'essai décrite au chap.6.2 et doivent être converties, pour permettre une communication uniformisée avec le Service sismologique suisse, en magnitudes locales publiées par le Service sismologique (p. ex. selon Goertz-Allmann, 2011). En d'autres termes, les indications de magnitude relatives à la limite de dommages matériels ou à des valeurs de seuil du système de feux de signalisation (Chap. 6.3) peuvent, à la suite de l'étalonnage, diverger des valeurs présentées dans cette étude.

Table des matières

Préambule	3
Résumé.....	6
1. Introduction.....	8
1.1. Problématique et objectifs.....	8
1.2. Séismes associés à des projets de géothermie EGS	8
1.3. Méthodes de contrôle de la sismicité induite.....	10
1.4. Normes d'ébranlement	14
1.5. Echelles de magnitude.....	14
1.6. Méthodes d'évaluation de la sismicité induite	15
2. Etat initial de la sismicité naturelle, périmètre d'étude élargi.....	16
3. Evaluation déterministe des risques	18
3.1. Périmètre d'étude restreint	18
3.2. Mouvements du sol et scénarios de risque.....	19
3.3. Sismicité induite pendant la phase de réalisation.....	23
3.4. Sismicité induite pendant la phase d'exploitation	26
3.5. Influence de zones de faille naturelles pendant la phase d'exploitation.....	27
3.6. Sismicité induite après la fin de la phase d'exploitation	29
4. Evaluation probabiliste des risques.....	30
4.1. Effet de traîne du système de feux de signalisation	30
4.2. Probabilité d'occurrence de séismes d'une grandeur déterminée.....	32
5. Evaluation de l'aléa et bilan:	38
6. Mesures de protection et de contrôle	40
6.1. Adaptation de l'étude de risque au cours du projet	40
6.2. Réalisation d'un test de stimulation.....	40
6.3. Système de feux de signalisation	42
6.4. Réseau de monitoring sismique	46
6.5. Mesures de remplacement à la suite de dommages	49
7. Excursus: Le projet de géothermie de Bâle.....	53
Bibliographie.....	55

Résumé

Pour l'étude de risque sismique, les valeurs limites de la norme allemande DIN, plus strictes que celles de la norme suisse, ont été considérées pour la détermination du niveau maximal de vibration au-dessous duquel aucun dommage aux bâtiments n'est à attendre. La magnitude correspondant à la limite des dommages matériels a été déterminée sur cette base à $M_w=2,6$. Il s'agira ainsi de garantir que cette limite ne sera pas dépassée.

Une analyse de la sismicité naturelle dans la région par le Service sismologique suisse a permis de conclure à l'absence de zones de failles actives dans le rayon d'influence du projet. Les zones de failles connues dans la région entourant le projet ne seront influencées que de manière insignifiante par la réalisation du réservoir souterrain ainsi que par le refroidissement thermique du sous-sol pendant la durée de l'exploitation. La probabilité de déclencher des séismes en dehors du réservoir souterrain est donc estimée comme étant très faible. Dans le cas où une zone de failles inconnue à l'heure actuelle, et qui se trouverait à proximité du réservoir souterrain, était malgré tout influencée par le projet, le système de surveillance sismique (plan de réaction, feux de signalisation) interrompra l'injection d'eau et empêchera ainsi la sismicité d'augmenter davantage.

L'apparition et l'intensité de la sismicité induite dépendent principalement de la réponse sismique du sous-sol qui est encore largement inconnue à l'heure actuelle. En cas de forte réponse sismique, le système de feux de signalisation permet d'empêcher que des secousses trop importantes ne surviennent. Toutefois, cela peut éventuellement avoir pour conséquence l'arrêt de la stimulation avant que le réservoir n'ait atteint une taille suffisante (dimension des fissures) pour assurer la rentabilité de l'exploitation. A l'opposé, en cas de réponse sismique faible, il est possible de réaliser des surfaces d'échange de chaleur (fissures) bien plus grandes que prévues à l'origine, sans causer de sismicité qui s'approcherait de la limite des dommages matériels. Néanmoins, on ne peut exclure dans les deux cas que ne survienne une sismicité qui puisse être ressentie par la population ou perçue sur le plan acoustique.

L'étude montre qu'il est avantageux, plutôt que de créer une grande surface d'échange de chaleur, de stimuler le sous-sol sous la forme de plusieurs fissures plus petites. Etant donné que, d'après les données d'observation provenant de projets du monde entier, la magnitude sismique maximale observée augmente proportionnellement avec la surface stimulée dans le sous-sol, une stimulation contrôlée permet également de contrôler la sismicité. Lorsque la surface stimulée est petite, la magnitude et ainsi les effets à la surface restent faibles. En outre, il s'avère que l'aléa sismique diminue lors de la stimulation de fissures successives. L'aléa sismique n'augmente ainsi pas simplement de manière proportionnelle au nombre de fissures stimulées.

L'étude de risque se base sur la méthodologie déterministe de la société Q-con, société qui avait mené l'analyse de risque du projet de Bâle qui a finalement mené à son abandon. Cette étude montre que le déclenchement d'un séisme dommageable peut être quasiment exclu moyennant des mesures appropriées. Toutefois, le projet ne présente pas un risque nul. Il est théoriquement envisageable de rencontrer dans le sous-sol une faille supercritique non identifiée à faible distance du réservoir. Dans ce cas, une faible modification des conditions du sous-sol pourrait causer des

dommages à la surface. Il en va de même pour d'autres travaux souterrains, tels que par exemple la construction de tunnels. De telles considérations sont regroupées sous la notion de risque résiduel. Pour cette raison, en plus de l'approche déterministe de la société Q-con, le risque résiduel est évalué au moyen d'une étude de risque probabiliste. L'analyse de risque probabiliste repose sur une méthodologie développée par le Service sismologique suisse.

Autant l'étude probabiliste que l'étude de risque déterministe montre qu'un système « multi-fractures » permet de réduire l'aléa sismique par rapport à une stimulation massive telle que celle effectuée à Bâle. Pour un aléa identique, ce procédé permet de stimuler une surface d'échange de chaleur au moins trois fois plus grande.

L'étude probabiliste et l'étude déterministe permettent de représenter l'ampleur de la sismicité attendue. Etant donné que dans les deux études, la sismicité observée se base surtout sur les données de Bâle, les deux études montrent également des résultats comparables dans la plage de magnitudes correspondante. Pour des magnitudes supérieures à $M_w=3,2$, on relève toutefois de grandes différences. A titre d'exemple, considérons un séisme de magnitude $M_w=4$. Dans l'étude de risque déterministe, la probabilité d'un tel séisme est nulle car un tel événement, pour une réponse sismique du sous-sol comparable à celle de Bâle, ne peut physiquement pas se produire pour des surfaces d'échange de chaleur de la dimension de celles envisagées avec le système « multi-fractures ». L'étude de risque probabiliste donne quant à elle une probabilité de dépassement de cette magnitude de 1:3000 pour une fissure simple de 300 m (ou env. de 1:100 pour un système multi-fractures de 30 fissures de 300 m), toutefois selon des hypothèses très conservatives.

Au final, c'est le projet lui-même qui fournira des informations fiables sur la réponse sismique du sous-sol. C'est pourquoi il est important de procéder pas à pas et avec précaution. Les mesures présentées ci-après reflètent une telle approche :

1. Adaptation de l'étude de risque au cours du projet: Au fur et à mesure de la collecte d'informations, les études de risque sismique seront vérifiées et les mesures de prévention seront, le cas échéant, adaptées.
2. Réalisation d'un test de stimulation: Test réalisé dans des conditions sévèrement contrôlées et avec un volume d'injection initial faible qui sera graduellement augmenté.
3. Système de surveillance (schéma de réaction) : un système de feux de signalisation de sécurité basé sur des valeurs d'arrêt beaucoup plus basses que celles de Bâle en combinaison avec un système de prédiction développé par le Service sismologique suisse.
4. Surveillance sismique (monitoring): Réseau de surveillance sismique de haute sensibilité pour l'enregistrement de la sismicité induite en temps réel.
5. Etablissement des preuves: Comme élément d'information proactive et de communication et afin de compenser les dommages rapidement et de manière transparente dans le cas peu probable, mais ne pouvant être totalement exclu malgré toutes les mesures de précaution, d'une réaction sismique plus forte qu'attendue du sous-sol.

1. Introduction

1.1. Problématique et objectifs

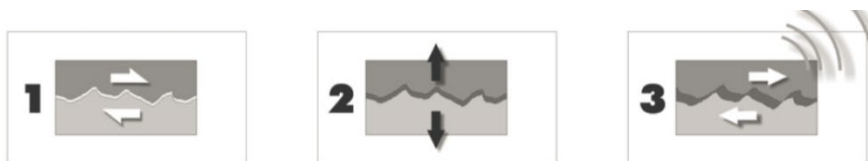
Pendant la phase de construction et d'exploitation de l'installation géothermique, des séismes induits (déclenchés artificiellement) surviennent. Il convient de déterminer dans quelle mesure la sismicité induite représente un danger pour les habitants, les bâtiments et les infrastructures et quelles sont les mesures qui peuvent permettre d'éviter des dommages.

L'objectif prioritaire consiste à exclure tout dommage sur les ouvrages, grâce à un concept adéquat et à la mise en œuvre de mesures. En second lieu, il convient de limiter à un minimum, et si possible d'éviter totalement, les effets des secousses sur les habitants.

1.2. Séismes associés à des projets de géothermie EGS

Dans le cas de la technique EGS (« enhanced geothermal system »), la perméabilité requise de la roche est créée artificiellement pour permettre la construction du réservoir souterrain. Par l'injection d'eau, des contraintes préexistantes dans le sous-sol sont relâchées, ce qui augmente la perméabilité de la roche (Illustr. 1). La relaxation des contraintes provoque de très faibles séismes. Ceux-ci fournissent des informations importantes sur la dimension et l'étendue du réservoir souterrain. Dans la phase de réalisation, les séismes induits sont un processus volontaire.

Les séismes se produisent en raison d'une relaxation des contraintes dans le sous-sol et sont un processus volontaire



Illustr. 1: Comment la perméabilité du sous-sol est-elle augmentée? (1) Il existe dans la roche des fissures naturelles sous tension, qui sont apparues à la suite de mouvements antérieurs du sous-sol. (2) Par l'injection d'eau, les tensions sont relâchées. (3) Il se produit alors un décalage permanent, les surfaces adjacentes ne correspondent plus les unes aux autres et la perméabilité de la roche s'en trouve augmentée. Le décalage provoque de petits séismes: c'est ce que l'on appelle la sismicité induite (Illustr. selon Baisch, 2010).

Pendant la phase d'exploitation (phase de circulation), une sismicité induite peut également être observée tant que la pression hydraulique n'atteint pas un régime quasi-stationnaire dans le réservoir (la connexion hydraulique entre le forage d'injection et le forage de production n'est pas encore optimale). Dans un système dans lequel la pression hydraulique dans le réservoir géothermique a atteint des conditions quasi-stationnaires, aucune sismicité induite sensible n'est attendue. C'est ce que l'on observe actuellement dans le réservoir géothermique de Soultz-sous-Forêts, où aucune sismicité importante n'est plus enregistrée dans la phase d'exploitation actuelle.

En outre, il se produit au cours de la phase d'exploitation un lent

refroidissement dans l'environnement du forage d'injection. La contraction thermique qui en résulte peut également conduire à l'apparition d'une sismicité. En raison du manque d'observations à long terme sur les installations EGS, on ne sait néanmoins pas avec certitude si l'on doit s'attendre à une sismicité non négligeable due à la contraction thermique. Dans le cadre de la présente étude, on considère les variations de contraintes résultant de la contraction thermique comme des mécanismes théoriquement envisageables, pouvant notamment conduire à l'apparition d'une sismicité en dehors du réservoir géothermique, dans des zones de failles naturelles.

A l'échelle mondiale, la sismicité induite qui a jusqu'à présent été observée en relation avec des systèmes EGS se situait dans la plage de magnitude $M_w < 3$, à deux exceptions près: le séisme $M_L = 3.7$ observé dans le cadre du projet de géothermie Cooper Basin, en Australie (Baisch et al., 2006) et le séisme $M_w = 3.2$ survenu dans le cadre du projet de géothermie de Bâle (voir également la comparaison avec le projet DHM de Bâle, chap. 7).

A l'échelle mondiale, on compte 2 projets EGS avec une magnitude >3

Bien que cela ne soit pas attribuable à la technologie EGS, il convient à ce propos également d'évoquer un séisme de magnitude $M_L = 3,5$, qui a été déclenché le 27.07.2013 par le projet de géothermie de St-Gall. Les causes précises de ce séisme font encore actuellement l'objet d'études. Les découvertes faites à ce jour indiquent que le forage géothermique de St-Gall a été réalisé dans une zone de faille sismiquement active. Le concept de la société Geo-Energie Suisse SA prévoit d'éviter les grandes zones de faille.

Pour un projet EGS, la plage de magnitude autour de $M_w = 3,5$ est déjà considérée comme exceptionnellement élevée. Par comparaison, l'énergie libérée et toutefois plus de 3 millions de fois inférieure à celle des séismes causant des dommages structurels aux bâtiments tels que ceux qui surviennent dans les zones sismiques au niveau des limites entre les plaques. Cette sismicité exceptionnellement élevée dans les réservoirs de Cooper Basin et de Bâle est d'une part attribuable à l'importante relaxation des contraintes observée à Bâle et à l'effet de traîne (voir l'illustr. 6) ou est d'autre part due aux importants volumes de liquide injectés à Cooper Basin.

L'énergie libérée est 3 millions de fois inférieure à celle des séismes causant des dommages structurels aux bâtiments

Grâce au projet bâlois Deep Heat Mining (DHM), de nombreuses expériences très précieuses ont déjà été rassemblées sur la réalisation artificielle d'un réservoir souterrain. Ces expériences et observations, conjointement avec les tout derniers résultats de la recherche, ont été intégrées dans un concept de sécurité global. Le principe des trois piliers (Chap. 4.3.3 du rapport d'impact), le choix du site (Chap. 3.1 du rapport d'impact) et les mesures de protection et de contrôle (Chap. 6) contribuent à réduire considérablement le risque de séisme, mais ne permettent néanmoins pas d'exclure totalement la possibilité de déclenchement d'un événement important. Le principe est le suivant: plus un séisme potentiel est important, plus son déclenchement est improbable.

Le projet bâlois fournit des connaissances importantes sur la réduction des risques

L'aléa que représentent les projets de géothermie a été examiné dans diverses études (Majer et al., 2011; Baria et al., 2006, National Academy of Sciences, 2012). Celles-ci ont permis de déterminer que les événements

A l'échelle mondiale, on ne relève aucun

sismiques liés à la géothermie n'ont causé, à l'échelle mondiale, ni dommages structurels sur des bâtiments, ni dommages aux infrastructures, et n'ont représenté aucun danger pour la vie humaine. Néanmoins, on a pu observer à St-Gall et à Bâle de légers dommages sur le crépi des bâtiments.

dommage sur des personnes ou structurel sur des bâtiments dû à un projet de géothermie

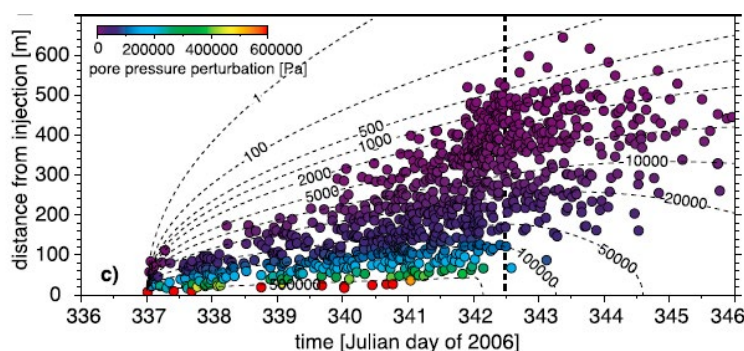
Les projets de géothermie peuvent en outre occasionner une gêne pour les habitants en raison des secousses ressenties ou des émissions sonores (semblables à des détonations) (Bâle, Landau, Insheim, St-Gall, Soultz-sous-Forêt). Ce sont ces manifestations qu'il convient de réduire au minimum par des mesures appropriées.

Les événements survenus dans la ville de Staufen n'ont aucun lien avec la géothermie profonde. Lors de forages pour l'installation de sondes géothermiques en 2007, de l'eau s'était infiltrée dans une couche géologique riche en anhydrite à env. 150 m de profondeur. En raison de l'arrivée d'eau, l'anhydrite s'est transformée en gypse et s'est mise à gonfler. Le sol de cette ville de 8000 habitants s'est élevé par endroits d'environ un demi-mètre. Les dommages résultant sur les bâtiments se sont comptés en millions de francs. Le même phénomène se produit actuellement à Lochwiller en Alsace. Sur le site de Haute-Sorne, on ne trouve de l'anhydrite qu'à des profondeurs comprises entre 1100 et 1265 m, c'est-à-dire suffisamment loin de la surface et du réservoir. En raison de la pression et de la température qui règnent à cette profondeur, la transformation de l'anhydrite en gypse est impossible (voir également l'étude de la Nagra NTB 79-12 sur ce sujet).

1.3. Méthodes de contrôle de la sismicité induite

Le procédé EGS implique le déclenchement ciblé de microséismes afin d'augmenter la perméabilité hydraulique d'un réservoir. On observe généralement une propagation systématique de la sismicité induite. Tout comme la surpression hydraulique se propage dans le temps et dans l'espace, la sismicité commence à proximité du point d'injection et se propage peu à peu à des distances plus importantes (Illustr. 2).

La sismicité augmente avec la diffusion de la surpression

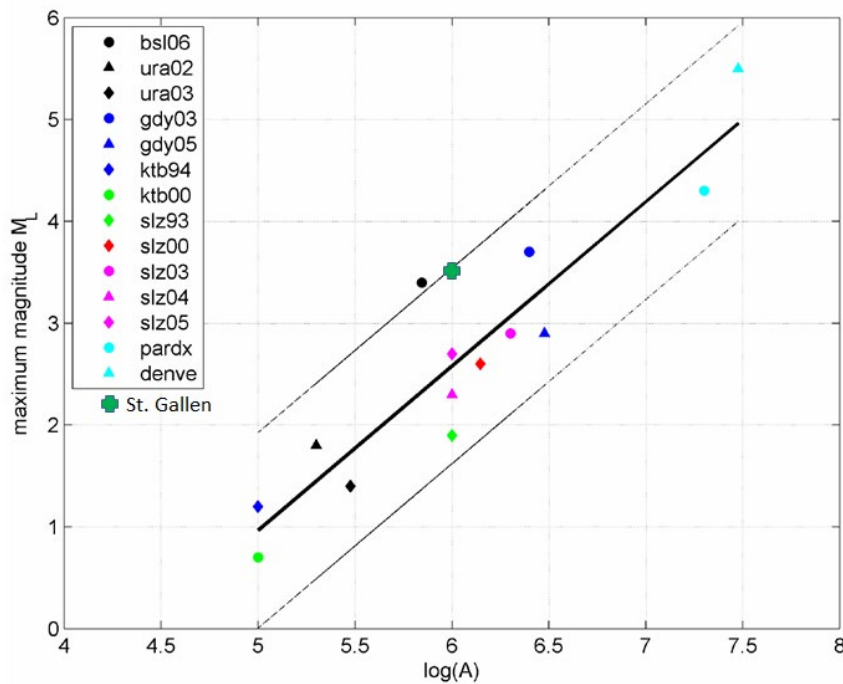


Illustr. 2: Evolution de la sismicité à Bâle pendant la phase de stimulation. L'axe x représente le temps en jours, l'axe y la distance au point d'injection en [m]. Les cercles symbolisent chacun un séisme enregistré. Illustration reprise de Goertz-Allmann et.al 2011.

A l'inverse de la sismicité naturelle, dans laquelle une accumulation des contraintes tectoniques se produit sur une grande échelle, les variations de contraintes par l'injection de liquide se produisent à proximité immédiate d'une source ponctuelle. Par conséquent, les zones concernées par des variations de contraintes (dans le cas d'une injection continue) s'étendent systématiquement au fil du temps. Ainsi, la surface des fissures susceptibles de subir un mouvement cisailant augmente également, de même que l'intensité des séismes induits.

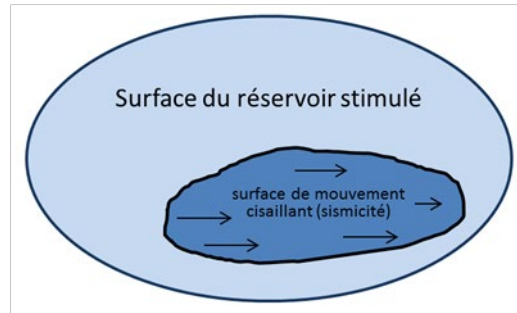
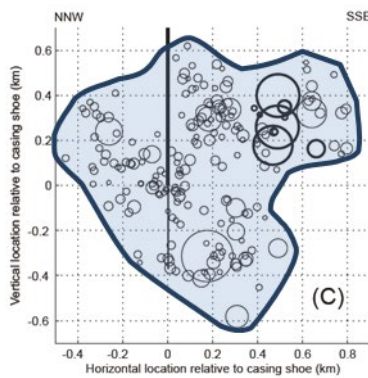
L'intensité des séismes augmente avec la taille de la surface stimulée

Des données d'observation (Baisch, 2009) permettent de déduire un rapport entre la surface stimulée et une magnitude maximale attendue. C'est ce que montre l'illustr. 6 pour différentes stimulations hydrauliques de réservoirs géothermiques. Les événements de St-Gall n'y font pas exception. En effet, dans cette localité, bien qu'un volume relativement faible ait été injecté, la surface activée était cependant importante (env. 1000 m x 1000 m).



Illustr. 3: Magnitude maximale observée des séismes en fonction du logarithme de la surface du réservoir sismiquement actif pour différents projets de géothermie (gdy=Cooper Basin, bsl=Bâle, slz=Soultz-sous-Forêts, ura=Bad Urach, ktb=forage profond continental; les deux derniers chiffres désignent l'année à laquelle la stimulation s'est produite) et injections d'eaux usées (symboles bleu clair: pardx=Paradox Valley; denve=Denver). La ligne continue désigne un ajustement linéaire des points de données, les lignes en pointillés l'intervalle de confiance 2σ . Illustration tirée de Baisch et al., 2009. St-Gall est indiquée par une croix verte; la surface a été déterminée à partir des données Internet du Service sismologique Suisse.

En raison des conditions physiques, il est toutefois impossible que la totalité de la surface du réservoir se déplace au cours d'un unique séisme. Au lieu de cela, les contraintes présentes se déplacent et se relaxent sur plusieurs petites surfaces de fissure (Illustr. 4).

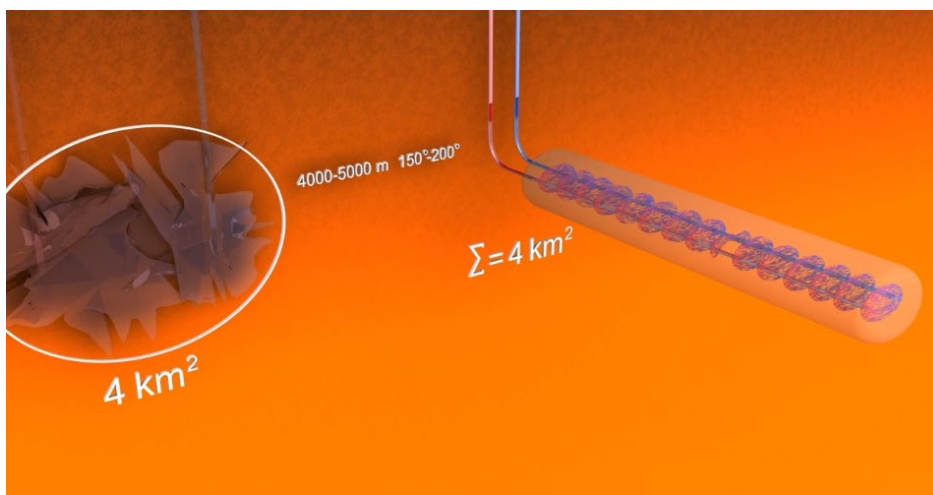


Illustr. 4: A gauche: Vue latérale du réservoir géothermique de Bâle (Deichmann, 2009). En couleur, une interprétation de la surface d'échange thermique. La surface d'échange thermique a été créée par le biais de plusieurs séismes. Les séismes sont illustrés par ces cercles proportionnels à leur moment sismique.

A droite: Représentation schématique d'un réservoir stimulé, dans une vue en plan. La surface de fracture maximale d'un séisme unique (en bleu) est toujours inférieure à la surface du réservoir stimulé.

L'observation selon laquelle l'intensité sismique augmente proportionnellement à la surface stimulée dans le sous-sol offre un premier point de départ pour éviter de déclencher des séismes d'une intensité non souhaitable. Plutôt que de créer une seule grande surface d'échange thermique (concept de Bâle), la méthode de la société Geo-Energie Suisse SA propose de stimuler plusieurs petites surfaces parallèles (systèmes multi-fractures, Illustr. 5). La limitation des surfaces de faille permet ainsi de ramener la probabilité de déclenchement des secousses à un niveau acceptable.

Limitation de l'intensité des séismes par la stimulation de petites surfaces



Illustr. 5: Représentation schématique du réservoir géothermique stimulé. Comparaison entre le système tel qu'il a été utilisé à Bâle (à gauche) et le nouveau concept multi-fractures (à droite). Le nouveau concept fournit plus d'énergie et engendre nettement moins de secousses sismiques. Etant donné que la magnitude des secousses sismiques est fonction de la surface du réservoir, le risque de séisme peut ainsi être limité à la source de façon intrinsèque.

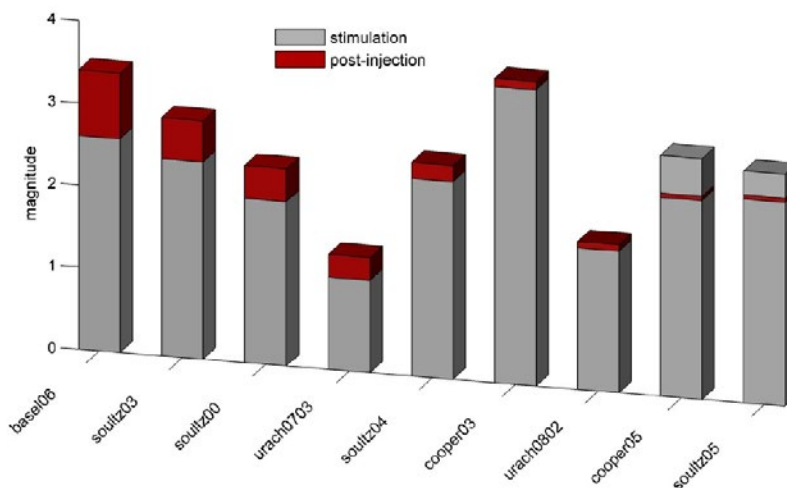
Une animation vidéo sur le concept de la société Geo-Energie Suisse SA est disponible sur le site:
<http://www.geo-energie.ch/de/projekte/hautesorne.php>

L'augmentation de l'intensité maximale des séismes avec le temps permet d'utiliser des mesures supplémentaires de réduction du risque sismique (p. ex. «systèmes de feux de signalisation conventionnels», Bommer et al., 2006) dans lesquelles le dépassement de valeurs de seuil données entraîne l'arrêt ou l'ajustement des mesures hydrauliques (Chap. 6.3). Un système de feux de signalisation de sécurité sera également utilisé dans le projet de la société Geo-Energie Suisse SA.

Système de feux de signalisation pour la réduction du risque sismique

L'un des facteurs limitants du «système de feux de signalisation conventionnels» est l'«effet de traîne», c'est-à-dire le fait que les séismes les plus importants ont souvent été observés après l'arrêt des mesures hydrauliques (Illustr. 6). Ce phénomène est dû au fait que même après la désactivation des pompes, la diffusion de pression se poursuit temporairement dans les zones périphériques du réservoir.

Effet de traîne: Les séismes les plus importants se produisent souvent après l'arrêt des mesures hydrauliques



Illustr. 6: Magnitudes observées des séismes pendant les stimulations hydrauliques (gris) et pendant la phase de post-injection (rouge). La hauteur des barres rouges désigne l'«effet de traîne», c'est-à-dire l'ampleur de l'augmentation de la magnitude des séismes après la désactivation des pompes. L'augmentation la plus importante (de 0,8 unité de magnitude M_L , ou 0,6 unité en M_w) a été observée à Bâle. Cette illustration a été tirée de l'étude bâloise (Baisch et al., 2009). Les séismes les plus forts se sont produits quelques heures (p. ex.: basel06, cooper03) à quelques jours (p. ex.: urach0802, soultz03) après l'arrêt ou l'interruption de l'injection.

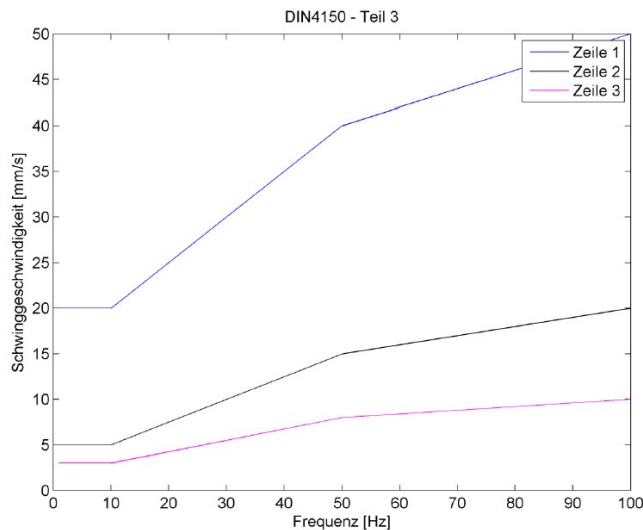
A l'inverse de Bâle, l'effet de traîne est pris en compte dans le système de feux de signalisation de la société Geo-Energie Suisse SA.

Effet de traîne pris en compte

1.4. Normes d'ébranlement

En Suisse, la norme SN 640 312a donne des valeurs indicatives de la vitesse de vibration du sol en dessous de laquelle même de petits dommages sont très peu probables [SN 640312a, p.6]. Lors de l'évaluation par le bureau d'ingénieurs Aegerter & Bosshardt (2007) des dommages causés par les séismes observés sur le site géothermique DHM de Bâle, on a toutefois utilisé des valeurs indicatives plus faibles, conformes à la norme allemande plus stricte DIN 4150-3 (Illustr. 7). Dans le cadre d'une évaluation conservatrice des risques, on utilise ici également les valeurs indicatives allemandes. Selon DIN 4150-3 (vibrations dans les bâtiments), aucun dommage dû à des vibrations n'est à attendre sur des bâtiments si la vitesse de vibration du sol est inférieure à 5 mm/s dans la plage de fréquence jusqu'à 10 Hz. Pour les bâtiments particulièrement sensibles, la valeur limite correspondante est de 3 mm/s (Illustr. 7). La norme suisse SN 640 312a définit la valeur indicative pour les bâtiments particulièrement sensibles à 7,5 mm/s.

**La modélisation
du risque se base
sur la norme DIN
allemande plus
stricte**



Illustr. 7: Valeurs limites de la vitesse maximale de vibration du sol en dessous de laquelle, selon DIN 4150-3, aucun dommage n'est attendu. La ligne 1 (bleue) désigne les bâtiments industriels, la ligne 2 (noire) les bâtiments d'habitation et la ligne 3 (rose) les bâtiments particulièrement sensibles. La norme suisse SN 640 312a définit la valeur limite pour les bâtiments particulièrement sensibles à 7,5 mm/s.

1.5. Echelles de magnitude

L'intensité d'un séisme est donnée en unités de magnitude. Pour des raisons historiques, on utilise souvent la magnitude de Richter ou magnitude locale (ML). Comme son nom l'indique, cette magnitude est déterminée localement et, en raison de paramètres d'étalonnage différents, n'est pas forcément comparable avec des magnitudes mesurées en d'autres lieux. En outre, la détermination de la magnitude de Richter pour de petits séismes donne lieu à des erreurs importantes, car la magnitude est alors sous-estimée (Deichmann, 2006). C'est pourquoi dans ce document, on indiquera dès que possible la magnitude de moment (Mw), qui est une grandeur physique pouvant être comparée. Pour convertir une magnitude en une autre, on utilise la relation décrite par Goertz-Allmann (2011).

1.6. Méthodes d'évaluation de la sismicité induite

L'aléa sismique peut être évalué à l'aide de deux méthodes: la méthode déterministe (analyse basée sur des scénarios) et la méthode probabiliste (analyse basée sur une distribution de probabilités).

Dans la variante déterministe, on se base sur des scénarios sismiques donnés basés sur des propriétés physiques des roches. On calcule pour ceux-ci les mouvements du sol ou les modifications de contraintes attendus au niveau des zones de faille environnantes. Le risque sismique est quantifié sous la forme d'un montant de dommages fixe pour un séisme d'une magnitude donnée. Les incertitudes de calcul sont gérées de façon conservative, c'est-à-dire en définissant une marge de sécurité élevée. Cette marge est déterminée à partir de données d'observation mondiales sur la sismicité induite. L'approche déterministe définit une limite de sismicité maximale en fonction de la surface stimulée.

**Approche
déterministe:
données
physiques,
approche basée
sur des scénarios**

L'approche probabiliste utilise une répartition statistique des séismes et permet une extrapolation théorique à des séismes plus importants. L'approche statistique prend ainsi en compte des séismes qui ne se sont encore jamais produits en relation avec la géothermie, et leur attribue une probabilité d'occurrence. L'approche probabiliste est généralement utilisée pour quantifier le risque sismique en fonction de l'activité sismique naturelle. Le Service sismologique suisse a développé une méthode d'évaluation probabiliste de la sismicité induite et l'a appliquée aux données du projet de Bâle. Cette méthode permet également une prévision de l'évolution de la sismicité en temps réel.

**Approche
probabiliste:
données
statistiques,
approche basée
sur la probabilité**

Dans le cadre des projets de géothermie, il n'y a aucun consensus sur l'approche qui serait la plus appropriée pour l'évaluation du risque sismique. D'une part, on ne peut pas prédire les séismes qui surviennent dans la nature (mais on peut les décrire par des corrélations statistiques -> approche probabiliste), et d'autre part, il existe pour la sismicité induite, de par la surface du réservoir stimulé et partiellement de par la quantité de liquide injecté, un paramètre permettant de contrôler les processus qui se déroulent dans le sous-sol (-> approche déterministe).

C'est pourquoi le rapport d'impact présente les résultats des deux approches, et prend en compte à la fois des aspects déterministes et des aspects probabilistes dans les mesures de contrôle du risque sismique. On utilise ainsi l'approche déterministe pour déterminer une magnitude pour la limite des dommages et de là, pour déterminer les valeurs de seuil du système de feux de signalisation de sécurité. L'influence des zones de faille régionales fait également l'objet d'une évaluation déterministe. L'approche probabiliste est utilisée pour estimer le risque résiduel ou les probabilités de défaillance du système de contrôle liée à la nature aléatoire des séismes.

**Les deux
approches sont
prises en compte
dans l'EIE**

2. Etat initial de la sismicité naturelle, périmètre d'étude élargi

Le Service sismologique Suisse a étudié la sismicité naturelle dans un large périmètre d'étude de 25 km autour du projet (rapport scientifique E3). Le choix de ce périmètre permet de prendre en compte l'ensemble des grandes zones de faille connues, sur toute leur longueur. L'étude se base sur le catalogue des tremblements de terre de Suisse révisé en 2009 (ECOS-09). Ce catalogue répertorie des séismes historiques ainsi que des séismes enregistrés par des instruments.

Les données historiques reflètent très largement la densité de population de jadis: Avant le 19^è siècle notamment, la plupart des séismes connus se sont produits dans la région de Bâle, ce qui ne peut correspondre qu'en partie à la réalité. Le seul séisme historique connu dont l'épicentre se trouve probablement dans un rayon de 5 km autour du site du projet de géothermie prévu s'est produit le 1^{er} juillet 1932 près de Glovelier et a atteint une intensité de IV-V, ce qui correspond à une magnitude de moment d'env. 3,5. Le catalogue ECOS09 attribue à cet évènement une incertitude de localisation de ± 10 km. La profondeur du foyer est indéterminée. Il est cependant probable que la profondeur du foyer soit comparable à celle des tremblements de terre mesurés durant la période instrumentale (9 ± 5 km).

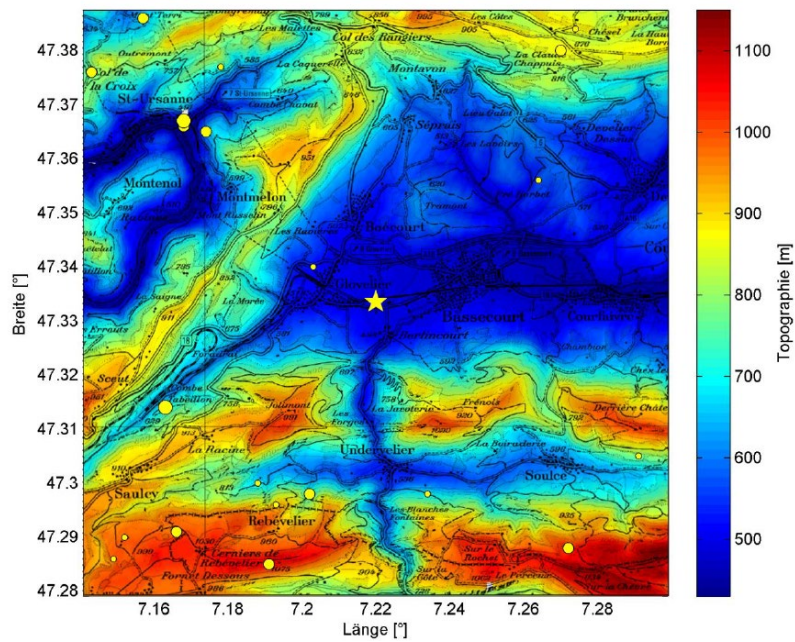
Les séismes enregistrés depuis le début des relevés instrumentaux semblent, par comparaison, être répartis uniformément sur tout le territoire considéré. Dans les années 1999 à 2012, on a pu observer une accumulation de séismes notamment à St-Ursanne ou dans la région de Soleure. **Une orientation plus ou moins linéaire des épicentres, qui pourrait indiquer l'existence d'une faille active de grande dimension, n'est toutefois visible sur aucune des cartes d'épicentres (rapport scientifique E3).**

Aucune indication de zones de faille actives

Au sein du périmètre plus restreint déterminé dans le chapitre 3.1 autour du site de Haute-Sorne, très peu de séismes ont été observés jusqu'à présent (Illustr. 8). Le plus fort de ces séismes affichait une magnitude de $M_L=3,7$ ($M_w=3,4$) et s'est produit le 11 décembre 1987 au sud-ouest de Glovelier, à une profondeur de 9 km (± 5 km) et à une distance épicentrale d'env. 5 km.

faible activité sismique naturelle autour du projet

En bordure de ce périmètre restreint se trouve également la séquence sismique de St-Ursanne. La profondeur calculée de ces foyers se situe entre 3 et 5 km. Au vu des fortes ondes de surface des sismogrammes enregistrés sur plusieurs stations d'observation, cette profondeur doit être considérée comme une valeur maximale. Il n'est ainsi pas exclu que cette séquence de tremblements de terre se soit produite dans les formations sédimentaires superficielles.



Illustr. 8: Activité sismique naturelle autour du site de Haute-Sorne (étoile jaune). Les séismes sont indiqués par des points jaunes dont la taille est proportionnelle à la magnitude sismique. Le plus petit séisme représenté possède une magnitude de $ML=1,1$ ($M_w=1,6$), le plus fort séisme représenté possède une magnitude de $ML=3,7$ ($M_w=3,4$). Base de données: Catalogue ECOS (version 2009), complété par la sismicité des années 2009 à 2012, conformément à la publication Internet du Service sismologique Suisse. Illustration reproduite avec l'autorisation de swisstopo (BA120403).

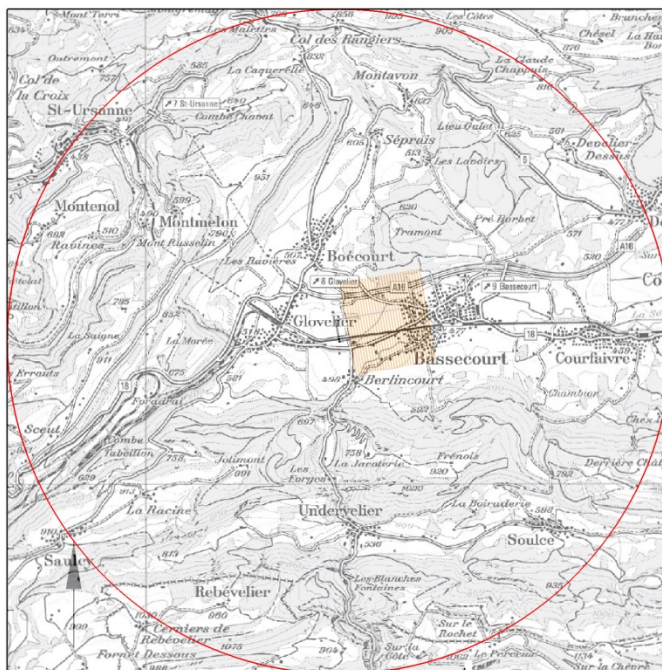
3. Evaluation déterministe des risques

3.1. Périmètre d'étude restreint

Le périmètre d'étude restreint doit couvrir la zone dans laquelle on peut s'attendre à des dommages potentiels dus à un séisme. Cette zone dépend principalement de la magnitude et de la profondeur du foyer du séisme. C'est pourquoi la détermination d'un périmètre d'étude ne peut s'effectuer que pour une magnitude et une profondeur de foyer données.

**Périmètre d'étude
de 6 km autour du
site du projet**

Pour déterminer le périmètre, on considère comme base de calcul le déclenchement d'un séisme de magnitude $M_w=3,1$ dans le réservoir. Si le système de feux de signalisation décrit dans le chap. 6.3 passe au rouge, la probabilité de déclenchement d'un séisme $M_w=3,1$ est de 1:100. Le périmètre a été défini de manière à inclure toutes les zones habitées dans lesquelles, à la suite d'un séisme de magnitude $M_w=3,1$ les ébranlements du sol modélisés dépassent la limite de dommages matériels possible pour les bâtiments d'habitation, de 5 mm/s (Chap. 1.4). Il en résulte un périmètre d'env. 6 km autour du site du projet (voir l'illustr. 9). En dehors de ce périmètre, la valeur limite précitée n'est que rarement dépassée, dans des zones très peu habitées.



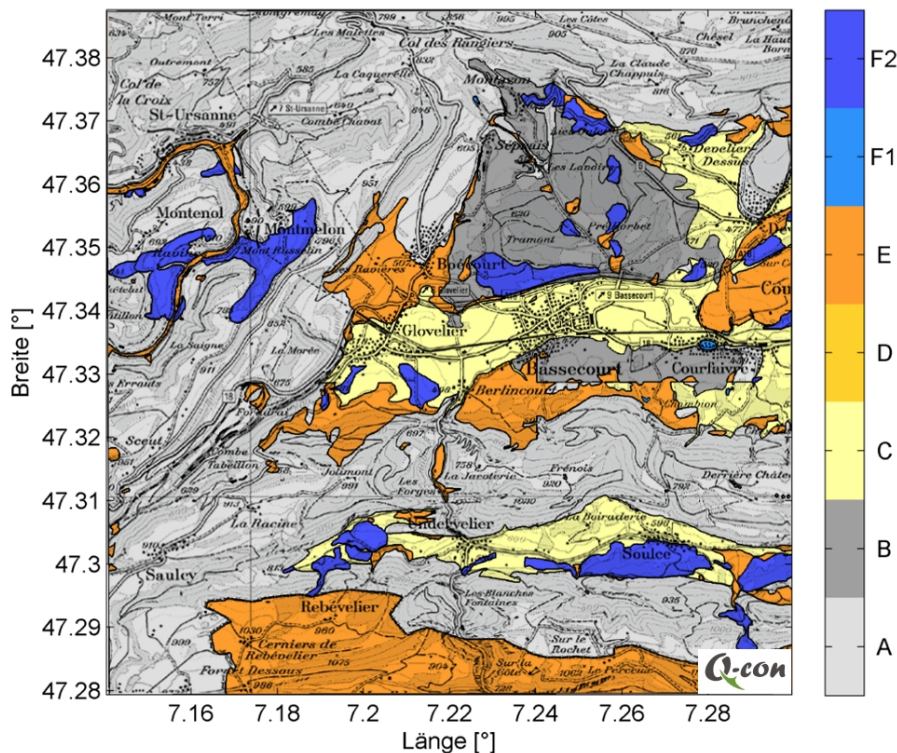
Illustr. 9 Représentation du périmètre d'étude restreint de 6 kilomètres autour du site de Haute-Sorne. La position de l'échangeur de chaleur est représentée par la zone hachurée en brun. Illustration reproduite avec l'autorisation de swisstopo (BA120403).

3.2. Mouvements du sol et scénarios de risque

Pour modéliser les vitesses de vibration du sol pour un séisme d'une magnitude prédéterminée, on utilise une relation empirique de Douglas et al. (2012). Celle-ci fournit un rapport entre la vitesse maximale de vibration du sol (peak ground velocity, pgv) en fonction de la magnitude sismique, de la profondeur de l'épicentre et de la distance épacentrale. La vitesse de vibration du sol est tout d'abord calculée sans prendre en compte les facteurs d'amplification de surface, pour une roche de référence dure.

Calcul du mouvement du sol à l'aide de données empiriques

Ensuite, on détermine à l'aide de la carte des classes de sols de fondation (Illustr. 10) les vitesses d'ondes de cisaillement des 30 premiers mètres et on applique les facteurs d'amplification de surface, déterminés de façon empirique, qui en résultent (Poggi et al., 2011). Dans le cadre d'une approche conservatrice, on considère que la fréquence dominante des signaux d'ébranlement s'élève à 10 Hz. Cette hypothèse conduit souvent, notamment pour des séismes de magnitude $M_w < 3$, à une surestimation des valeurs d'ébranlement.



Illustr. 10 Carte des classes de sols de fondation autour du site de Haute-Sorne. La carte est centrée sur le lieu du projet. Source: Office fédéral de l'environnement. Illustration reproduite avec l'autorisation de swisstopo (BA120403).

Pour différents scénarios prédéterminés, on peut ainsi calculer des scénarios de dommages, à partir des vitesses de vibration du sol modélisées. Le calcul des scénarios de dommages suit la méthodologie de l'étude SERIANEX (Baisch et al., 2009) qui, en tant qu'unique étude réalisée jusqu'à présent, fournit des valeurs de référence pour des dommages dus à des séismes induits par la géothermie en Suisse. Les dommages subis par un bâtiment sont déterminés en fonction de l'intensité sismique et de la vulnérabilité du bâtiment. L'intensité (I_{ems}) peut être

Détermination des dommages analogue à l'étude SERIANEX

dérivée des vitesses de vibration du sol, tandis que la vulnérabilité dépend de l'âge et du type du bâtiment (catégorie de bâtiment). Le nombre de bâtiments dans le périmètre est déterminé à partir des informations de l'Office fédéral de la statistique sur les bâtiments d'habitation. En outre, les bâtiments industriels et les bâtiments ayant une valeur particulière (bâtiments publics et historiques) ont été identifiés et pris en compte dans les modélisations.

Dans les scénarios de réalisation présentés au rapport scientifique (E4), on a déterminé les effets à la surface pour différentes magnitudes. Les vitesses de vibration du sol ou l'intensité sismique, ainsi que les dommages matériels éventuels résultants, ont été modélisés pour chaque valeur de magnitude.

➤ **Une magnitude de $M_w=2,6$ a été déterminée comme étant la limite des dommages matériels**

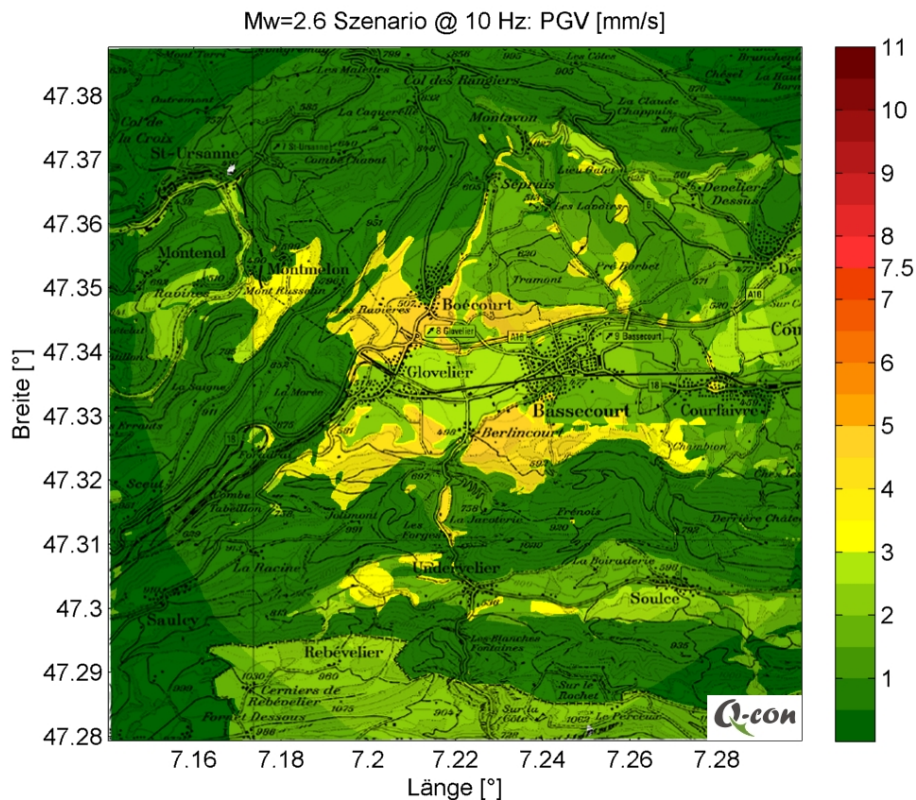
Dans ce cas, les mouvements du sol coïncident avec les valeurs indicatives de la norme DIN (voir ci-dessous). Les dommages matériels déterminés se situent à la limite de la précision de résolution. La limite des dommages matériels de $M_w=2,6$ est ainsi déterminante pour les valeurs de seuil d'un système de sécurité avec feux de signalisation (Chap. 6.3).

Les modélisations d'aléa pertinentes pour le rapport d'impact sont résumées sous forme tabulaire (Tableau 1). Ci-après, on présentera à titre d'exemple le scénario de dommages pour la limite des dommages matériels (scénario 1), ainsi qu'une comparaison avec le scénario DHM de Bâle (scénario 3).

Scénario	Magnitude (Mw)	Intensité max. (lems)	Dommages possibles en CHF
1 Limite de dommages	2,6	4	< 5000
2 Séisme pour la détermination du périmètre	3,1	5	400 000
3 Scénario de Bâle	3,2	5,5	710 000

Tableau 1: Résumé des scénarios de réalisation étudiés pour le réservoir souterrain sur le site de Haute-Sorne. Un séisme d'intensité $M_w=2,6$ a été déterminé comme limite des dommages matériels. Les dommages indiqués de 5000.- CHF se situent en dessous de la précision de résolution de la méthodologie.

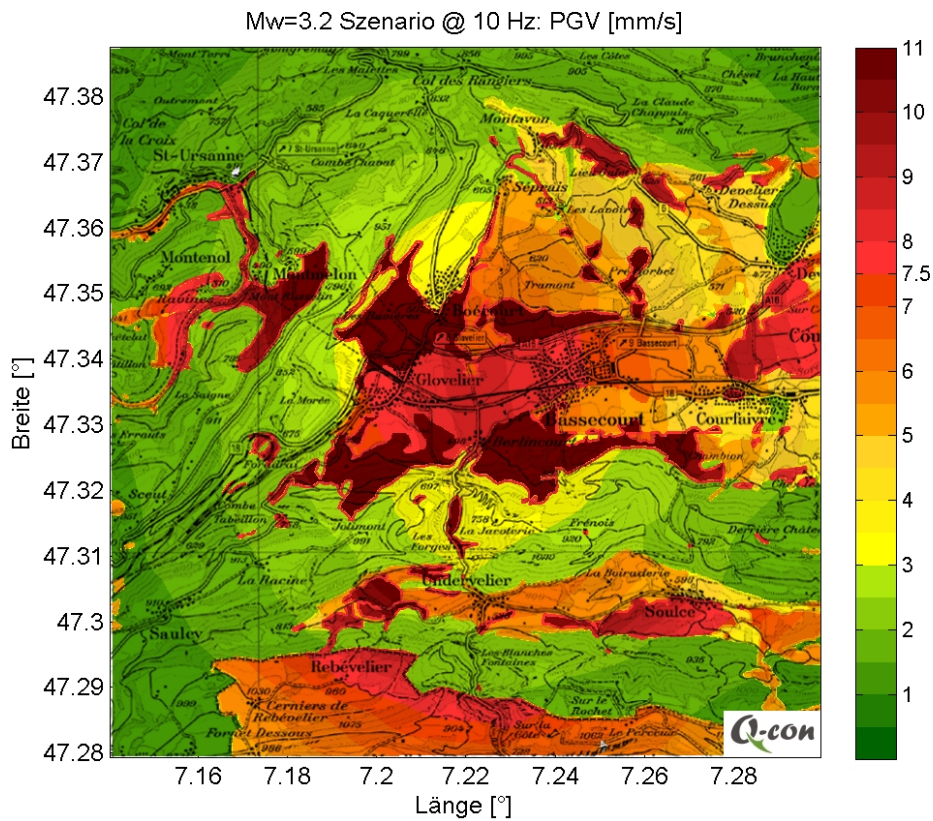
L'illustr. 11 montre la répartition dans l'espace des valeurs d'ébranlement maximales pour un séisme de magnitude $M_w=2,6$ dans le réservoir. La valeur indicative correspondante pour les bâtiments d'habitation normaux (5 mm/s, voir le chap. 1.4) est respectée. Pour les bâtiments historiques, on a en outre déterminé que le seuil des dommages potentiels pour des bâtiments particulièrement sensibles aux vibrations (3 mm/s, voir le chap. 1.4). n'était pas dépassé. Des dommages sont donc très improbables, par contre des secousses de cette intensité pourraient être nettement perceptibles sur une zone relativement étendue en particulier à Glovelier, Bassecourt et Boécourt. Le montant des dommages a été évalué à moins de 5000 CHF. Cette valeur est inférieure à la précision de résolution de la méthodologie utilisée.



Illustr. 11: Vitesse de vibration maximale du sol autour du site de Haute-Sorne pour un séisme induit de magnitude $M_w=2,6$. La vitesse de vibration du sol est donnée en mm/s conformément à l'échelle de couleurs. Illustration reproduite avec l'autorisation de swisstopo (BA120403).

Dans le réservoir géothermique DHM de Bâle, un séisme de magnitude $M_w=3,2$ a été mesuré (voir le chapitre 7). Celui-ci a causé un nombre important de dommages, pour la plupart légers, qui ont été couverts par l'assurance à hauteur d'environ 7 millions de CHF (Baisch et al., 2009).

L'illustr. 12 montre les mouvements du sol modélisés pour un séisme hypothétique de la même intensité ($M_w=3,2$) dans le réservoir du site de Haute-Sorne. La valeur indicative de 5 mm/s est largement dépassée dans ce scénario. Les valeurs d'ébranlement maximales s'élèvent à 15,4 mm/s dans la région épiscopale. Les zones concernées ne sont plus entièrement incluses dans le périmètre défini ici de 6 km. Pour calculer le montant des dommages, on a ainsi défini une zone élargie englobant toutes les régions présentant un $I_{EMS}>3,8$. Le montant des dommages déterminé s'élève à env. 710 000 CHF. En raison du choix du site, le montant des dommages et donc 10 fois inférieur à celui du projet DHM de Bâle.



Illustr. 12 Vitesse de vibration maximale du sol (PGV) autour du site de Haute-Sorne pour un séisme induit de magnitude $M_w=3,2$. La vitesse de vibration du sol est donnée en mm/s conformément à l'échelle de couleurs allant de 0 à 11 mm/s. La valeur PGV maximale est de 15,4 mm/s. Illustration reproduite avec l'autorisation de swisstopo (BA120403).

3.3. Sismicité induite pendant la phase de réalisation

Afin de délimiter plus précisément la plage de valeurs possibles de l'intensité sismique attendue lors de la réalisation d'un réservoir géothermique, on a effectué des simulations numériques de stimulation du réservoir.

Deux modèles de contraintes du socle ont été considérés: le modèle DHM de Bâle (Baisch, 2009) et un modèle basé sur les observations du projet de géothermie de Soultz-sous-Forêts (Baisch, 2010).

L'ensemble de la phase de stimulation, ainsi que les deux premiers mois de la phase de circulation (exploitation), ont été modélisés.

Les modélisations ont pris en compte le système de feux de signalisation défini au chapitre 6.3. En outre, une dimension maximale avec un rayon de 400 m a été fixée comme critère d'arrêt (objectif atteint). En prenant en compte un effet de traîne possible, on obtient ainsi un rayon de 650 m, qui se situe nettement au-dessus de la taille minimale requise pour permettre un fonctionnement rentable. On a tout d'abord considéré la stimulation de la première fissure stimulée, puis celle des fissures suivantes.

Dans le modèle 1, considéré comme un scénario extrême (modèle DHM de Bâle), le système de feux de signalisation entraîne un arrêt précoce de la stimulation. Comme paramètre d'entrée, on a choisi un schéma d'injection connu pour provoquer des magnitudes élevées en peu de temps. Dans ce modèle, une **magnitude maximale de $M_w=2,4$** est relevée durant la phase de réalisation. Cette magnitude est inférieure à la limite de dommages matériels déterminée dans le chapitre 3.2. En d'autres termes, dans cette simulation, le système de feux de signalisation a empêché le déclenchement d'une sismicité dommageable. Néanmoins, la surface de fissure stimulée de l'échangeur de chaleur peut, dans certaines circonstances, s'avérer trop petite pour permettre un fonctionnement rentable.

Dans le modèle 2 (modèle de Soultz-sous-Forêts), la valeur de seuil de magnitude du système de feux de signalisation n'est pas atteinte. La stimulation se poursuit jusqu'à ce que la fissure stimulée ait atteint la dimension maximale prédéterminée. Dans cette simulation, la **magnitude sismique maximale de $M_w=1,7$** est atteinte durant la stimulation. Cette stimulation permet d'atteindre l'objectif souhaité sans causer de dommages à la surface.

La stimulation de la première fissure entraîne une modification et une relaxation des contraintes présentes dans l'environnement (appelées contraintes de Coulomb). De ce fait, la contrainte est en moyenne réduite sur les fissures voisines. Par conséquent, les magnitudes sismiques engendrées tendent à être plus faibles.

En raison des contraintes de Coulomb réduites, la sismicité relevée lors de la stimulation des fissures suivantes peut être évaluée, de manière conservative, par le biais de la sismicité relevée sur le premier segment de fissure. En d'autres termes, lors de la réalisation du système multi-fractures, on attend au maximum la magnitude maximale déterminée ci-dessus sur chacune des fissures individuelles, et la fréquence de déclenchement des séismes simulés sur la première fissure doit être multipliée par le nombre de fissures stimulées.

2 modèles de contraintes: Bâle & Soultz-sous-Forêts

Système de feux de signalisation pris en compte

stimulation de la 1^{ère} fracture:

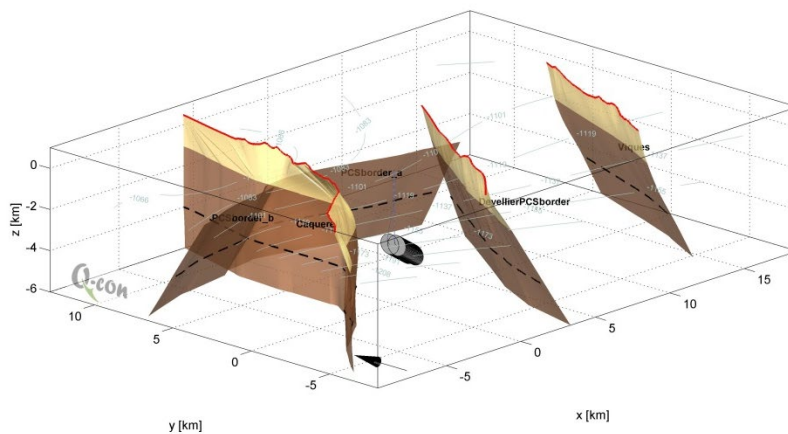
Modèle 1: les feux de signalisation empêchent tout dommage matériel

Modèle 2: La sismicité reste en dessous de la limite de dommages matériels

Sismicité plus faibles sur les fissures suivantes

Influence de zones de faille connues

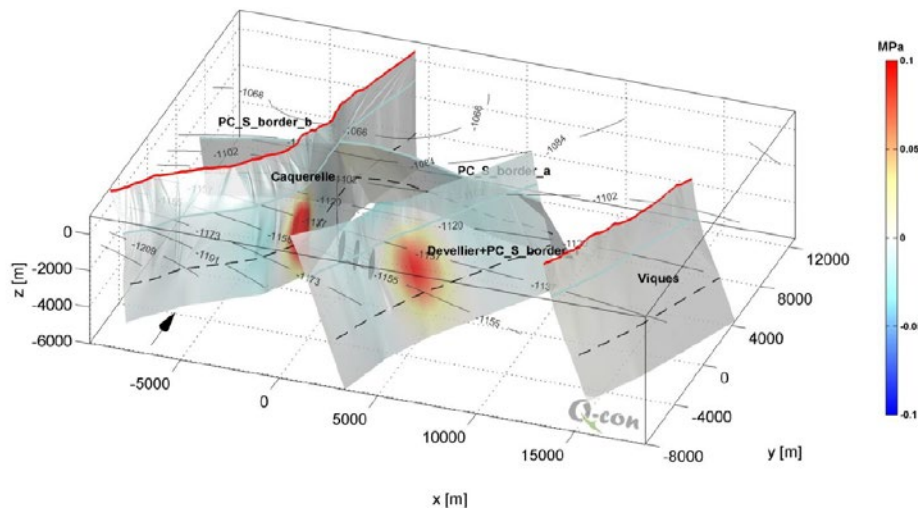
Le site de Haute-Sorne est entouré par 3 grandes zones de faille (Illustr. 13 et rapport d'expertise E1). On ne connaît pas exactement la distance sur laquelle se poursuivent ces zones de faille dans le socle cristallin. Pour l'évaluation des risques, les zones de faille autour du projet ont été extrapolées dans le socle, c'est-à-dire que leur dimension a été sciemment surestimée. En outre, on étudie également le scénario selon lequel une faille jusqu'à présent inconnue, à l'orientation critique, pourrait se situer à proximité immédiate du site du projet.



Illustr. 13 : Modèle 3D des zones de faille identifiées autour du projet et localisation du réservoir souterrain. Le tracé des failles dans les formations sédimentaires déterminé par la géologie de surface et la géophysique est représenté en beige. La couleur marron illustre une extrapolation possible des failles dans le socle, dans le cadre d'une évaluation conservatrice des risques. Le réservoir est représenté en gris

Sur toutes les failles représentées dans l'Illustr. 13, on a modélisé les variations de contraintes de Coulomb provoquées par la stimulation, à l'aide des solutions analytiques d'Okada (1992). Les mécanismes possibles en décrochement ainsi qu'en faille normale et inverse ont été considérés

L'illustr. Illustr. 14 montre à titre d'exemple les variations de contraintes de Coulomb dans le modèle correspondant à un mécanisme de décrochement. Des variations de contraintes de 0,19 MPa apparaissent sur la faille de la Caquerelle, et de 0,1 MPa sur la faille de Develier. Pour toutes les autres failles ou tous les autres mécanismes de déformation, les variations des contraintes de Coulomb sont plus faibles (Illustr. 14).



Illustr. 14 Variations de contraintes de Coulomb sur les zones de faille pour un mécanisme de décrochement supposé. Les variations de contraintes de Coulomb sont données en MPa conformément à l'échelle de couleurs. Dans le cadre d'une évaluation conservatrice, l'échangeur de chaleur a été réalisé sur trois fissures stimulées de grande surface.

Les variations de contraintes de l'ordre de 0,01 - 1MPa peuvent également être provoquées par des signaux de déformation naturels (p. ex. par des trains d'ondes télésismiques, Hill 2008). Dans l'étude de risque (rapport d'expertise E4), on considère ainsi comme improbable le déclenchement d'une sismicité sur les zones de faille considérées.

Sismicité improbable sur les zones de faille environnantes

Influence de zones de faille inconnues

Malgré les précédentes considérations, on ne peut exclure qu'une zone de faille jusqu'à présent inconnue se trouve à proximité immédiate du réservoir. Etant donné que les variations de contraintes de Coulomb modélisées sont proportionnelles à l'éloignement, des variations de contraintes sur une faille plus proche pourraient être nettement plus importantes. Indépendamment de l'orientation, il est toutefois certain que les variations de contraintes de Coulomb surviendraient systématiquement dans l'espace et dans le temps. C'est pourquoi, dans le cas d'une réaction sismique sur une zone de faille jusqu'à présent inconnue, le système de feux de signalisation défini dans le chapitre 6.3 entraînerait également un arrêt précoce de la stimulation du réservoir.

Si de la sismicité apparaît, il reste possible, grâce aux feux de signalisation, de cesser les opérations

3.4. Sismicité induite pendant la phase d'exploitation

L'apparition de sismicité induite pendant la phase d'exploitation ne peut être que difficilement prédite en amont du développement d'une installation.

Dans un système dans lequel la pression hydraulique dans le réservoir géothermique a atteint des conditions quasi-stationnaires, aucune sismicité induite sensible n'est attendue. C'est ce que l'on observe actuellement dans le réservoir géothermique de Soultz-sous-Forêts, où aucune sismicité importante n'est plus enregistrée dans la phase d'exploitation actuelle.

Conditions de pression stationnaires: aucune sismicité sensible attendue

S'il existe dans un réservoir géothermique une connectivité hydraulique insuffisante entre le forage d'injection et le forage de production, des conditions de pression quasi-stationnaires dans le réservoir ne peuvent être atteintes que lentement, voire pas du tout. Dans ce cas, une sismicité induite peut apparaître même dans la phase d'exploitation (p. ex. Landau). Dans le cadre de l'étude de risque bâloise SERIANEX (Baisch, 2009), une exploitation en boucle a été étudiée pour des conductivités hydrauliques extrêmement faibles.

En cas de faible conductivité: env. 1 séisme par an avec une magnitude max. analogue à celle de la stimulation

Dans cette étude, la magnitude sismique maximale enregistrée pendant la phase d'exploitation est du même ordre que la plus grande magnitude enregistrée pendant la stimulation. La fréquence sismique a été estimée à un séisme par an. Pendant la phase d'exploitation, le système de feux de signalisation demeure opérationnel.

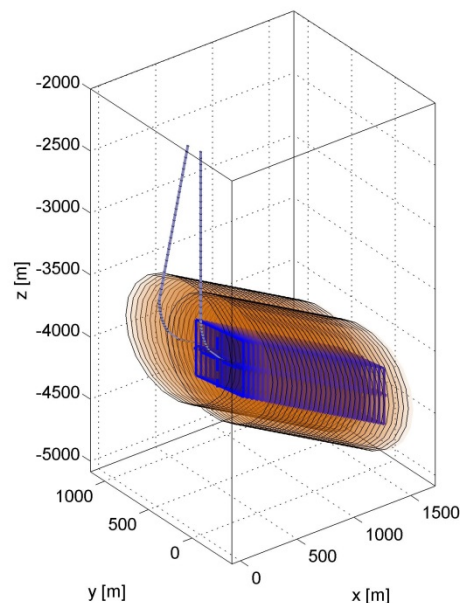
3.5. Influence de zones de faille naturelles pendant la phase d'exploitation

Influence de zones de faille connues

Pendant l'exploitation de l'installation géothermique, il se produit peu à peu un refroidissement des roches du réservoir dans la zone du forage d'injection. La contraction thermique des roches qui s'ensuit provoque des variations de contraintes dans le socle, ce qui peut théoriquement provoquer une sismicité dans les zones de faille naturelles présentes dans l'environnement immédiat du réservoir.

Pour quantifier une influence possible de l'activité sismique naturelle sur les zones de faille naturelles autour du site du projet, les variations du champ de contraintes causées par la contraction thermique du réservoir géothermique ont été modélisées. La modélisation suit la méthodologie décrite dans Baisch et al. (2009; AP4000).

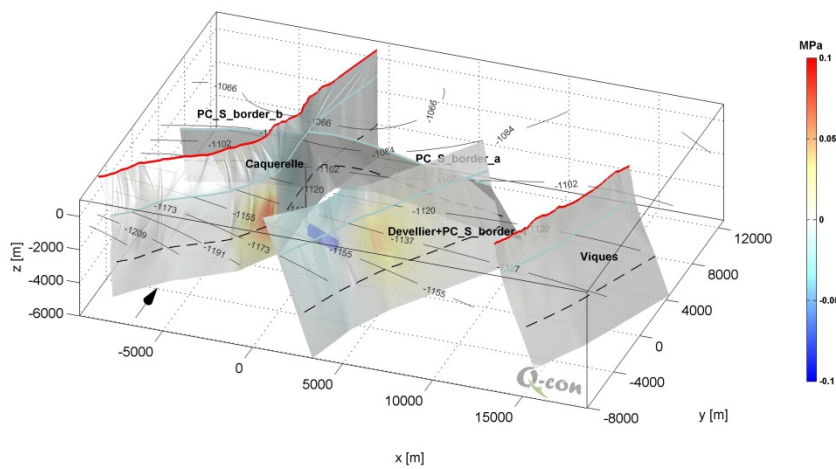
La zone de refroidissement a été définie par approximation sur un bloc, conformément à l'illustr. 15. On considère une durée d'exploitation de 30 ans, avec une puissance thermique moyenne de 30 MWth. La contraction s'effectue dans 3 directions.



Illustr. 15: Représentation schématique de la zone de refroidissement (en bleu) dans le système multi-fractures

L'illustr. 16 montre à titre d'exemple les variations des contraintes de Coulomb correspondant à un mécanisme de décrochement. Ces variations de contraintes apparaissent uniquement sur les failles de la Caquerelle et de Develier. En ces endroits, les variations maximales des contraintes de Coulomb sont de l'ordre de 0,07 MPa. Comme dans le chapitre 3.3, on considère comme improbable, dans l'étude de risque (rapport d'expertise E4), le déclenchement d'une sismicité sur les zones de faille considérées.

Influence improbable de la contraction thermique sur les zones de faille



Illustr. 16: Variations des contraintes de Coulomb dues à la contraction thermique sur les zones de faille pour un mécanisme de décrochement supposé. Les variations de contraintes de Coulomb sont données en MPa conformément à l'échelle de couleurs. La zone de refroidissement est représentée en bleu.

Influence de zones de faille inconnues

Etant donné que l'on ne peut totalement exclure que dans l'environnement du site du projet se trouvent des zones de faille jusqu'alors inconnues, il convient d'étudier les variations du champ de contraintes sur une zone de faille hypothétique. Pour cela, on suppose que la zone de faille hypothétique est orientée de manière critique dans le champ de contraintes actuel.

On estime la distance au-delà de laquelle un séisme d'une magnitude prédéterminée peut être théoriquement déclenché par des contractions thermiques. A titre d'exemple, on calcule la zone d'influence du réservoir souterrain pour un séisme de magnitude $M_w=3,5$. Celle-ci se trouve à moins de 2,5 km. En d'autres termes, si une zone de faille se situe à une distance de plus de 2,5 km, les variations de contraintes de Coulomb ne suffisent plus pour provoquer l'activation d'un séisme de magnitude $M_w=3,5$. Plus les séismes sont forts, plus la zone d'influence se réduit.

Le refroidissement thermique est un processus très lent auquel il est possible de mettre un terme en arrêtant toute circulation dans le sol. En raison du manque d'observations à long terme sur les installations EGS, on ne sait pas avec certitude si l'on doit s'attendre à une sismicité non négligeable due à la contraction thermique. Si des séismes se déclenchent dans la zone d'influence du refroidissement thermique, le système de feux de signalisation intervient également. Dans ce cas, il convient de vérifier si l'exploitation doit être réajustée.

Si de la sismicité apparaît, il reste possible, grâce aux feux de signalisation, de stopper les opérations

3.6. Sismicité induite après la fin de la phase d'exploitation

Les risques de la sismicité induite après la fin de la phase d'exploitation doivent être estimés comme étant très faibles. Après la fin de la phase d'exploitation, un équilibre hydraulique s'installe dans le réservoir, et la sismicité retombe au niveau de la sismicité naturelle. La baisse de la sismicité a été également observée dans le réservoir bâlois.

**Très faible risque
après la fin du
projet**

4. Evaluation probabiliste des risques

Le risque sismique est évalué par le biais de deux approches stochastiques différentes. D'une part, on détermine la probabilité de dépassement d'un effet de traîne d'une grandeur prédéterminée, et d'autre part on détermine à l'aide d'un «modèle Seed» (Gischig & Wiemer, 2013) la probabilité d'occurrence de séismes d'une importance prédéterminée.

4.1. Effet de traîne du système de feux de signalisation

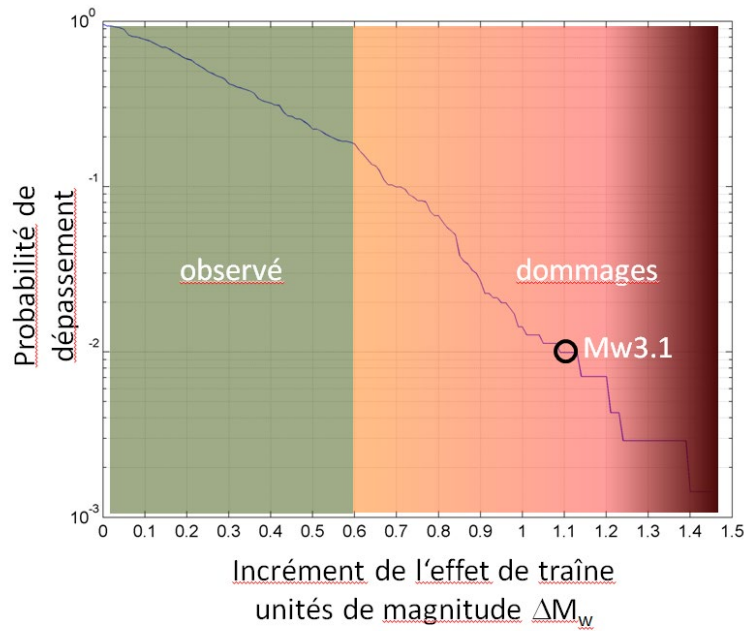
L'une des difficultés des projets de géothermie réside le fait que les mesures mises en œuvre à la surface ne font souvent effet dans le sous-sol qu'avec un certain retard (effet de traîne, chap. 1.3). En d'autres termes, pour des mesures telles que le système de feux de signalisation, il convient de planifier une «marge de sécurité» suffisante. Dans le projet DHM de Bâle, l'effet de traîne n'a pas été pris en compte, ce qui a provoqué le déclenchement d'une sismicité dommageable après l'arrêt de la stimulation du réservoir.

Pour le projet de la société Geo-Energie Suisse SA, l'effet de traîne (Chap. 1.3) a été évalué de façon conservative à 0,6 unité de magnitude (en Mw), ce qui correspond à l'effet de traîne le plus important jamais observé dans les projets de géothermie.

Il est toutefois théoriquement envisageable que l'effet de traîne puisse être encore plus élevé. Dans l'étude de risque (E5), on détermine ainsi la probabilité selon laquelle un effet de traîne d'une grandeur prédéterminée est dépassé. A cet effet, on utilise une combinaison statistique de deux effets physiques: On prend en compte que, d'une part, en raison d'hétérogénéités dans le sous-sol, les magnitudes peuvent augmenter par sauts et d'autre part, que la magnitude peut continuer à augmenter en raison de la diffusion continue dans le sous-sol. Pour estimer l'ordre de grandeur de ces deux facteurs, on utilise des données d'observation issues de stimulations de réservoirs géothermiques. Les données de base sont décrites dans l'étude SERIANEX (Baisch et al., 2009; AP 3000, Appendix 2). Si l'on se base sur la valeur de seuil «rouge» du système de feux de signalisation (Chap. 6.3), les valeurs de probabilité pour $\Delta Mw > 0,6$ indiquent la probabilité selon laquelle des dommages matériels peuvent survenir.

**Combinaison
statistique
d'effets
physiques**

L'illustr. 17 montre l'augmentation possible de la magnitude maximale attendue après l'arrêt de l'injection (shut in). Une augmentation de 1,1 unité de magnitude (Mw) se produit par exemple avec une probabilité de 1:100. A la condition que lors de chaque simulation, la valeur de seuil «rouge» du système de feux de signalisation de $Mw=2,0$ soit atteinte, on pourrait tabler, pour 100 interruptions des travaux, sur une magnitude sismique maximale de 3,1. Dans les mêmes conditions, on pourrait s'attendre, pour 10 interruptions des travaux, à la survenue d'un séisme au niveau de la limite des dommages matériels. Toutefois, on a montré au chapitre 3.3 que l'état de fonctionnement «rouge» n'était en réalité atteint que dans des conditions géologiques défavorables (scénario de Bâle). Dans le modèle de Soultz-sous-Forêts, l'ensemble de l'échangeur de chaleur devrait pouvoir être réalisé sans dépassement de la valeur de seuil de magnitude de $Mw=2,0$. Les indications de l'illustr. 17 représentent ainsi à nouveau une limite supérieure de la probabilité attendue.



Illustr. 17: Probabilité d'occurrence simulée d'une augmentation de magnitude après l'arrêt de l'injection (shut in). En gris sont représentées les augmentations de magnitude observées jusque-là. La zone rouge marque la survenue potentielle de dommages à la surface, dans le cas où la valeur de seuil rouge du système de feux de signalisation de $M_w=2,0$ aurait été atteinte. Selon l'estimation ci-dessus, la probabilité de relever une magnitude de $M_w=3,1$ serait de 1:100.

4.2. Probabilité d'occurrence de séismes d'une grandeur déterminée

Dans le rapport technique (E5), la probabilité d'occurrence de séismes est déterminée à l'aide d'un modèle type Seed stochastique (Gischig & Wiemer, 2013). Des variations de pression modélisées dans le sous-sol permettent, au moyen du modèle Seed, de déclencher des séismes de manière analogue à une distribution étalonnée de d'occurrence de séismes. Le modèle Seed ne comporte aucune limitation physique de la magnitude, ce qui signifie que dans ce modèle, il n'est pas exclu de déclencher un séisme de magnitude 7 par une variation minimale de la pression dans le sous-sol. Gischig & Wiemer (2013) montrent à l'aide d'un modèle Seed qu'il était possible, après une phase d'apprentissage et de calibration, de prédire l'évolution de la sismicité du projet de Bâle (Illustr. 26). Sans une telle possibilité de calibration des modèles Seed, les prédictions livrées pour le projet de Haute-Sorne n'ont toutefois qu'une pertinence limitée. Ce n'est qu'une fois que les propriétés des roches seront connues, à l'aide d'un test de stimulation par exemple, que des pronostics probabilistes de la sismicité attendue pourront être fait avec plus de précision. Néanmoins, l'impact de mesures de sécurité sur l'aléa sismique peut être représenté au moyen d'un modèle Seed et différents scénarios de stimulation peuvent être comparés les uns aux autres. C'est pour cette raison que dans le rapport d'expert (E5), l'attention est portée sur l'étude de la stimulation d'une première fissure, car durant la phase de réalisation du projet la suite de la procédure sera dépendante des résultats de la première stimulation. L'aléa total est toutefois également représenté.

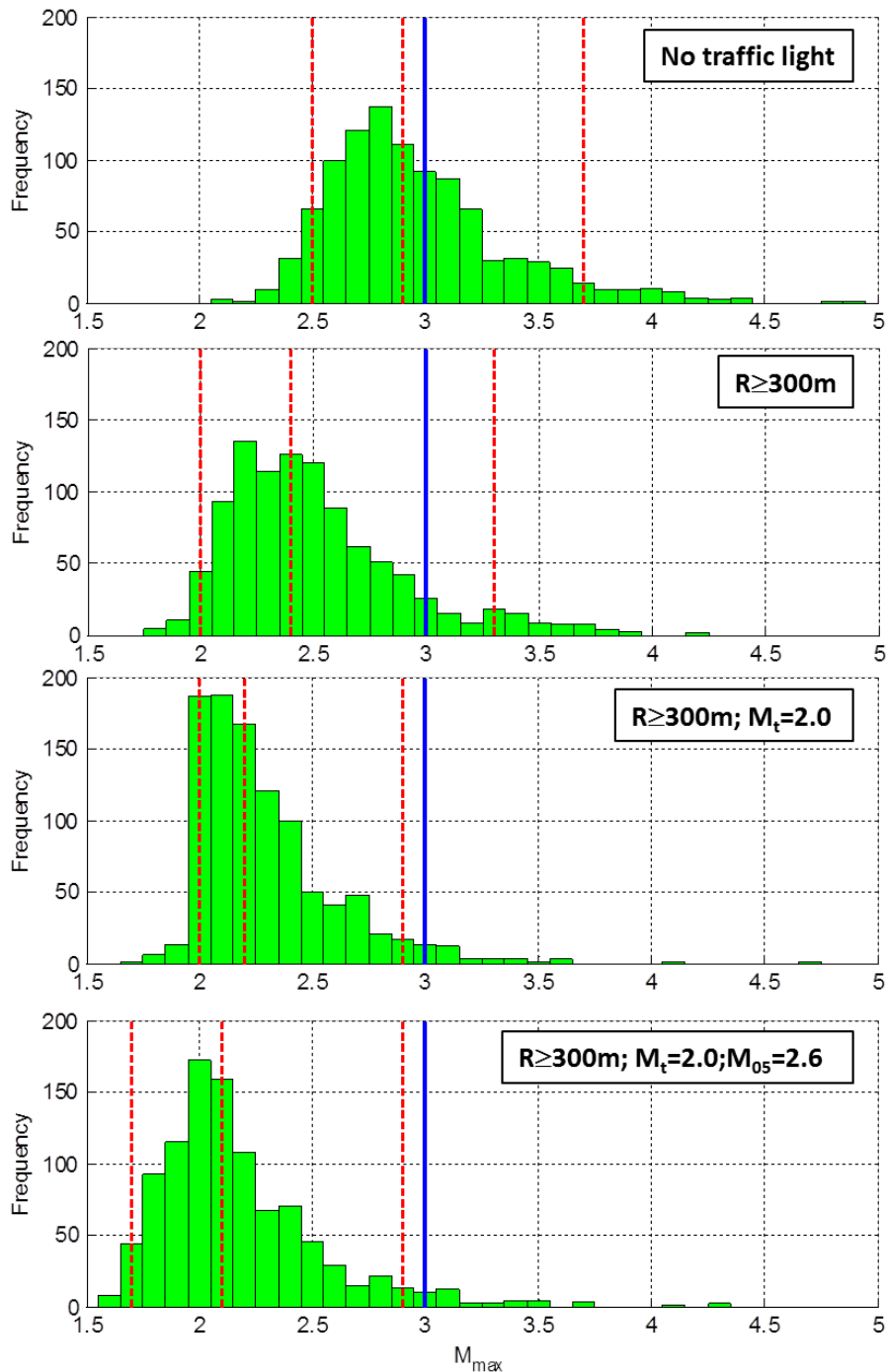
Le modèle Seed prend en compte des tremblements de terre extrêmement forts

Tout d'abord, on analyse au moyen d'une unique fissure stimulée les conséquences de différentes conditions d'arrêt de la stimulation en prenant en compte l'effet de traîne. Les modélisations se basent au début sur le même schéma d'injection que celui du projet bâlois. Lorsque l'un des critères d'arrêt suivants est atteint, l'injection est stoppée (shut in) et on attend la manifestation de l'effet de traîne:

Les systèmes de sécurité réduisent nettement la sismicité

- Rayon de stimulation de 300 m atteint (objectif atteint)
- Rayon > 300 m ou enregistrement d'une magnitude $M_w=2$ (le système de feux de signalisation conventionnel indique «rouge»)
- Rayon > 300 m ou enregistrement d'une magnitude $M_w=2$, ou existence d'une probabilité de 5% que la magnitude $M_w=2,6$ soit dépassée (alerte du système de feux de signalisation prédictif, chap. 6.3)

L'illustr. 18 présente des histogrammes de la magnitude maximale enregistrée pour 1000 réalisations du modèle Seed stochastique. La limitation de la surface stimulée, ou l'utilisation des systèmes de feux de signalisation, réduisent nettement la magnitude maximale enregistrée.



Illustr. 18: Magnitude maximale enregistrée en prenant en compte l'effet de traîne. Illustration des histogrammes de 1000 réalisations du modèle Seed stochastique. La limitation de la surface de stimulation, ou l'utilisation de systèmes de feux de signalisation, réduisent nettement la magnitude maximale enregistrée. Les lignes rouges en trait-tillé représentent les quantiles 0.05, 0.5 et 0.95. Le trait bleu représente le plus fort évènement parmi les données de Bâle¹.

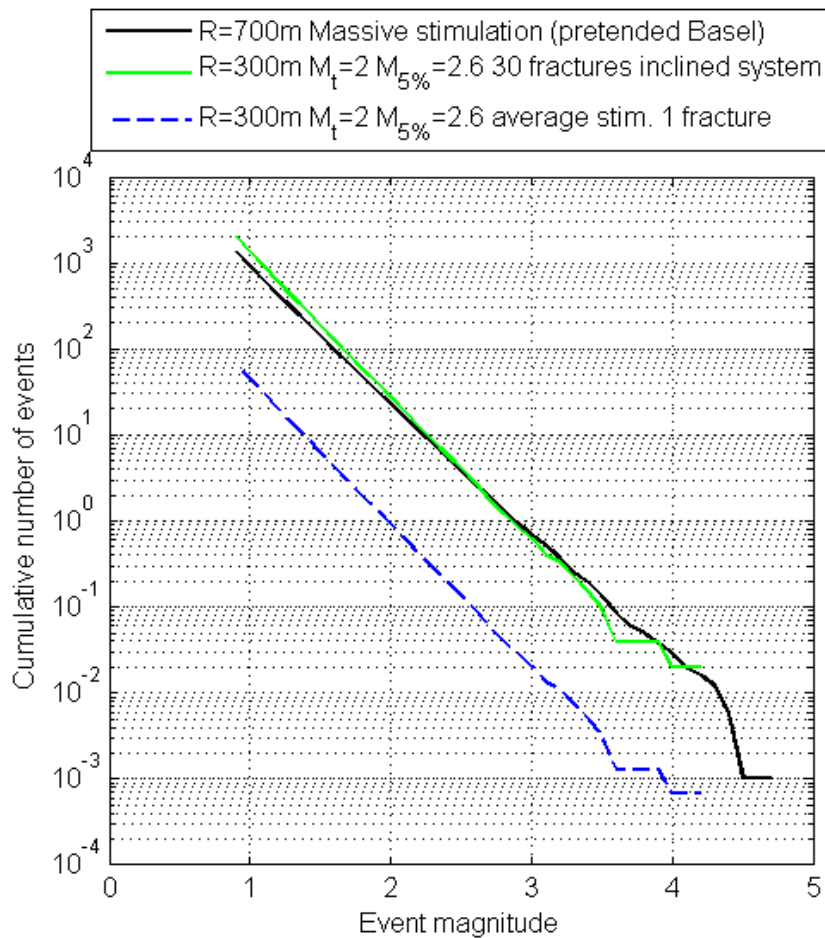
¹ Cette analyse repose sur les données de magnitude de moment du Service sismologique suisse. Il s'agit du set de données complet comprenant des mesures de tous les forages d'observation. La magnitude de moment a dans ce cas été directement déterminée à partir des sismogrammes. Dans le set de données de magnitude de moment M_w , l'évènement le plus fort atteint une magnitude de 3.05. Dans le set de données de magnitudes locales qui se compose principalement des enregistrements s des stations de surface, l'évènement le plus fort atteint une magnitude locale $M_L = 3.4$. Selon la relation de conversion

Dans une seconde étape, une comparaison est effectuée entre la sismicité modélisée pour deux scénarios de réalisation différents. On se base pour ce faire sur des propriétés du sous-sol telles qu'elles ont été observées à Bâle, le sous-sol montre donc une réaction sismique forte.

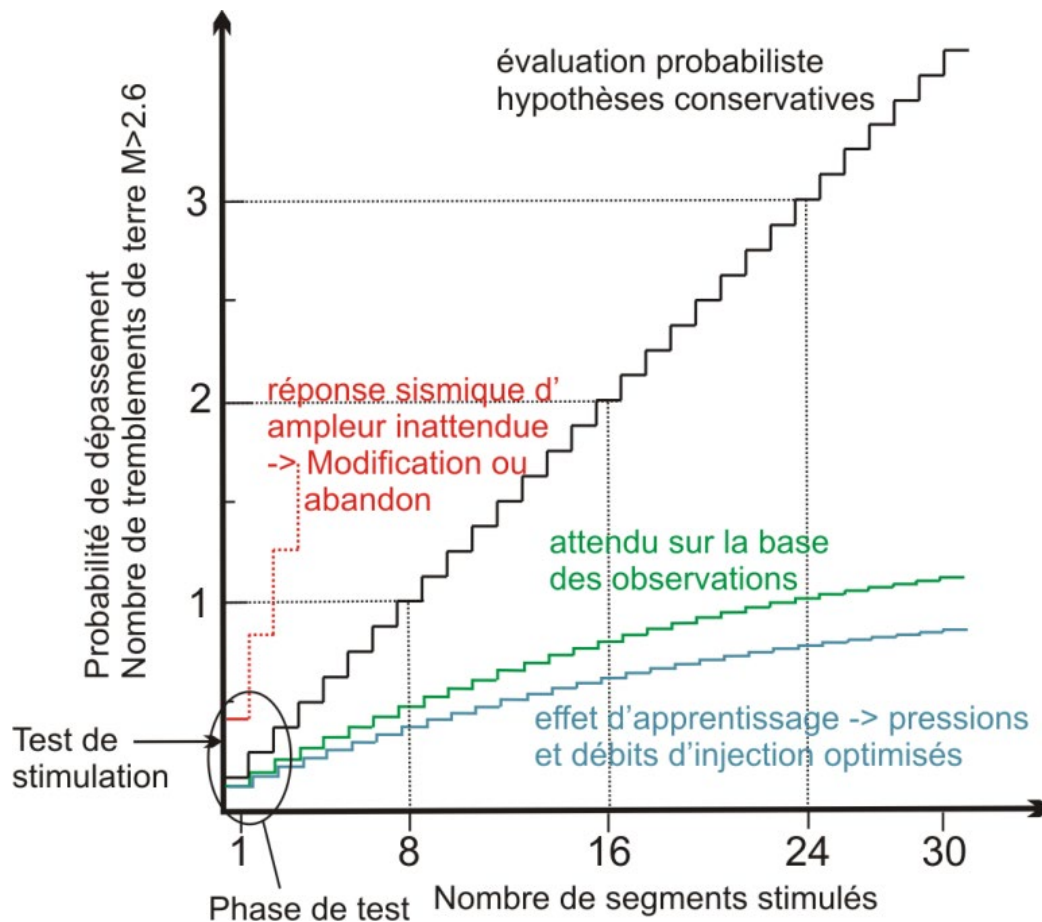
On stimule tout d'abord 30 fissures, comme prévu dans le projet de la société Geo-Energie Suisse SA. Par comparaison, on stimule une unique fissure d'un rayon $R=700$ m telle que le projet de Bâle le prévoyait. L'illustr. 19 montre la distribution de fréquence d'occurrence de magnitudes cumulative pour la fissure unique et pour les 30 fissures du système multi-fractures de la société Geo-Energie Suisse SA. L'effet de traîne a été pris en compte dans les deux calculs. La sismicité pronostiquée est quasiment identique, la surface stimulée totale est toutefois supérieure d'un facteur 3 environ dans le cas du système multi-fractures. Cela est dû aux profils de pression différents pendant le phénomène de traîne. Une influence mutuelle de fractures voisines (Chap. 3.3), conduisant à une réduction supplémentaire de la sismicité induite, n'a pas été prise en compte. Ce phénomène a été observé lors de nombreuses opérations de fracturation hydraulique horizontales pour l'extraction de gaz de schiste (Nagel, 2011). Dans ce cas, le système multi-fractures délivre des résultats encore meilleurs sur le plan sismique.

Le système multi-fractures provoque moins de sismicité

L'analyse de risque probabiliste (E5) montre que l'aléa sismique peut être sensiblement réduit par des mesures de sécurité et par la stimulation de petites surfaces du système multi-fractures en comparaison avec la stimulation massive d'une unique grande fissure. Un pronostic global de l'aléa est cependant difficile à livrer sur la base de l'état actuel des connaissances. Il est représenté sur l'illustr. 19 par la courbe verte. Il s'agit là toutefois d'un pronostic purement théorique. Si, au cours du déroulement du projet, une réaction sismique forte devait être enregistrée, le projet serait modifié ou arrêté (Chap. 6.1). La distribution de la fréquence d'occurrence de magnitudes représentée ne serait par conséquent pas atteinte, en particulier pour des magnitudes relativement fortes ($M_w > 2,6$) (Illustr. 20). Si nécessaire, l'aléa sismique peut être encore réduit par l'utilisation de critères d'arrêt plus stricts, par la stimulation d'un nombre réduit de fissures et éventuellement par l'optimisation des débits, pressions et durées d'injection.



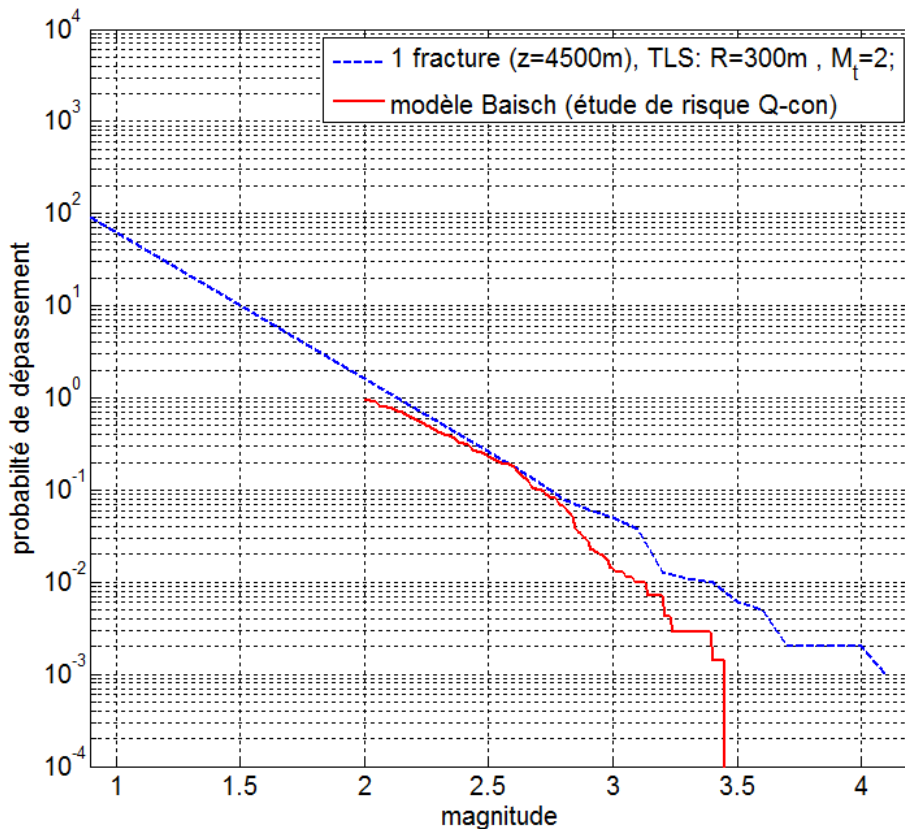
Illustr. 19: En trait-tillé bleu est représenté la distribution cumulative de fréquence d'occurrence de magnitudes pour une fissure unique selon les conditions d'arrêt décrites dans le texte ci-dessus. La courbe verte résulte de la multiplication de la bleue par un facteur 30 et correspond à la fréquence cumulative d'occurrence de magnitudes d'un projet EGS comportant 30 multi-fractures pour un sous-sol présentant une réaction sismique forte comme celle de Bâle. Une réduction des contraintes sur les fractures voisines n'a pas été prise en compte. La distribution représentée est donc très conservatrice. En noir, la distribution cumulative de fréquence d'occurrence de magnitudes pour une fissure unique présentant la même distribution de fréquence d'occurrence mais pour 1/3 uniquement de la surface stimulée.



Illustr. 20: Représentation schématique de l'aléa sismique. Si la stimulation d'une fissure est considérée comme indépendante de celle de la précédente, l'aléa sismique de la première fissure est multiplié par la stimulation de fissures successives selon l'approche probabiliste (courbe noire, représentant la probabilité de dépassement de la magnitude 2.6 dans le cas d'une probabilité de dépassement $p = 0.125$ pour la première fissure. à comparer avec la courbe bleue de la Illustr. 19). Cela signifie qu'il est attendu que la limite des dommages sera franchie une fois lors de la stimulation d'environ 8 fissures successives ; deux fois pour 16 fissure, etc. Dans la réalité, une diminution de la sismicité lors de la stimulation de fissures consécutives est attendue (représenté ici qualitativement par la courbe verte). Ce phénomène a été observé lors de nombreuses opérations de fracturation hydraulique horizontales pour l'extraction de gaz de schiste (Nagel, 2011). Qui plus est, un effet d'apprentissage peut être pris en compte pour les stimulations successives (représenté qualitativement par la courbe bleue). Si une réaction sismique particulièrement forte devait par exemple être enregistrée durant le test de stimulation, les opérations pourraient être modifiées, voire arrêtées (représenté qualitativement par la courbe rouge). Cela signifie que l'aléa pour le projet global demeure bas malgré un danger initial élevé pronostiqué sur la base d'hypothèses conservatives.

Si l'on compare l'approche stochastique de l'étude de risque Q-con, appelée ci-après approche Baisch, (Chap. 4.1, calculé pour le cas où la valeur de seuil « rouge » devait être atteinte) avec les résultats du modèle Seed du Service sismologique suisse, on obtient des probabilités de dépassement comparables dans la plage de magnitude comprise

entre 2 et 3 (Illustr. 21). Pour des magnitudes plus importantes, la distribution de fréquence d'occurrence de magnitudes de l'approche Baisch chute fortement. Cette chute brutale de la distribution de fréquence d'occurrence est également observée dans la nature et implique des probabilités d'occurrence considérablement plus faibles pour des séismes importants. Dans le modèle Seed, on réalise une extrapolation linéaire jusqu'à des magnitudes importantes, indépendamment des conditions physiques. Le modèle Seed représente ainsi une estimation extrêmement conservatrice de la sismicité attendue.



Illustr. 21 : Comparaison de la distribution cumulative des magnitudes selon l'approche Baisch, en rouge (Chap. 4.1) et des résultats du modèle Seed, en bleu (une fissure stimulée à une profondeur $z=4500\text{m}$, arrêt du système de feux de circulation [TLS] pour un rayon stimulé $R=300\text{m}$, magnitude d'arrêt $M_t=2$). Dans la zone de la limite des dommages matériels, les deux approches fournissent des résultats comparables.

5. Evaluation de l'aléa et bilan:

Pour l'étude de risque sismique, les valeurs limites de la norme allemande DIN, plus strictes que celles de la norme suisse, ont été considérées pour la détermination du niveau maximal de vibration au-dessous duquel aucun dommage aux bâtiments n'est à attendre. La magnitude correspondant à la limite des dommages matériels a été déterminée sur cette base à $M_w=2,6$. Il s'agira ainsi de garantir que cette limite ne sera pas dépassée.

Une analyse de la sismicité naturelle dans la région par le Service sismologique suisse a permis de conclure à l'absence de zones de failles actives dans le rayon d'influence du projet. Les zones de failles connues dans la région entourant le projet ne seront influencées que de manière insignifiante par la réalisation du réservoir souterrain ainsi que par le refroidissement thermique du sous-sol pendant la durée de l'exploitation. La probabilité de déclencher des séismes en dehors du réservoir souterrain est donc estimée comme étant très faible. Dans le cas où une zone de failles inconnue à l'heure actuelle, et qui se trouverait à proximité du réservoir souterrain, était malgré tout influencée par le projet, le système de surveillance sismique (plan de réaction, feux de signalisation) interrompra l'injection d'eau et empêchera ainsi la sismicité d'augmenter davantage.

L'apparition et l'intensité de la sismicité induite dépendent principalement de la réponse sismique du sous-sol qui est encore largement inconnue à l'heure actuelle. En cas de forte réponse sismique, le système de feux de signalisation permet d'empêcher que des secousses trop importantes ne surviennent. Toutefois, cela peut éventuellement avoir pour conséquence l'arrêt de la stimulation avant que le réservoir n'ait atteint une taille suffisante (dimension des fissures) pour assurer la rentabilité de l'exploitation. A l'opposé, en cas de réponse sismique faible, il est possible de réaliser des surfaces d'échange de chaleur (fissures) bien plus grandes que prévues à l'origine, sans causer de sismicité qui s'approcherait de la limite des dommages matériels. Néanmoins, on ne peut exclure dans les deux cas que ne survienne une sismicité qui puisse être ressentie par la population ou perçue sur le plan acoustique.

L'étude montre qu'il est avantageux, plutôt que de créer une grande surface d'échange de chaleur, de stimuler le sous-sol sous la forme de plusieurs fissures plus petites. Etant donné que, d'après les données d'observation provenant de projets du monde entier, la magnitude sismique maximale observée augmente proportionnellement avec la surface stimulée dans le sous-sol, une stimulation contrôlée permet également de contrôler la sismicité. Lorsque la surface stimulée est petite, la magnitude et ainsi les effets à la surface restent faibles. En outre, il s'avère que l'aléa sismique diminue lors de la stimulation de fissures successives. L'aléa sismique n'augmente ainsi pas simplement de manière proportionnelle au nombre de fissures stimulées.

L'étude de risque se base sur la méthodologie déterministe de la société Q-con, société qui avait mené l'analyse de risque du projet de Bâle qui a finalement mené à son abandon. Cette étude montre que le déclenchement d'un séisme dommageable peut être quasiment exclu moyennant des mesures appropriées. Toutefois, le projet ne présente pas un risque nul. Il est théoriquement envisageable de rencontrer dans le sous-sol une faille supercritique non identifiée à faible distance du réservoir. Dans ce cas, une faible modification des conditions du sous-sol pourrait causer des dommages à la surface. Il en va de même pour d'autres travaux souterrains, tels que par exemple la

construction de tunnels. De telles considérations sont regroupées sous la notion de risque résiduel. Pour cette raison, en plus de l'approche déterministe de la société Q-con, le risque résiduel est évalué au moyen d'une étude de risque probabiliste. L'analyse de risque probabiliste repose sur une méthodologie développée par le Service sismologique suisse.

Autant l'étude probabiliste que l'étude de risque déterministe montre qu'un système « multi-fractures » permet de réduire l'aléa sismique par rapport à une stimulation massive telle que celle effectuée à Bâle. Pour un aléa identique, ce procédé permet de stimuler une surface d'échange de chaleur au moins trois fois plus grande.

L'étude probabiliste et l'étude déterministe permettent de représenter l'ampleur de la sismicité attendue. Etant donné que dans les deux études, la sismicité observée se base surtout sur les données de Bâle, les deux études montrent également des résultats comparables dans la plage de magnitudes correspondante. Pour des magnitudes supérieures à $M_w=3,2$, on relève toutefois de grandes différences. A titre d'exemple, considérons un séisme de magnitude $M_w=4$. Dans l'étude de risque déterministe, la probabilité d'un tel séisme est nulle car un tel événement, pour une réponse sismique du sous-sol comparable à celle de Bâle, ne peut physiquement pas se produire pour des surfaces d'échange de chaleur de la dimension de celles envisagées avec le système « multi-fractures ». L'étude de risque probabiliste donne quant à elle une probabilité de dépassement de cette magnitude de 1:3000 pour une fissure simple de 300 m (ou env. de 1:100 pour un système multi-fractures de 30 fissures de 300 m), toutefois selon des hypothèses très conservatives.

En géothermie, on ne dispose pas à l'échelle mondiale de données suffisantes pour vérifier les prévisions statistiques du modèle Seed. Toutefois, des opérations hydrauliques comparables sont réalisées depuis des décennies dans des réservoirs d'hydrocarbures («Fracking»). Les données qui y sont associées sont suffisamment importantes pour permettre de réaliser une vérification statistique. A l'échelle mondiale, env. 2,5 millions d'opérations de fracking ont déjà été réalisées à l'heure actuelle (King, 2012), sans jamais déclencher aucun séisme de magnitude $M_w=4,0$. A partir de ces observations, on peut conclure que la fréquence d'occurrence d'un séisme de magnitude $M_w \geq 4,0$ causé par des opérations de fracking est inférieure à $4 \cdot 10^{-7}$. Manifestement, aucune des opérations de fracking n'a jamais activé de faille supercritique.

Il convient de noter que la plupart des opérations de fracking mentionnées ont été réalisées dans les couches sédimentaires. En raison des propriétés rhéologiques de la roche, on y observe une sismicité induite moins forte que dans le socle cristallin. Toutefois, il n'y a aucune raison de supposer qu'une faille supercritique ne puisse s'étendre que dans le socle. On peut donc admettre que les failles supercritiques – si elles devaient exister – seraient également sismiquement activées dans les couches sédimentaires. Or, une telle activation n'a encore jamais été observée.

Au final, c'est le projet lui-même qui fournira des informations fiables sur la réaction sismique du sous-sol. C'est pourquoi il est important de procéder pas à pas et avec précaution. Les mesures présentées ci-après démontrent cette approche.

6. Mesures de protection et de contrôle

6.1. Adaptation de l'étude de risque au cours du projet

Etant donné que l'on ne peut exclure avec une absolue certitude que les conditions dans le sous-sol sur le site de Haute-Sorne puissent différer de l'expérience acquise jusqu'à aujourd'hui, il convient de confirmer la validité de l'étude de risque avec des collectes de données continues tout au long du projet. Il conviendra alors de vérifier si les paramètres pertinents en termes de risque sismique se trouvent bien dans la plage prise en considération dans ce document.

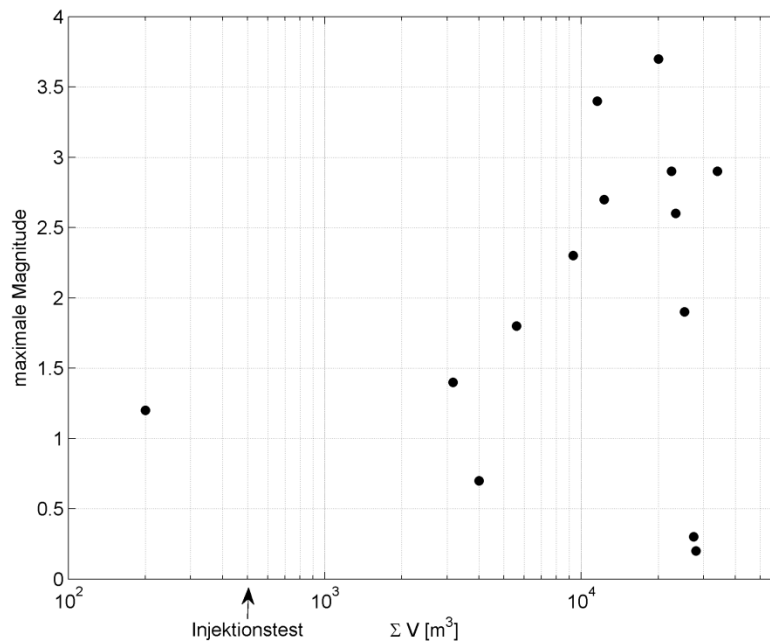
Le rapport d'expertise (E4) mentionne des critères qui, après leur apparition, requièrent un contrôle, voire un ajustement, de certains aspects donnés de l'étude de risque. En outre, il peut être nécessaire, selon le déroulement du projet, de réaliser des contrôles à d'autres moments. Ces moments sont définis dans le cadre de l'expertise de suivi du projet.

6.2. Réalisation d'un test de stimulation

Pour l'évaluation des risques, il est particulièrement important de réaliser un test de la réaction sismique de la roche du réservoir en réponse à une stimulation hydraulique. Seul ce test permettra de déterminer les propriétés essentielles du sous-sol en termes de possibilités de stimulation et d'aléa sismique. Le test de stimulation permet en outre d'étalonner la magnitude utilisée dans cette étude en fonction de la magnitude locale communiquée par le Service sismologique suisse. Le test de stimulation représente ainsi une étape importante dans l'ajustement de l'étude de risque au cours du projet.

La société Geo-Energie Suisse SA prévoit de réaliser un test de stimulation hydraulique avant la réalisation de la section inclinée du premier forage. En termes de risque sismique, il est important de réaliser ce test dans des conditions particulièrement contrôlées et avec un petit volume d'injection initial qui est ensuite graduellement augmenté durant le test.

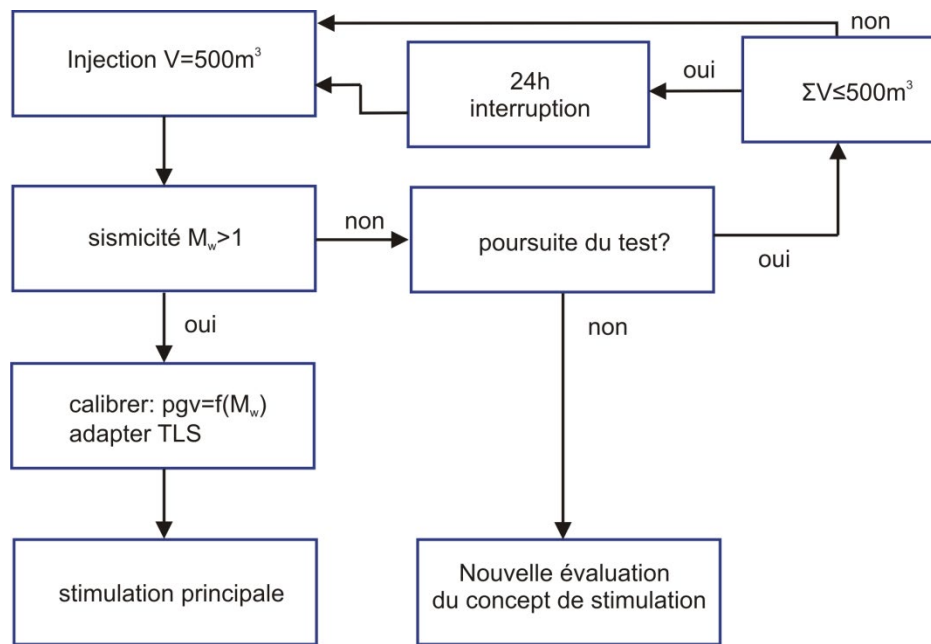
L'illustr. 22 présente des magnitudes sismiques maximales observées en fonction du volume de liquide injecté. Les séismes potentiellement dommageables ne se sont jusqu'à présent déclenchés qu'en présence de volumes d'injection supérieurs à 10 000 m³. Sur la base de ces données d'observation, le volume d'injection du test de stimulation est tout d'abord fixé à 500 m³.



Illustr. 22 : Magnitude sismique maximale observée en fonction du volume injecté pour les données fournies par Baisch et al. (2009; AP3000). Des séismes potentiellement dommageables ne se sont déclenchés qu'en présence de volumes d'injection supérieurs à 10 000 m³.²

L'illustr. 23 montre le déroulement du test qui doit également être contrôlé par le système de feux de signalisation, conformément au chapitre 6.3. Si l'injection d'un volume de 500 m³ ne déclenche aucune sismicité notable, on augmente le volume d'injection de façon incrémentale par étapes de 500 m³, jusqu'au déclenchement d'un séisme de magnitude $M_w > 1$ (Illustr. 23). Un séisme de cette intensité est considéré comme nécessaire pour réaliser un premier étalonnage de l'échelle de magnitude utilisée et pour pouvoir ajuster en conséquence les valeurs de seuil du système de feux de signalisation. On détermine alors, à l'aide des données d'observation, à partir de quelle magnitude un séisme de réservoir atteint la limite de perceptibilité (0,3 mm/s) ou le seuil de dommages matériels (Chap. 3.2).

² On relèvera qu'au cours des opérations de contrôle d'une venue de gaz sur le site géothermique de St-Gall, un tremblement de terre de $M_L=3.5$ ($M_w=3.3$) est survenu. Dans le but de stopper cette venue de gaz, un volume total d'environ 650 m³ de saumure dense a été injecté. Il n'a toutefois pas été possible d'évaluer à ce jour le volume supplémentaire de fluide qui a pu s'introduire depuis le réservoir vraisemblablement artésien d'eau et de gaz dans la zone de faille sismiquement active. Par conséquent, il n'est, dans l'état actuel des connaissances, pas possible de procéder à une comparaison entre le volume injecté et la magnitude sismique maximale pour ces données.



Illustr. 23 : Organigramme du test de stimulation préliminaire. Le test est réalisé si besoin est en plusieurs étapes, lors desquelles on injecte chaque fois un volume de 500 m³ pour la stimulation. Le test se poursuit jusqu'à ce qu'un séisme de réservoir de magnitude $M_w > 1$ soit enregistré, ou jusqu'à ce que l'on décide que la stimulation n'est pas réalisable sous la forme attendue. Après la première étape de stimulation, le test est interrompu pendant 24 heures afin d'observer l'effet de traîne de la sismicité. L'ensemble du test est en outre surveillé à l'aide du système de feux de signalisation. (TLS = système de feux de circulation, pgv = vitesse maximale de vibration du sol)

6.3. Système de feux de signalisation

Feux de signalisation conventionnels

Les mesures de protection et de contrôle reposent essentiellement sur le schéma de réaction représenté ci-dessous. Celui-ci présuppose une observation et une interprétation en temps réel de la sismicité induite. Le schéma de réaction permet de modifier ou d'arrêter les opérations dans le cas où des séismes viendraient à dépasser des valeurs de seuil prédéfinies.

La principale difficulté lors de la réalisation d'un schéma de réaction réside dans la définition des valeurs de seuil. Outre la valeur de seuil de magnitude critique à partir de laquelle on peut potentiellement s'attendre à des dommages matériels, il est impératif de prendre en compte «l'effet de traîne» (Chap. 1.3). On définit deux valeurs de seuil, «jaune» pour une attention accrue alliée à une modification possible du débit d'injection, et «rouge» pour un arrêt de l'injection avec un relâchement contrôlé de la pression hydraulique (,bleed off').

La détermination de la valeur de seuil s'effectue en fonction de la limite des dommages matériels de $M_w=2,6$ déterminée au chap. 3.2. Afin de prendre en compte l'effet de traîne, on fixe à $M_w=2,0$ la valeur de seuil de magnitude critique à

**Valeur de seuil
rouge $M_w=2,0$**

partir de laquelle il convient de stopper les opérations hydrauliques dans le réservoir (mesures de stimulation ou mode de circulation). En d'autres termes, on soustrait de la magnitude déterminant la limite des dommages matériels le plus grand effet de traîne observé dans les projets EGS (voir l'illustr. 6).

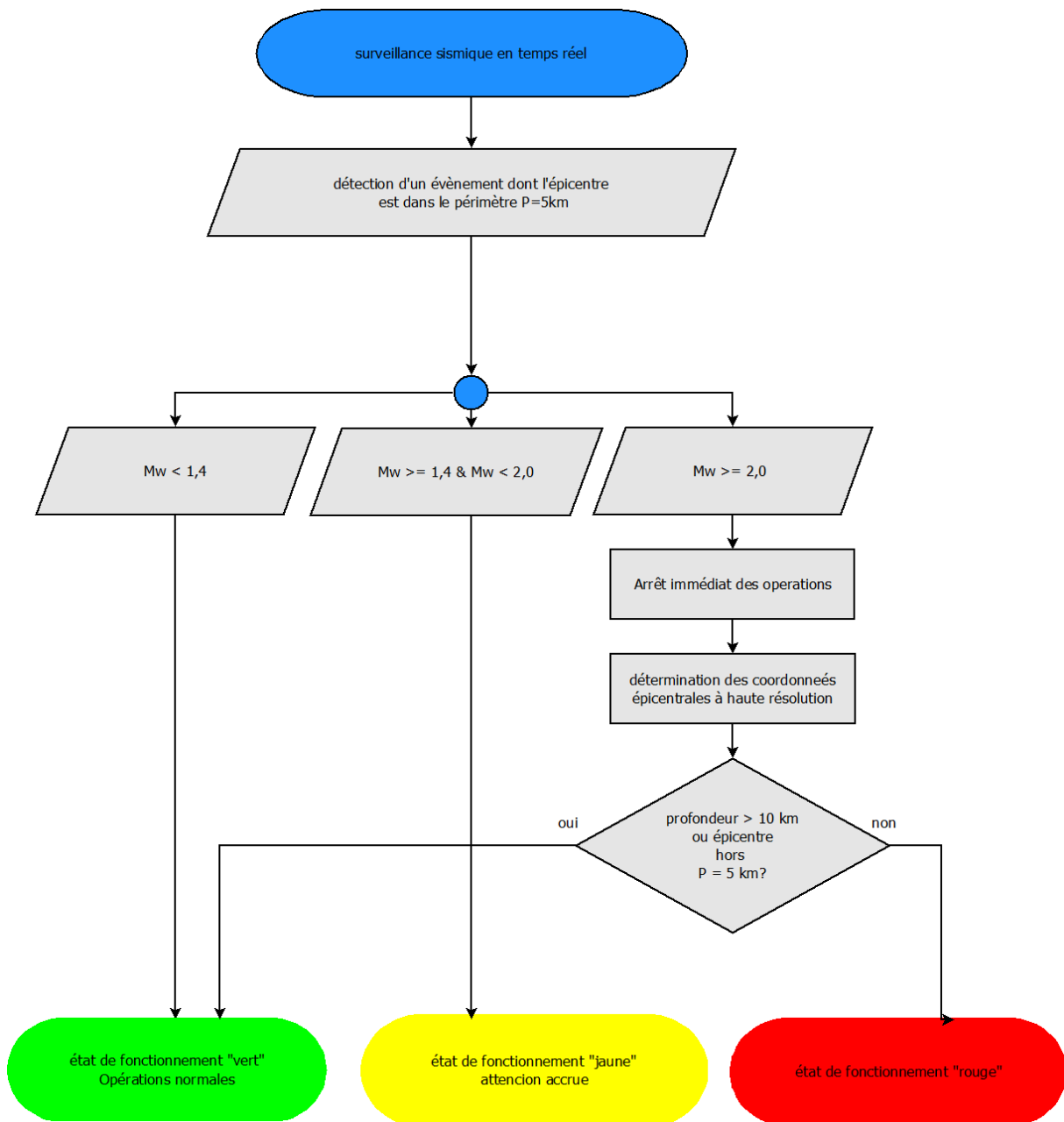
La valeur de seuil pour «jaune» est fixée à $M_w=1,4$. Les modélisations d'ébranlements effectuées selon la méthodologie du chapitre 3.2 montrent qu'un séisme de magnitude $M_w=1,4$ se situe à la limite de la perceptibilité (0,3 mm/s).

**Valeur de seuil
jaune $M_w=1,4$**

Il convient de noter que les valeurs limites du système de feux de signalisation dépendent de détails de l'échelle de magnitude utilisée. Il en résulte un étalonnage de l'échelle de magnitude à l'aide des valeurs d'ébranlements observées, dans le cadre d'un test de stimulation (Chap.6.2).

Etant donné que des localisations de séismes automatiquement déterminées peuvent présenter des imprécisions de localisation relativement importantes, on préconise l'utilisation d'un schéma de réaction pour tous les séismes localisés à une distance de 5 km autour du point de forage.

L'illustr. 24 montre l'organigramme du schéma de réaction, en prenant en compte les valeurs de seuil susmentionnées. Au regard du flux d'informations en cas de dépassement de la valeur de seuil, l'élaboration détaillée du schéma de réaction doit précéder le début du premier test de stimulation. Il convient notamment de s'assurer que l'arrêt des opérations se produit dans les 30 minutes après tout dépassement de la valeur de seuil.



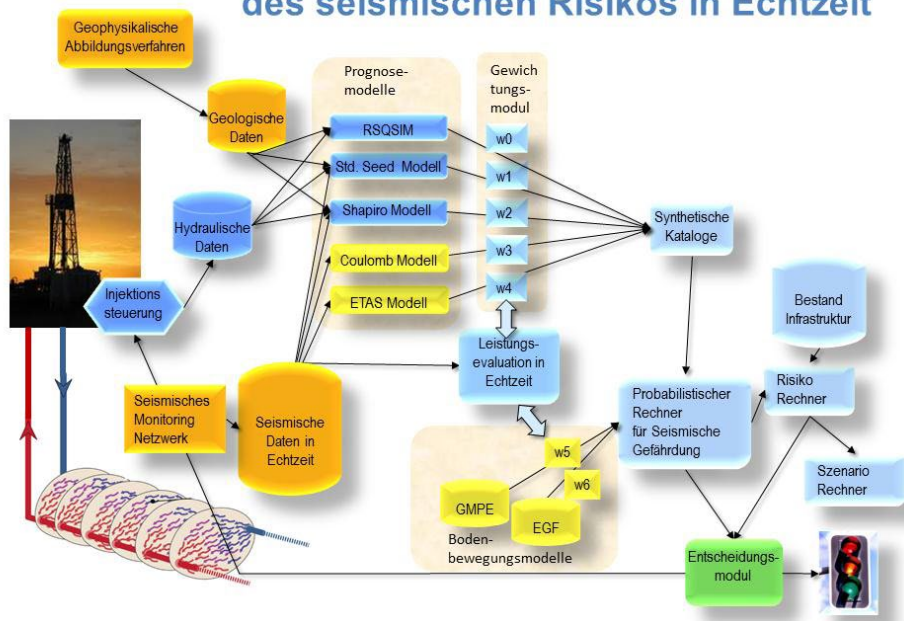
Illustr. 24: Schéma de réaction pour le contrôle de la sismicité induite. Le schéma de réaction doit être appliqué à tous les séismes localisés au sein d'une distance épacentrale de 5 km par rapport au point de forage. Mw désigne la magnitude d'un séisme relevé

Feux de signalisation prédictifs

En plus du système de feux de signalisation présenté plus haut, le Service sismologique suisse collabore avec la société Geo-Energie Suisse SA dans le cadre du projet Geosim, subventionné par l'Office fédéral de l'énergie et l'Office fédéral de l'environnement, pour mettre au point un système de feux de signalisation prédictif («Advanced Traffic Light System», ATLS, Illustr. 25). L'ATLS se base sur une approche probabiliste et est en mesure de prévoir l'intensité de la sismicité induite, à la manière d'une prévision météorologique.

**Projet de
développement
du SED et de Geo-
Energie Suisse SA**

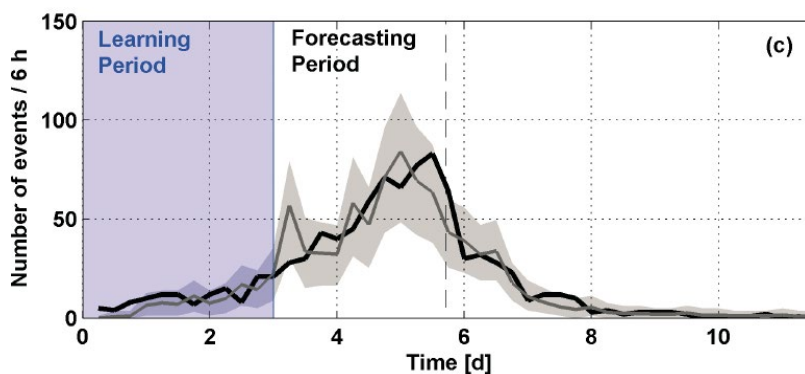
Erweitertes Ampelsystem mit Vorhersage des seismischen Risikos in Echtzeit



Illustr. 25 : Représentation schématique du système de feux de signalisation prédictif, développé par le Service sismologique suisse en collaboration avec la société Geo-Energie Suisse SA.

Si le système de feux de signalisation prédictif est actuellement encore en phase de développement, on a néanmoins déjà pu montrer, à l'aide des données de Bâle, qu'il permettait de prévoir la sismicité future. Dans le cas de Bâle, un jeu de données partiel relevé sur les 3 premiers jours a permis de prévoir la sismicité ultérieure (Gischig & Wiemer, 2013, Illustr. 26).

Preuve théorique de fonctionnalité



Illustr. 26: (Gischig & Wiemer, 2013) Prédiction de la sismicité après une phase d'apprentissage de 3 jours (en bleu): en noir la sismicité effectivement survenue, en gris la sismicité prédite. Les limites de confiance de 95% apparaissent en grisé.

Il est prévu d'exploiter l'ATLS en plus du système de feux de signalisation conventionnel.

Etant donné le caractère pilote de l'ATLS, seul le système de feux de signalisation conventionnel est déterminant pour la sécurité du projet. On prévoit donc d'utiliser les prédictions de l'ATLS et de les regrouper avec d'autres informations (p. ex. pression, débit, etc.) pour la prise de décision sur place.

L'ALS sera probablement exploité par la société Geo-Energie Suisse SA, mais potentiellement également par d'autres organismes, telles que le Service sismologique suisse.

Caractère pilote
Les prédictions ne
sont pas prises en
compte dans les
décisions

6.4. Réseau de monitoring sismique

Dans les directives relatives à la surveillance sismique d'installations géothermiques, des exigences concrètes ont été définies en matière de résolution et de capacité de détection d'événements sismiques (p. ex. «Empfehlungen zur Überwachung induzierter Seismizität - Positionspapier des Forschungskollegiums Physik des Erdkörpers e.V. (FKPE)», Ritter et al., 2012).

Directives
existantes

Les exigences que doit remplir le réseau de monitoring de la société Geo-Energie Suisse AG ont été déterminées conjointement avec le Service sismologique suisse (voir le Tableau 2): L'objectif du monitoring est de couvrir les 4 thèmes suivants:

Exigences
définies avec le
SED

1. Enregistrement de la sismicité naturelle dans l'environnement prévu du réservoir
2. Enregistrement de la sismicité induite comme input pour le système de feux de signalisation conventionnel basé sur des valeurs de seuil (TLS)
3. Enregistrement de la sismicité induite pour déterminer la géométrie du réservoir (propagation des surfaces stimulées)
4. Input pour le système de feux de signalisation prédictif (ATLS)

Critère	Sismicité naturelle	TLS	Ingénierie de réservoir	ATLS
Précision de résolution	Selon FKPE: 500 m latéralement, 2000 m verticalement (2σ)	Minimum FKPE: 500 m latéralement, 2000 m verticalement (2σ)	Modélisations: horizontalement <±140m, verticalement <±250m	Exigences plus faibles que l'ingénierie de réservoir
Magnitude de complétude visée (Mc)	FKPE: ML = 1 (Mw=1.6)	Au minimum ML = 1 (Mw=1.6)	ML= -1 (Mw=0.4)	
Nombre de stations	6 (+1)	6 (+1)	6 (+1)	

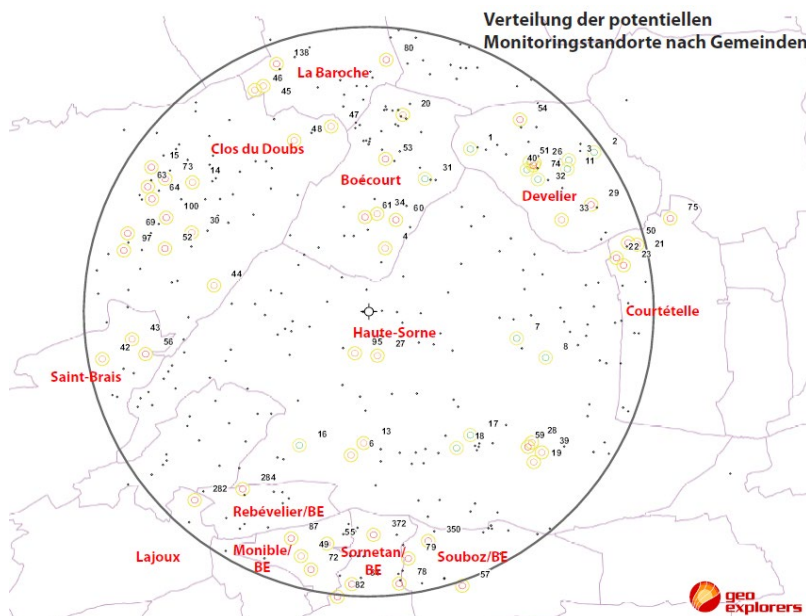
Tableau 2 : Exigences en matière de monitoring sismique

Les exigences que doivent remplir le réseau prévu par la société Geo-Energie Suisse SA résultent des critères d'exigence les plus stricts, qui sont ici donnés par les prescriptions relatives à l'ingénierie de réservoir. Des aspects relatifs à la sécurité peuvent être couverts même avec des exigences plus faibles vis-à-vis du réseau. Pour le système de feux de signalisation conventionnel (TLS), les prescriptions du FKPE sont suffisantes. Pour le système de feux de signalisation prédictif (ATLS), les exigences sont plus faibles que celles de l'ingénierie de réservoir.

TLS: Exigences plus faibles que l'ingénierie de réservoir

La planification comprend au moins 6 sites de monitoring, une station de monitoring se composant en règle générale d'une station de surface et d'un sismomètre de puits de forage en dessous du quaternaire (profondeur 30 – 300 m).

Au moins 6 sites



Illustr. 27 Carte des sites de monitoring potentiels autour du projet. Parmi ceux-ci, les 6 sites les plus appropriés seront sélectionnés.

Si durant les mesures test réalisées au préalable, des sites s'avéraient exceptionnellement calmes (faible bruit sismique), on peut renoncer au capteur de puits de forage. Dans ce cas, une station de surface est suffisante. On prévoit de débiter l'exploitation des stations environ 6 mois avant le début de la phase de stimulation. La précision de résolution et la magnitude de complétude (M_c) ont été modélisées en amont pour différentes géométries de stations (rapport d'expertise E4). La précision de résolution s'élève horizontalement à $\pm 140m$ et verticalement à $\pm 250m$. M_c s'élève à $M_w=0,4$. Les exigences (500 m latéralement, 2000 m verticalement, $M_c=M_w=1,6$) pour le fonctionnement des feux de signalisation et pour la sécurité du projet sont ainsi satisfaites.

Début du monitoring env. 6 mois avant la stimulation

Concept d'exploitation

L'exploitation du réseau se divise en quatre phases:

a) Pré-stimulation

Cette phase débute environ 6 mois avant le forage et la stimulation. L'objectif est de montrer l'opérationnalité de l'ensemble du réseau sur une période relativement longue. Si des problèmes techniques imprévisibles surviennent, on dispose ainsi de suffisamment de temps pour les résoudre. Les données sont transmises en temps réel, afin de vérifier la fiabilité du transfert de données et de contrôler toutes les interfaces dans le centre de traitement. L'interprétation, quant à elle, ne se déroule pas en temps réel. La sismicité naturelle peut être exploitée, ce qui permet le cas échéant, en collaboration avec le SED, de déduire, à l'aide des capteurs de surface et de puits de forage, un rapport entre ML (SED) et Mw (GES). Pendant cette période on réalise les derniers étalonnages du réseau (caractérisation de sources de bruit connues, définition des seuils de déclenchement, modifications du modèle de vitesse, détermination des corrections statiques des stations, accord avec le SED) et on forme le personnel qui doit être employé dans les phases suivantes.

b) Phase de forage et de stimulation

Pendant la phase de forage, la priorité est donnée à l'observation des événements microsismiques. Plus tard, avec le début de la phase de stimulation, on passe à une surveillance en temps réel, et le centre de traitement est occupé 24 heures sur 24 afin de garantir les règles de sécurité (TLS). En outre, un logiciel approprié permet de réaliser un regroupement de données (clustering) périodique (quasiment en temps réel). Au sein de ces groupes de données (clusters), les événements sont localisés relativement, de sorte que la précision des événements enregistrés s'en trouve augmentée.

c) Phase d'exploitation (post-stimulation)

Dans cette phase, la surveillance est conçue pour une exploitation à long terme et l'examen des données s'effectue de façon régulière. Le réseau est maintenu. Selon l'activité sismique pendant la phase d'exploitation, il convient de vérifier si les stations peuvent être démantelées par étapes. Toutefois, dans cette phase, le réseau doit répondre à chaque instant aux directives FKPE.

d) Après la fin de la période d'exploitation

Une fois la période d'exploitation arrivée à terme, c'est-à-dire après la fin des mesures hydrauliques dans le réservoir géothermique, le monitoring doit être poursuivi jusqu'à ce que la sismicité du réservoir ait baissé de façon avérée. Le critère déterminant est le suivant: sur une période d'un an, aucun séisme d'une magnitude $M_L > 0$ ($M_w > 1$) ne doit être relevé au sein d'un périmètre de 5 km autour du point de forage. Le monitoring après la fin de la phase d'exploitation ne doit plus nécessairement s'effectuer en temps réel.

La société Geo-Energie Suisse SA attache une importance toute particulière à la transparence des données de mesure. Sismogrammes enregistrés sont communiqués aux autorités et au Service sismologique suisse. La magnitude et la localisation des séismes qui dépassent la limite de perceptibilité de 0,3 mm/s sont accessibles à tout un chacun et sont publiées en temps réel (traitement automatique) sur un site Internet dédié au projet et via les pages Internet du SED.

**Transparence:
Publication des
séismes en
temps réel**

6.5. Mesures de remplacement à la suite de dommages

Etablissement des preuves et règlement des sinistres

La société Geo-Energie Suisse SA prend toutes les mesures nécessaires pour réduire au minimum, autant que cela est techniquement possible, le risque d'ébranlement et prévoit une marge de sécurité adaptée pour les immissions d'ébranlements susceptibles de causer des dommages. Comme le montrent les expériences des projets de Bâle et de St-Gall, on ne peut toutefois exclure avec certitude que des ébranlements dommageables se produiront. Au sens de la jurisprudence, on se référera pour l'établissement des preuves à la norme d'ébranlement suisse SN 640 312a.

Dans le cas où, malgré les mesures mises en œuvre, des ébranlements dommageables devaient se produire, le maître d'ouvrage a développé un concept d'établissement des preuves. L'objectif prioritaire du concept est de favoriser un règlement rapide du sinistre en cas d'apparition de dommages. La population doit être informée suffisamment tôt et de manière transparente sur la procédure à suivre en cas d'ébranlements dommageables causés par le projet. La direction du projet considère l'établissement des preuves comme un élément de l'information proactive et de la communication.

Le concept d'établissement des preuves met l'accent sur la thématique des immissions sur les bâtiments et les installations de production. Dans ce contexte, les ébranlements résultant de la réalisation et de l'exploitation du projet de géothermie sont au premier plan. Etant donné que, si l'on se base sur les ébranlements attendus dans le pire des scénarios, on ne s'attend à aucun dommage sur les conduites enterrées et les infrastructures de transport (routes, voies ferrées), ces installations ne sont pas abordées ici.

Le concept d'établissement des preuves se base sur les trois scénarios suivants:

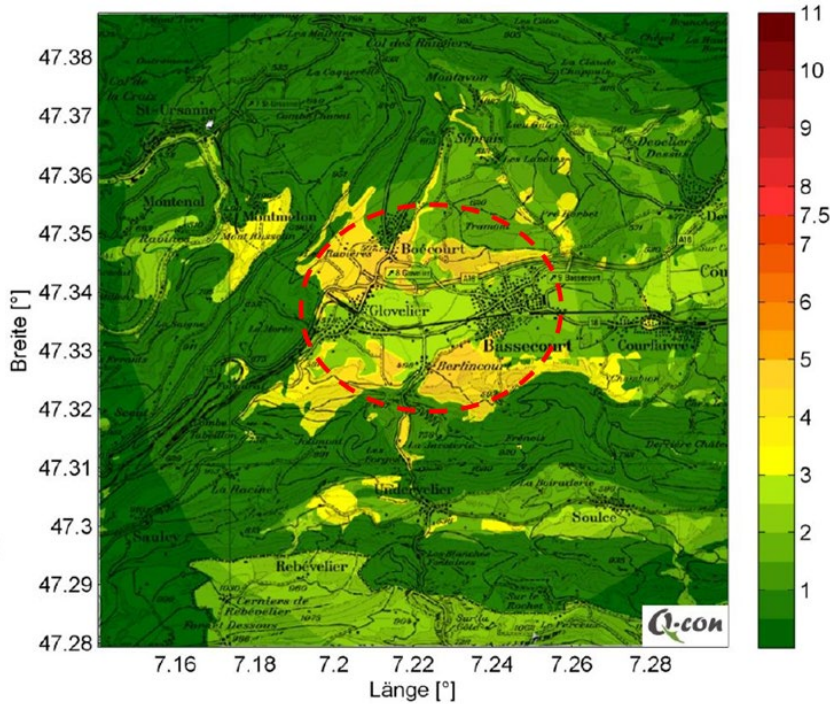
- *Scénario 1: Prévisions respectées ($V_{max} \leq 3$ mm/s):* Si ces immissions sont certes nettement perceptibles pour l'homme, il est quasi-totalement exclu qu'elles provoquent des dommages sur des bâtiments. De même, on n'attend aucune perturbation des processus de production en présence d'immissions conformes au scénario 1.
- *Scénario 2: Faible dépassement des prévisions (jusqu'à 100%, c.-à-d. $V_{max} \leq 6$ mm/s):* La valeur maximale étant inférieure à la valeur indicative de la norme suisse 640 312a pour les ouvrages hautement sensibles (7,5 mm/s), il est donc peu probable d'observer même des dommages infimes sur de tels bâtiments. En ce qui concerne les perturbations des processus de production, l'affirmation correspondant au scénario 1 s'applique de façon légèrement affaiblie.
- *Scénario 3: Dépassement considérable des prévisions (jusqu'à 300%, c.-à-d. $V_{max} \leq 12$ mm/s):* La valeur indicative de précaution pour les ouvrages hautement sensibles ($V_{max} \leq 7,5$ mm/s) est atteinte ou est dépassé jusqu'à environ 60%. La probabilité de dommages et donc légèrement à considérablement accrue. La valeur indicative pour les ouvrages de sensibilité normale (15 mm/s pour des événements occasionnels et une fréquence de 8-10 Hz) n'est pas atteinte. Bien qu'un tel événement soit nettement perceptible par l'homme, seuls les bâtiments

**Procédure
transparente**

**Règlement
rapide des
dommages**

hautement sensibles courent un risque élevé de dommages.

l'établissement des preuves couvre, sur la base des explications ci-dessus, le périmètre (Illustr. 28) englobant les communes de Boécourt et Haute-Sorne (localités: Glovelier, Berlincourt et Bassecourt). Ce périmètre comprend environ 1500 – 1600 bâtiments.

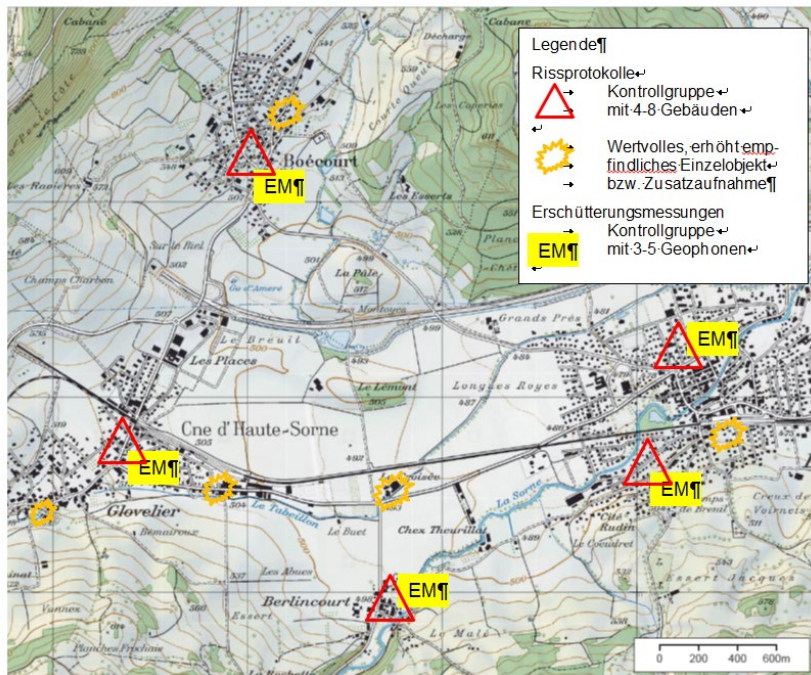


Illustr. 28 : Périmètre de l'établissement des preuves (rouge) superposé avec la vitesse de vibration du sol modélisée (mm/s) pour un séisme induit de magnitude $M_w=2,6$.

**protocoles de
fissures**

Dans le cadre de l'établissement des preuves, il est prévu de réaliser, avant le début des travaux, des protocoles de fissures sur 5 groupes de contrôle (comprenant chacun 6 à 8 bâtiments différents) répartis sur tout le périmètre. Après la première stimulation, des contrôles intermédiaires sont réalisés sur la moitié des bâtiments. Parallèlement, il est prévu, pour ces groupes de bâtiments, une surveillance permanente des ébranlements. Pour chaque groupe de bâtiments, 4 à 6 bâtiments seront surveillés au moyen de géophones (Illustr. 29).

**Surveillance
permanente des
ébranlements**



Illustr. 29 : Aperçu schématique des mesures d'établissement des preuves : Les triangles rouges représentent les groupes de contrôle comprenant 4 à 8 bâtiments représentatifs et les cercles orange représentent des objets individuels de valeur ou de sensibilité particulière pour lesquels des protocoles de fissure seront établis ; les balises jaunes EM indiquent les groupes de contrôle pour lesquels des mesures de vibrations seront effectuées au moyen de 3 à 5 géophones.

A proximité du site de forage, des bâtiments individuels sont en outre documentés au moyen de protocoles de fissures.

Etant donné que, sur la base des scénarios définis, on pourrait s'attendre à des dommages tout au plus sur les bâtiments les plus sensibles, il est prévu, en plus des enregistrements susmentionnés, de réaliser protocoles de fissures sur les façades et parfois même à l'intérieur des bâtiments présentant une «sensibilité accrue et une grande valeur». Ces bâtiments seront déterminés en accord avec les autorités et en s'appuyant sur l'inventaire des biens culturels d'importance nationale (liste A) et régionale (liste B). Sur la base des explications ci-dessus, il est prévu de documenter également avec des protocoles de fissures les bâtiments suivants situés en dehors du périmètre restreint:

- Collège, cloître et église St-Pierre (St-Ursanne, Clos du Doubs)
- Eglise St-Germain-d'Auxerre (Courfaivre, Haute-Sorne)

Les éventuels dommages sur des bâtiments non documentés sont évalués par une procédure d'analogie sur la base des relevés effectués sur les cinq groupes de contrôle (total 35 à 40 bâtiments). La procédure d'analogie comprend les étapes suivantes:

1. Vérification si le projet, dans la période concernée, a causé des ébranlements notables (en fonction des relevés d'environ 25 géophones de la surveillance permanente).
2. Evaluation de l'aspect optique et estimation de l'ancienneté du dommage (notamment pour les fissures).

Bâtiments particuliers pris en compte

3. Vérification si des modifications doivent être constatées sur les bâtiments ayant fait l'objet de protocoles de fissures.
4. Demande d'études complémentaires pour la détermination de l'âge des fissures, par exemple analyse des pollens.

Pour relever également les éventuelles perturbations de processus de production sensibles aux vibrations, une liste des entreprises susceptibles de mettre en œuvre des processus sensibles aux vibrations sera établie, et le potentiel de dommages sera établi en amont.

Dans le concept d'établissement des preuves, on définit l'organisation (y c. l'interlocuteur) et tout particulièrement également la procédure à suivre en cas de dommages et/ou de réclamations. La médiation et l'accès aux informations autour de l'établissement des preuves sont mis à disposition par le site Internet du projet et par un magazine dédié au projet.

Le règlement de l'établissement des preuves est prévu sur une base extrajudiciaire. Il est prévu de faire valider les protocoles de fissures par un notaire.

L'établissement des preuves a été élaboré avec le suivi d'un groupe d'accompagnement comprenant des représentants des autorités cantonales et des communes.

Pour la compensation des dommages, la société Geo-Energie Suisse SA souscrit une assurance. Si des dommages devaient être causés, leur compensation est ainsi dans tous les cas garantie.

7. Excursus: Le projet de géothermie de Bâle

1. Comparaison avec le projet DHM de Bâle

Le projet DHM de Bâle représente la première tentative suisse de réaliser un système géothermique selon le procédé EGS (Häring et al., 2008). Après réalisation du premier forage profond, une stimulation hydraulique a été effectuée, mais a dû être arrêtée prématurément en raison de la sismicité induite. Immédiatement après la fin de la stimulation, un séisme exceptionnellement fort, de magnitude $M_w=3.2$ ($M_L=3.4$), s'est produit et a causé des dommages non structurels légers. Ceux-ci ont été couverts par l'assurance à hauteur de 7 millions de CHF (étude SERIANEX, Baisch et al., 2009).

Pour contrôler la sismicité induite, un schéma de réaction (feux de signalisation) a été utilisé pendant la stimulation. Toutefois, l'effet de traîne n'avait pas été pris en compte lors de la détermination des valeurs de seuil. Ainsi, le critère d'arrêt défini était la détection d'un séisme de magnitude $M_L>2.9$ ou $PGV>5\text{mm/s}$. La stimulation a pourtant été arrêtée avant ces valeurs limites, après l'apparition d'un séisme de magnitude $M_L=2.6$ ($M_w=2.6$) (Häring et al., 2008). Quelques heures après, en raison de l'effet de traîne, s'en est ensuivi un séisme de magnitude $M_L=3.4$ ($M_w=3.2$). La vitesse maximale de vibration du sol mesurée s'est élevée, pour ce séisme, à environ 13 mm/s (Aegerter & Bosshardt, 2007).

A la suite de cela, le canton de Bâle a mandaté une étude pour l'investigation des incidents et la quantification du risque sismique lié au projet de géothermie (étude SERIANEX, Baisch et al., 2009). Cette étude SERIANEX a recommandé de ne pas poursuivre le projet DHM de Bâle en raison du risque sismique. En effet, les conditions géologiques sur le site de Bâle, combinées à la grande densité de population, présentaient un risque de dommages matériels excessivement élevé pour la poursuite du projet. Dans la phase de réalisation, jusqu'à 9 séismes dommageables auraient dû être envisagés, atteignant, voire dépassant, l'intensité du séisme de magnitude $M_w=3.2$.

En cas de secousses malgré tout dommageables, l'ampleur des dommages attendue en Haute-Sorne serait inférieure à celle de la région de Bâle-Ville en raison de la plus faible densité de population. Pour le scénario de dommages simulé avec un séisme de magnitude $M_w=3.2$, on obtient une somme de dommages de 710'000 CHF ce qui représente un dixième environ des 7 millions de CHF de compensation versés pour le site de Bâle. En ce qui concerne le risque sismique, la différence la plus importante entre le projet prévu en Haute-Sorne et le projet DHM de Bâle réside dans la définition des valeurs de seuil visant à limiter la sismicité via un schéma de réaction (voir le chapitre 6.3). En prenant en compte de façon explicite l'effet de traîne et avec des hypothèses conservatives, on définit pour la Haute-Sorne une valeur de magnitude critique de $M_w=2.0$ pour l'arrêt des opérations. Cette valeur de seuil est nettement inférieure à la valeur de seuil de $M_w=2.8$ ($M_L=2.9$) utilisée dans le projet DHM de Bâle. Sur la base du schéma de réaction, on peut tabler en Haute-Sorne sur des secousses maximales plus faibles d'un ordre de grandeur que les valeurs des secousses provoquées par le projet DHM de Bâle.

Les expériences collectées dans le projet DHM de Bâle, conjointement avec les dernières découvertes de la recherche et de la science, ont permis d'élaborer le nouveau projet multi-fractures de la société Geo-Energie Suisse SA pour un site en Haute-Sorne. Les principales caractéristiques de différenciation entre le projet prévu en Haute-Sorne et celui de Bâle sont résumées dans le tableau ci-dessous.

	Haute-Sorne	DHM Bâle
Limite des dommages (pour la catégorie de bâtiments la plus sensible)	$M_w=2,6$	Estimé $M_w=2,6$ Survenu $M_w=3.2$
Géométrie	Multi-fractures (env. 30 fissures stimulées plus petites) Probabilité d'occurrence plus élevée, mais magnitudes plus faibles en dessous de la limite des dommages matériels	Fracture unique stimulée de grande dimension dommages sismiques, autres séismes dommageables attendus en cas de poursuite
Dommages pour un séisme $M_w=3.2$	710'000 CHF (scénario hypothétique)	7 millions de CHF de compensation pour les dommages
Mouvement du sol	Arrêt de l'injection à 1.1mm/s ($M_w=2.0$) Valeurs pour la catégorie de bâtiments la moins favorable	Mesuré 13 mm/s
Zone d'aléa sismique selon la norme SIA 261	1 (faible)	3 (élevé)
Risque sismique	faible	élevé
Contrôle de la sismicité induite	Système de feux de signalisation amélioré avec prise en compte de l'effet de traîne et valeurs de seuil plus basses	Système de feux de signalisation «classique» sans prise en compte de l'effet de traîne, valeurs de seuil trop élevées

Tableau 3 : Comparaison entre le nouveau système multi-fractures de la société Geo-Energie Suisse SA en Haute-Sorne et le projet DHM de Bâle.

Bibliographie

- Aegerter, A. & O. Bosshardt, 2007. Schadenfälle, Erdbeben vom 08.12.2006, Perimeterdefinition. Technischer Bericht vom 13.7.2007 an Geopower Basel AG, 21 Seiten.
- Baisch, S., Weidler, R., Vörös, R., Wyborn, D., and L. DeGraaf, 2006. Induced seismicity during the stimulation of a geothermal HFR reservoir in the Cooper Basin (Australia). *Bull. Seism. Soc. Amer.*, 96 (6), 2242-2256.
- Baisch, S., Carbon, D., Dannwolf, U., Delacou, B., Devaux, M., Dunand, F., Jung, R., Koller, M., Martin, C., Sartori, M., Secanell, R., and R. Vörös, 2009. Deep Heat Mining Basel - Seismic Risk Analysis. *SERIANEX study prepared for the Departement für Wirtschaft, Soziales und Umwelt des Kantons Basel-Stadt, Amt für Umwelt und Energie*, <http://www.wsu.bs.ch/geothermie>, 553 pages.
- Baisch, S., Vörös, R., Rothert, E., Stang, H., Jung, R., and R. Schellschmidt, 2010. A numerical model for fluid injection induced seismicity at Soultz-sous-Forêts. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 47, 405-413 DOI 10.1016/j.ijrmms.2009.10.001.
- Baria, R., E. Majer, M. Fehler, N. Toksoz, C. Bromley, and D. Teza (2006), International cooperation to address induced seismicity in geothermal systems. Thirty-First Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, January 30-February 1, 2006 SGP-TR-179
- Bommer, J. J., Oates, S., Cepeda, J. M., Lindholm, C., Bird, J., Torres, R., Marroquin, G., and J. Rivas, 2006. Control of hazard due to seismicity induced by a hot fractured rock geothermal project. *Eng. Geol.*, **83**, 287-306.
- Deichmann, N., 2006. Local magnitude, a moment revisited, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 96, no. 4A, 1267–1277, doi 10.1785/0120050115.
- Douglas, J., Edwards, B., Cabrera, B. M., Convertito, V. Tramelli, A., Kraaijpoel, D., Maercklin, N., Sharma, N., and G. De Natale, 2013. Predicting Ground Motion from Induced Earthquakes in Geothermal Areas. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, doi:10.1785/0120120197. Poggi et al, 2011
- Gassmann, J., Gysel, M., Schneider, J.F., 1979, Anhydrit als Wirtgestein für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in der Schweiz, *Nagra, technischer Bericht* **12**
- Gischig, V. S., Wiemer S. (2013). A stochastic model for induced seismicity based on non-linear pressure diffusion and irreversible permeability enhancement. *Geophysical Journal International*, doi:10.1093/gji/ggt164.
- Goertz-Allmann, B. P., Edwards, B., Bethman, F., Deichmann, N., Clinton, J., Fäh, D., and D. Giardini, 2011. A New Empirical Magnitude Scaling Relation for Switzerland. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, **101**(6), 3088-3095.
- Hill, D. P., 2008. Dynamic Stresses, Coulomb Failure, and Remote Triggering. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, **98**(1), 66-92. Häring et al., 2008
- King, G. E., 2012. Hydraulic Fracturing 101: What Every Representative, Environmentalist, Regulator, Reporter, Investor, University Researcher, Neighbor and Engineer Should Know About

Estimating Frac Risk and Improving Frac Performance in Unconventional Gas and Oil Wells. *SPE* 152596.

Majer, E., Nelson, J., Robertson-Tait A., Savy J., Wong I., Protocol for addressing induced seismicity associated with enhanced geothermal systems (EGS), Final Draft, May 31, 2011 (DOE)

Neal B. Nagel and Marisela Sanchez-Nagel, SPE, 2011, Stress Shadowing and Microseismic Events: A Numerical Evaluation, Annual Technical Conference and Exhibition, 30 October-2 November 2011, Denver, Colorado, USA, ISBN 978-1-61399-147-3

Nagel N.B., Sanchez-Nagel M. (2011). Stress Shadowing and Microseismic Events: A Numerical Evaluation. *Proc. SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Denver, Colorado, USA, pub. 147363.

National Academy of Sciences, induced seismicity potential in energy technologies, 2012, the National Academies Press, www.nap.edu

Okada, Y, 1992. Internal Deformation due to Shear and Tensile Faults in a Half-Space. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, **82**, 1018-1040.

Poggi, V., Edwards, B., and D. Fäh, 2011. Derivation of a reference shear-wave velocity model from empirical site amplification. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, 101, 258-274.

Ritter, J., Baisch, S., Fritschen R., Groos, J., Kraft, T., Plenefisch, T., Plenkens, K., & J. Wassermann, 2012. Empfehlungen zur Überwachung induzierter Seismizität – Positionspapier des Forschungskollegium Physik des Erdkörpers e.V.