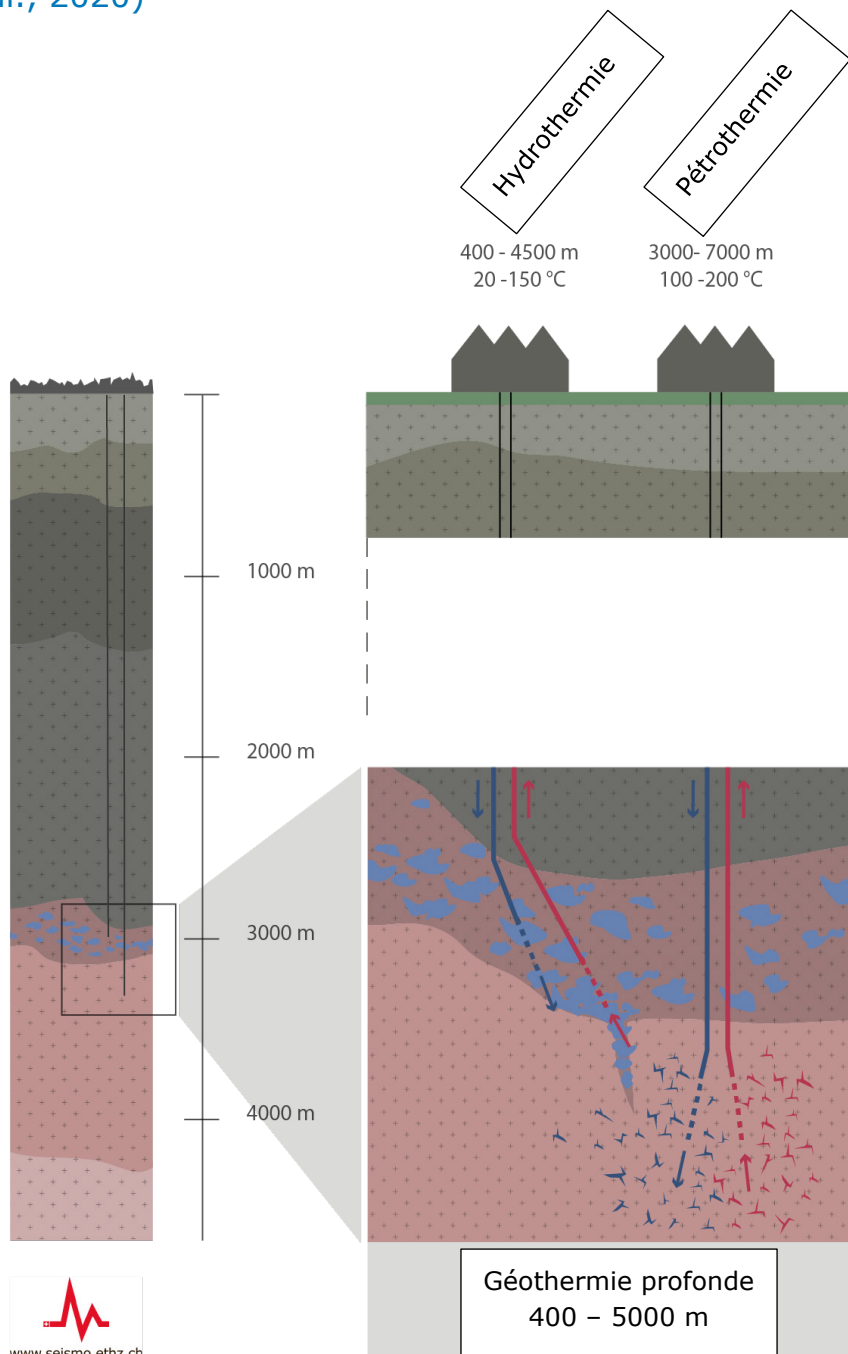


# Séismes induits et géothermie profonde : ce qu'il faut prendre en compte

Résumé du rapport « Good Practice Guide for Managing Induced Seismicity in Deep Geothermal Energy Projects in Switzerland (V2.0) »  
(Kraft et al., 2020)



---

## Introduction

Les projets de géothermie profonde ont pour but de créer et d'utiliser un échangeur de chaleur souterrain garantissant une perméabilité suffisante, tout en relevant le défi de ne pas déclencher de tremblements de terre incontrôlés. Un rapport rédigé par le Service Sismologique Suisse (SED) de l'ETH Zurich met en évidence des stratégies efficaces (« bonnes pratiques ») pour gérer la sismicité induite dans les installations de géothermie profonde. Il vise notamment à fournir des informations utiles aux autorités cantonales d'agrément, mais aussi aux exploitants pour évaluer les risques de tremblements de terre d'origine humaine et les limiter autant que possible à un niveau acceptable.

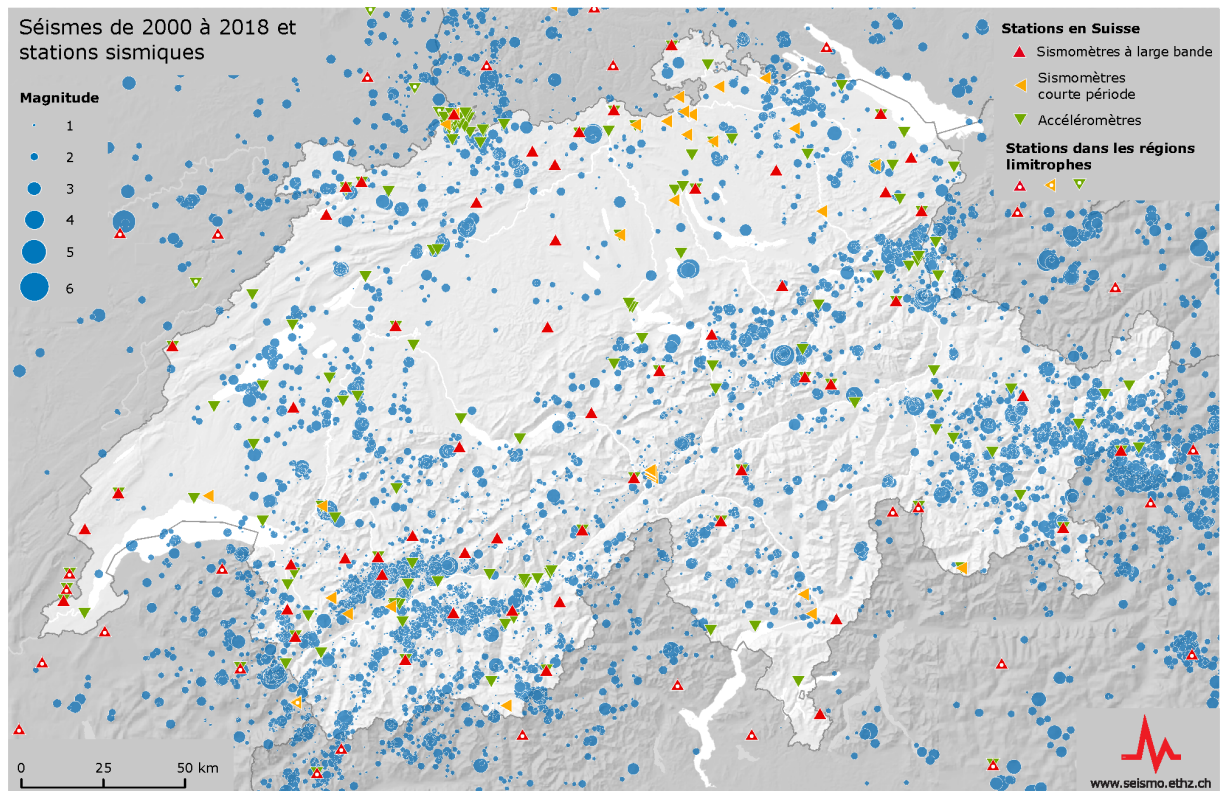
Ce document est un résumé. Le rapport complet en anglais peut être téléchargé sur le site <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000453228>. L'étude a été en grande partie financée par le programme SuisseEnergie de l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) dans le cadre des projets GEOBEST, GEOBEST-CH et GEOBEST2020+.

---

## La sismicité naturelle en Suisse

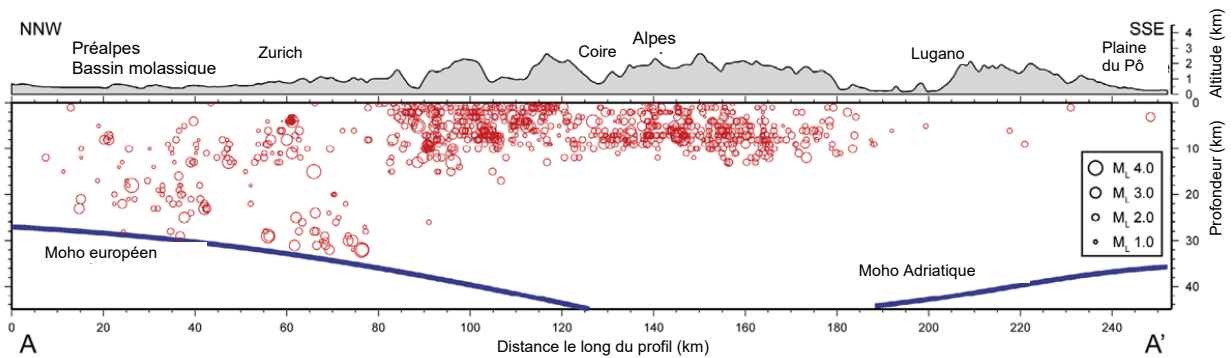
Les tremblements de terre en Suisse sont principalement la conséquence de la collision des plaques lithosphériques européenne et africaine. À l'échelle des pays européens, la Suisse est soumise à un aléa sismique moyen, avec des différences régionales : le Valais présente l'aléa le plus élevé, suivi par Bâle, les Grisons, la vallée du Rhin saint-galloise, la Suisse centrale et le reste de la Suisse. Il n'existe pas dans le pays de régions échappant totalement à l'aléa sismique.

Avec son réseau de plus de 200 sismomètres, le SED enregistre en Suisse et dans les pays limitrophes en moyenne trois à quatre tremblements de terre par jour, soit 1000 à 1500 par an (fig. 1). Les séismes effectivement ressentis par la population possèdent en général des magnitudes de 2.5 ou plus ; en moyenne, on en observe 23 par année. La probabilité d'un tremblement de terre catastrophique avec une magnitude de 6 ou plus s'élève à un pour cent pour l'année prochaine. Il faut s'attendre en moyenne à un tel événement tous les 50 à 150 ans. Un séisme de cette force s'est produit pour la dernière fois en 1946 près de Sierre dans le Valais, et peut survenir partout et à tout moment en Suisse. Le dernier séisme ayant provoqué des dommages importants en Suisse s'est produit en 1991 à Vaz dans le canton des Grisons, avec une magnitude de 5. Le séisme le plus fort documenté historiquement en Suisse était celui de 1356 à Bâle avec une magnitude d'environ 6.6.



**Illustration 1 :** Séismes enregistrés instrumentalement entre 2000 et 2018 et réseau sismique suisse.

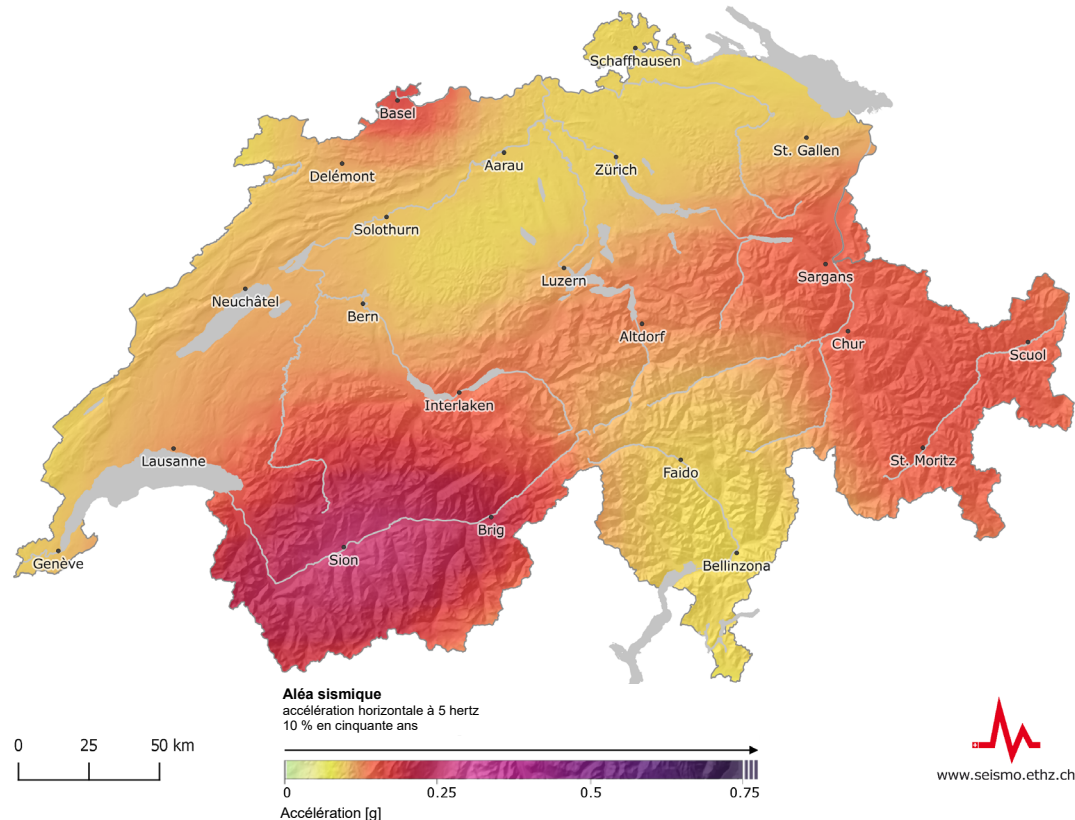
La distribution verticale des séismes dans les Alpes se distingue nettement de celle observée dans le nord de la Suisse et dans l’avant-pays alpin. Sous les Alpes, l’activité sismique se limite à la partie supérieure de la croûte terrestre. Les tremblements de terre dans l’avant-pays alpin au nord se produisent par contre dans toute la croûte terrestre, jusqu’à la limite avec le manteau terrestre (Moho) entre 30 et 50 km de profondeur (fig. 2).



**Illustration 2 :** Distribution en profondeur des séismes naturels en Suisse le long d’une coupe NNW-SSE. Les tremblements de terre à une distance de moins de 50 km de la coupe ont été projetés dans le plan de celle-ci. La taille des cercles correspond à la magnitude locale (ML) des tremblements de terre. La limite entre la croûte et le manteau terrestres (Moho) est indiquée en bleu.

## Modèle d'aléa sismique pour la Suisse

Aujourd'hui, il est irréaliste de vouloir prévoir les séismes. Toutefois, il est possible de calculer pour chaque endroit en Suisse la probabilité d'un tremblement de terre, ou encore le dépassement d'un certain seuil d'accélération du sol. Le modèle suisse d'aléa sismique présente ce concept de manière exhaustive (fig. 3). Il exprime l'éventualité de tremblements de terre et les mouvements du sol associés dans les cinquante prochaines années, en se basant sur les connaissances tectoniques et géologiques, sur l'historique sismique, sur les descriptions de dégâts ainsi que sur des modèles de propagation des ondes. Les experts et les représentants des autorités l'utilisent comme socle de décision pour la préparation aux tremblements de terre et pour la gestion intégrale des risques. Par ailleurs, les normes de construction parasismique s'en inspirent.



**Figure 3 :** Carte de l'aléa sismique de la Suisse. Accélération horizontale dans la plage de fréquences autour de 5 Hz, à laquelle on peut s'attendre dans les cinquante prochaines années avec une probabilité de 10 % pour un bâtiment situé sur un sol rocheux (durée de retour 500 ans).

L'évaluation de l'aléa sismique est la première étape pour estimer et limiter le risque sismique. Pour calculer le risque total de dégâts, le sous-sol local, la vulnérabilité des bâtiments et la concentration des biens sont également pris en compte. En Suisse, malgré l'aléa modéré, les tremblements de terre sont considérés comme le danger naturel présentant le plus grand potentiel de dommages.

### Aspects importants pour la géothermie profonde

Toute la Suisse est soumise à des contraintes tectoniques et est parcourue de nombreuses failles. Il existe certes des zones de plus faible sismicité (fig. 1), mais les tremblements de terre peuvent se produire n'importe où. Comme l'a montré le projet géothermique de Saint-Gall, les zones de failles n'ayant vu aucun ou peu de tremblements de terre ces dernières années ou décennies peuvent, dans certaines circonstances, encore être actives ou réactivées.

Deux modèles sont invoqués par les spécialistes pour l'avant-pays alpin au nord : tectonique « thin-skinned » et tectonique « thick-skinned ». Le premier suggère que la déformation provoquée

par la genèse des Alpes s'est propagée, et se propage encore, au sein d'une mince couche proche de la surface dans l'avant-pays alpin, et que la croûte terrestre n'est pratiquement pas concernée par cette déformation. La structure géologique du Jura est souvent prise comme exemple pour étayer ce modèle. Au contraire, le modèle « thick-skinned » considère que la croûte terrestre a subi et continue de subir cette déformation. On veut pour preuve de ce modèle la répartition des profondeurs des séismes dans l'avant-pays alpin. Une nouvelle interprétation combine ces deux modèles, avec une phase initiale de tectonique de l'avant-pays estimée « thin-skinned », et une phase ultérieure « thick-skinned » (qui perdure). Puisque le débat d'experts à ce sujet n'est pas clos, il faut toujours tenir compte de ces deux approches lors de l'évaluation de l'aléa et des risques liés à des projets de géothermie profonde dans l'avant-pays alpin.

Malgré que certains experts partagent l'opinion répandue que de forts tremblements de terre ne peuvent se produire dans les zones proches de la surface et accessibles par des forages, en raison d'une résistance trop faible de la roche, plusieurs exemples de tels séismes sont connus en Suisse. Par exemple, un tremblement de terre d'une magnitude de 4.3 s'est produit en 1999 à Fribourg à une profondeur de seulement 2 km, et un autre d'une magnitude de 3.8 en 1997 au Walensee à une profondeur de 1 km. Ces faits ne doivent pas être ignorés dans l'analyse de l'aléa et des risques liés à un projet de géothermie profonde.

---

## Tremblements de terre induits

Il n'existe pas de définition uniforme du concept de « tremblement de terre induit » dans la littérature technique. Le SED se base sur la proposition du service géologique des États-Unis (USGS), qui décrit tous les tremblements de terre provoqués ou déclenchés par l'homme (c'est-à-dire anthropiques) comme étant induits. On ne cherche donc pas à faire la différence entre la présence ou non d'une précontrainte tectonique (« triggering »).

### Différence avec les tremblements de terre naturels

La sismicité induite est souvent causée par d'importantes interventions techniques souterraines (par exemple, construction de tunnels, production de pétrole ou de gaz) ou en surface (par exemple, mise en eau de réservoirs). Des tremblements de terre d'origine humaine ont été provoqués par l'extraction du charbon il y a plus de 100 ans, notamment en Allemagne ou en Angleterre. Les tremblements de terre induits sont généralement plus faibles que les plus grands séismes naturels de la région. En termes purement physiques, les séismes induits (d'origine humaine) ne diffèrent pas des séismes naturels (tectoniques). Une attribution, rarement définitive, à l'une de ces catégories n'est possible qu'en considérant l'emplacement et le lieu du séisme, le mécanisme au foyer et la relation avec des interventions humaines.

### Causes des tremblements de terre induits

La sismicité induite se produit lorsque des interventions géotechniques dans le sous-sol modifient la configuration naturelle des contraintes et des résistances et que les zones de failles existantes sont ainsi soit soumises à des contraintes plus fortes, soit affaiblies. Les raisons d'une telle évolution peuvent être multiples. Une description plus détaillée des causes de la sismicité induite est présentée dans le rapport intégral et dans ses références bibliographiques. Les causes principales sont énumérées ci-dessous :



- **Modifications de charge**  
D'importantes variations de charge dues à l'ajout ou à l'enlèvement de très grandes masses à la surface peuvent entraîner des modifications de la structure des contraintes en profondeur. Dans certaines circonstances, celles-ci réactivent des failles existantes. Les exemples sont l'exploitation minière ou la construction de tunnels ainsi que la mise en eau ou la vidange de réservoirs.
- **Changement de volume (effet poroélastique)**  
L'injection ou le retrait de liquides ou de gaz dans le sous-sol modifie le volume des espaces interstitiels des roches. Cela influence les conditions de contraintes dans la roche environnante, ce qui peut entraîner la réactivation de fractures et failles existantes.
- **Modification de la pression interstitielle (effet direct de la pression interstitielle)**  
L'introduction ou le retrait de liquides dans le sous-sol modifie la pression interstitielle. Par conséquent, la pression des fluides provoquée par l'injection reprend une partie de la pression de la roche. Cela réduit la force de frottement stabilisatrice qui s'oppose aux forces en cisaillement. De tels processus se produisent, par exemple, dans le cadre de la production de gaz naturel, de l'injection d'eaux usées ou de l'extraction d'énergie géothermique.
- **Affaiblissement chimique des zones de faille**  
Les stimulations chimiques et hydrauliques peuvent modifier les propriétés de frottement de la roche par des effets chimiques et parfois mécano-chimiques. Si le frottement est ainsi globalement réduit, les tensions naturellement accumulées ont plus de chances d'être relâchées.

### **Particularités des projets de géothermie profonde**

La sismicité induite affecte également les industries pétrolière, gazière et minière, et n'est donc pas un phénomène exclusif des projets de géothermie profonde. Cependant, ces derniers présentent certaines particularités :

- Ils sont souvent situés à proximité des villes. En cas de tremblement de terre, cela augmente le risque que la population ainsi que les bâtiments et les infrastructures soient touchés.
- Dans les « systèmes géothermiques stimulés » (SGS), des techniques de stimulation sont utilisées pour déclencher délibérément de petits séismes afin d'augmenter la perméabilité à l'eau de la roche. La probabilité d'un séisme induit plus important augmente avec le nombre de tremblements de terre déclenchés de cette manière.
- Les projets hydrothermaux visent souvent des systèmes de failles tectoniques, car on s'attend à ce que la perméabilité à l'eau y soit encore plus élevée que dans l'aquifère cible. Il existe un risque que ces systèmes de failles aient une certaine taille et puissent être activés plus facilement qu'envisagé, ce qui entraînerait un aléa sismique plus élevé que prévu.
- L'expérience dans les projets de géothermie profonde, en particulier ceux de type SGS, est relativement limitée. Il existe donc un risque plus élevé que ces systèmes se comportent différemment de ce qui est prévu.

## Le rôle du SED dans les projets de géothermie profonde

Le SED est l'institution fédérale compétente en matière de tremblements de terre et, conformément à l'ordonnance sur l'alarme, le service responsable pour les annonces sur les tremblements de terre. Sur mandat de la Confédération, le SED surveille l'activité sismique en Suisse et dans les pays limitrophes et prépare les analyses nationales d'aléa et de risque. En cas de tremblement de terre, le SED informe le grand public, les administrations et les médias sur sa localisation, sa force et ses conséquences possibles et donne une indication de la probabilité d'autres séismes. C'est la raison pour laquelle le SED joue un rôle officiel dans les projets d'énergie géothermique au plus tard au moment où des tremblements de terre induits sont ressentis.

Le SED n'a pas pour vocation d'effectuer des analyses de risque et d'aléa spécifiques aux projets géothermiques pour le compte des exploitants. Ainsi, des conflits d'intérêts peuvent être réduits au minimum et des prestataires privés en Suisse ou d'autres pays peuvent mettre en œuvre leurs compétences pour cette tâche. Le SED considère que son rôle principal est d'assister les cantons dans leurs tâches de surveillance. Il peut assurer sur demande des cantons une surveillance sismique et une alerte optimales, conseiller les autorités cantonales et locales, et expertiser les analyses d'aléa et de risques en tant que service spécialisé indépendant.

Actuellement, le SED peut entreprendre une surveillance sismologique de base des projets de géothermie profonde, en grande partie gratuitement, sur mandat des autorités cantonales, dans le cadre du projet GEOBEST2020+ financé par l'OFEN. En outre, le SED peut, sur demande d'un canton, assister et conseiller gratuitement les autorités cantonales dans toutes les phases d'un projet de géothermie profonde, par exemple pour l'évaluation de la partie sismologique de l'étude d'impact sur l'environnement que doit préparer l'exploitant.

---

## Surveillance sismique des projets de géothermie profonde

Au cours de dernières années, le SED a conduit plusieurs mandats pour la surveillance sismique de projets de géothermie profonde. Les principales conclusions sont résumées ci-dessous :

- Un réseau local de surveillance sismique doit être planifié de manière professionnelle et être opérationnel au moins six mois avant le début du projet, afin de s'assurer qu'il fonctionne bien et afin de tester les procédures d'alarme au préalable. Le réseau doit être agencé de manière à pouvoir localiser de manière fiable même les petits tremblements de terre. Les besoins exacts d'un projet doivent toujours être évalués individuellement.
- Il est judicieux d'intégrer pleinement la surveillance sismique locale dans le réseau sismique existant du SED (fig.1). D'une part, cela permet d'accroître la précision de la surveillance et, d'autre part, de garantir une analyse et une communication efficaces en cas de fort tremblement de terre.
- Les enregistrements sismiques, y compris les catalogues et les cartes des tremblements de terre, doivent être librement accessibles en temps réel sur une page web officielle et spécifique au projet. La transparence y gagne, avec une possibilité de vérification, deux aspects essentiels en termes d'acceptation sociale. Idéalement, les données devraient être délivrées par un service spécialisé indépendant tel que le SED.
- Un concept d'alarme en cas de forts tremblements de terre doit être élaboré avant le début du projet. Il garantira que les opérateurs, les autorités et, si possible, le public seront informés en temps réel.

## Systèmes de feux de signalisation sismique

Les systèmes de feux de signalisation, dispositifs de contrôle pour la surveillance de la sismicité, visent à éviter ou, dans la mesure du possible, à limiter les effets négatifs de la sismicité induite. Les systèmes traditionnels de feux sont donc basés sur une surveillance étroite de la sismicité induite et prévoient différentes mesures en fonction de la magnitude maximale enregistrée. De tels systèmes traditionnels ont été utilisés à Bâle et à Saint-Gall, et fonctionnent de manière purement réactive.

Le SED teste actuellement un système adaptatif et anticipatif de feux de signalisation. Non seulement la magnitude maximale observée sert d'indicateur pour les mesures à prendre, mais des prévisions sur l'évolution ultérieure viennent la compléter. Des paramètres d'exploitation (par exemple le débit et la pression d'injection) sont également pris en compte. Sur la base des effets prévus des processus d'injection envisagés, de la perméabilité constatée de la roche ainsi que d'autres facteurs, des prévisions sur la probabilité de séismes induits plus forts doivent pouvoir être faites à l'aide de modèles statistiques et physiques. Si cette probabilité dépasse une valeur seuil prédéfinie par l'autorité de contrôle, des contre-mesures peuvent être mises en œuvre plus tôt afin de limiter autant que possible l'occurrence de tremblements de terre.

---

## Évaluation des projets de géothermie profonde à l'aide de GRID

Pour tout projet de géothermie profonde, il est essentiel d'évaluer l'activité sismique potentielle ainsi que l'aléa et les risques qui en découlent. Ensuite, sur cette base, il s'agit d'élaborer les mesures nécessaires pour la protection de la population, de l'environnement, des biens et des bâtiments, en tenant compte des conditions géologiques locales et de la conception de l'installation. Le SED recommande dans un premier temps, pour établir une analyse de situation complète d'un projet déterminé de géothermie profonde et pour l'affecter grossièrement à une classe de risques, la grille d'évaluation « Geothermal Risk of Induced Seismicity Diagnosis (GRID) » (Trutnevyte & Wiemer, 2017) avec des adaptations mineures. Ces recommandations et méthodes de travail, actualisées dans Kraft et al. (2020), prévoient pour chaque phase du projet des mesures adaptées. Ces recommandations comprennent des aspects techniques tels que l'évaluation de l'aléa et des risques, le type de surveillance sismique et les systèmes de feux de signalisation, etc., ainsi que des aspects de communication tels que la participation des personnes concernées et des autorités.

Il est important de noter que GRID n'est pas une étude de risque, et n'a pas pour vocation de la remplacer, elle ne fait que structurer l'approche dans les premières phases d'un projet et faire des suggestions pour une action ultérieure. L'analyse GRID n'est d'ailleurs pertinente que pour les systèmes ouverts et pour la phase de forage des systèmes fermés profonds. Dans les projets géothermiques qui fonctionnent en système fermé, il n'y a pas d'échange de fluides avec la roche environnante. Pour ces sondes géothermiques de surface ou profondes, aucun des mécanismes conduisant à une sismicité induite n'est effectif, à l'exception des effets de refroidissement local.

Dans un premier temps et à l'aide de la grille d'évaluation GRID, chaque partie concernée attribue des points aux différents facteurs de risque. Au moins trois parties doivent être impliquées dans ce processus : l'exploitant de l'installation, l'autorité chargée de délivrer les autorisations et un ou deux experts indépendants. Les résultats sont discutés avant que chaque partie ne revérifie ses positions et les ajuste si nécessaire. Ce processus doit être documenté par les parties afin de garantir la transparence du déroulement de l'évaluation des risques. Enfin, l'autorité d'autorisation décide des étapes suivantes et des mesures nécessaires.

Le SED vous fournit ici ([DOI : 10.3929/ethz-b-000453301](https://doi.org/10.3929/ethz-b-000453301)) un fichier Excel que vous et vos experts pourrez utiliser pour attribuer et afficher les points GRID.



Avant le début du projet, seuls des indicateurs globaux du comportement général des systèmes sont généralement disponibles. Toutefois, leur combinaison permet d'estimer grossièrement le risque attendu de sismicité induite. Divers indicateurs pertinents pour l'évaluation du risque sismique induit sont décrits ci-dessous :

### **Indicateurs de l'aléa sismique**

- Profondeur du réservoir prévu  
On suppose que les systèmes plus profonds entraînent davantage de séismes induits en raison du profil de résistance de la croûte terrestre.
- Volume d'injection ou de refoulement  
Plus le volume de roche affecté par les changements de contraintes est important, plus la probabilité de tremblements de terre est grande.
- Type de roche du réservoir prévu  
Pour les systèmes implantés dans le socle cristallin, il faut s'attendre à une sismicité induite plus forte que dans les roches sédimentaires, en raison des propriétés mécaniques de la roche, ce que confirment les retours expériences.
- Pressions d'injection  
En général, plus les changements de pression interstitielle auxquels le sous-sol est exposé sont importants, plus la probabilité de tremblements de terre induits est grande.
- Sismicité naturelle dans la région  
L'hypothèse intuitive selon laquelle les zones où l'activité sismique naturelle est faible au niveau régional réagissent aux interventions géotechniques avec une sismicité induite moindre (en termes de nombre d'événements et de force) n'a pas été statistiquement prouvée à ce jour et n'est pas non plus convaincante du point de vue de la géomécanique. Des études montrent que les régions à faible risque sismique peuvent connaître autant de tremblements de terre induits qu'ailleurs et aussi forts. Cependant, dans les régions où la sismicité naturelle est plus élevée, il est plus difficile de distinguer les séismes naturels des séismes induits.
- Proximité de failles sismiques actives  
Les injections à proximité de systèmes de failles actifs connus augmentent considérablement la probabilité de tremblements de terre induits. Les champs de contrainte locaux et les réseaux de failles sont généralement extrêmement complexes et hétérogènes et ont une forte influence sur le comportement sismique du sous-sol. Ce n'est que dans de rares cas qu'ils sont connus avec une précision suffisante pour faire des prévisions fiables.

### **Indicateurs du risque sismique**

- Effets d’amplification locale  
Selon sa nature, le sous-sol local peut intensifier le mouvement du sol provoqué par les tremblements de terre. L’ampleur de cet effet peut être estimée sur la base des classes de sol de la norme de construction SIA 261 (SIA, 2013) ou, si celles-ci ne sont pas disponibles, à l’aide la figure 15 du rapport intégral.
  
- Exposition et vulnérabilité  
Les conséquences possibles d’un tremblement de terre induit dépendent d’une part du nombre de personnes et de biens potentiellement touchés (exposition) et d’autre part de leur vulnérabilité.
  
- Risques secondaires  
Outre l’impact direct du mouvement sismique du sol, les personnes et les biens peuvent également être touchés par des phénomènes déclenchés par des séismes induits, notamment, dans des zones sensibles, des glissements de terrain ou des raz-de-marée.

### **Indicateurs d’acceptation sociale**

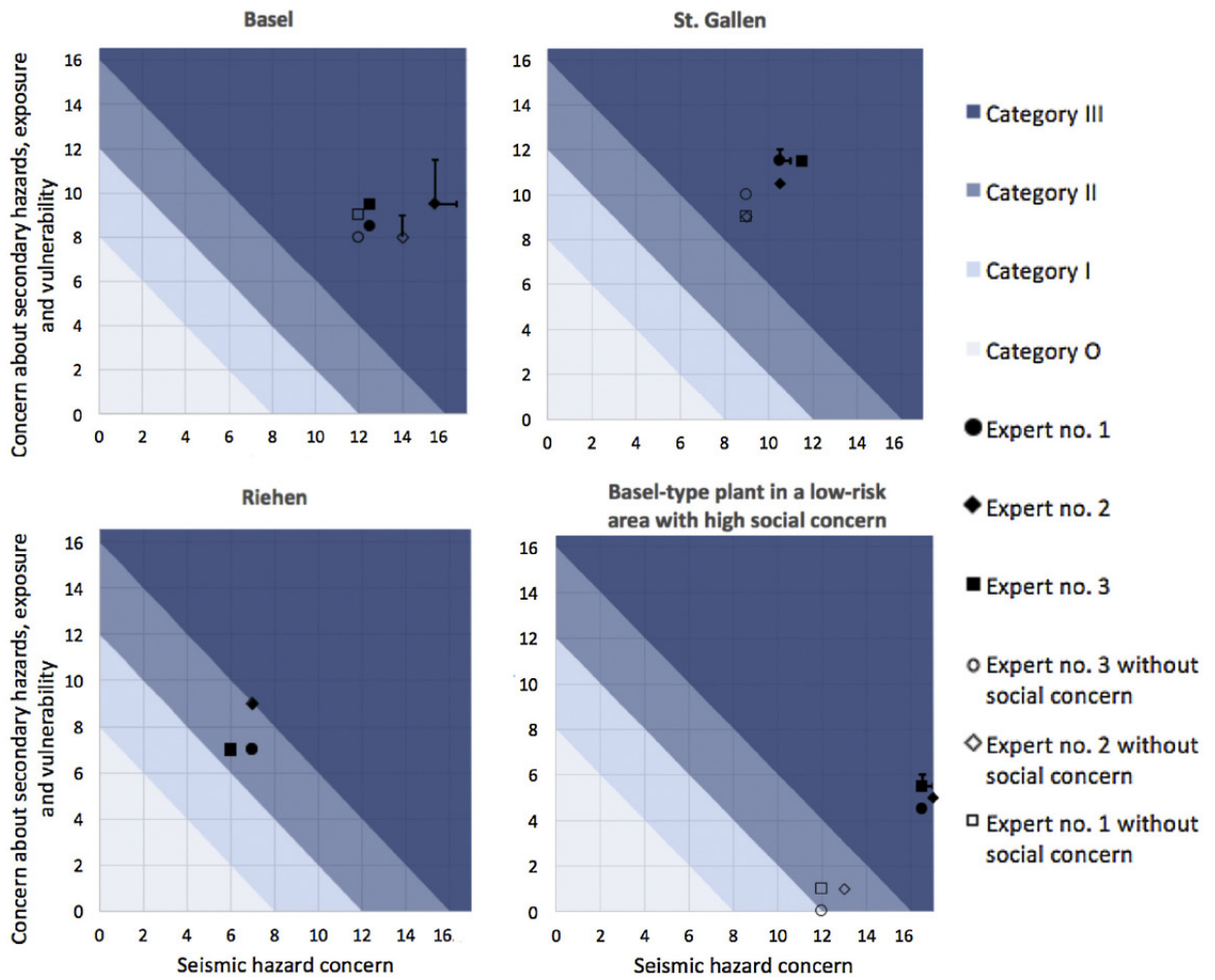
- Acceptation par le public de l’énergie géothermique profonde  
Outre les dangers et risques sismologiques et techniques, l’acceptation sociale est déterminante pour la réussite ou l’échec d’un projet.
  
- Confiance dans les acteurs  
Plus le public fait confiance à l’autorité d’autorisation et à l’opérateur, plus un projet d’énergie géothermique a des chances d’être bien accepté.
  
- Avantages pour la population locale  
Le bénéfice direct ou indirect qu’un projet d’énergie géothermique apporte à la population locale a un effet décisif sur l’acceptation sociale.

## Grille d'évaluation GRID

Facteurs de l'aléa sismique	0 (peu inquiétant)	1 (inquiétant)	2 (très inquiétant)
Profondeur du réservoir	< 1 km	1 - 3 km	> 3 km
Volume d'injection cumulé pendant la stimulation	< 1'000 m <sup>3</sup>	≤ 10'000 m <sup>3</sup>	> 10'000 m <sup>3</sup>
Volume quotidien d'injection ou de refolement pendant le projet	< 1'000 m <sup>3</sup> /jour d'injection <b>ou</b> < 5'000 m <sup>3</sup> /jour de refolement	≤ 10'000 m <sup>3</sup> /jour d'injection <b>ou</b> ≤ 50'000 m <sup>3</sup> /jour de refolement	> 10'000 m <sup>3</sup> /jour d'injection <b>ou</b> > 50'000 m <sup>3</sup> /jour de refolement
Type de roche	Sédiments	Dans un rayon de 500 m d'un sous-sol cristallin	Sous-sol cristallin
Délimitation entre sismicité de fond et sismicité induite	Zones sismiques 1a & 1b dans SIA (2020)*	Zone sismique 2 dans SIA (2020)*	Zones sismiques 3a & 3b dans SIA (2020)*
Pression d'injection du fluide	< 0.3 MPa	0.3 - 10 MPa	> 10 MPa
Distance par rapport aux failles connues et éventuellement actives	>5 km	≤ 5 km	< 2 km
Facteurs du risque sismique (dans un rayon de 5 km)	0 (peu inquiétant)	1 (inquiétant)	2 (très inquiétant)
Effets d'amplification locale** <i>Sols meubles = classes de sol de fondation D, E, F in SIA (2020)</i>	Aucun bâtiment ou infrastructure sur sol meuble	<10 % des bâtiments ou infrastructures sur sol meuble	≥ 10 % des bâtiments ou infrastructures sur sol meuble
Population exposée	Peu dense (< 100 habitants)	Campagne (< 20'000 habitants)	Urbaine (> 20'000 habitants)
Activité industrielle ou commerciale	Faible activité	Activité moyenne ≥ 1 entreprise avec 100 - 499 employés <b>ou</b> ≥ 1 site industriel d'une valeur particulière	Forte activité ≥ 5 entreprises avec 100-499 employés <b>ou</b> ≥ 2 entreprises avec plus de 500 employés <b>ou</b> ≥ 2 sites industriels d'une valeur particulière
Importance des bâtiments et des infrastructures	Pas de bâtiments de classe SIA II ou III (SIA, 2020)	Pas de bâtiments ou d'infrastructures de classe III (SIA, 2020)	Bâtiments ou infrastructures de classe III (SIA, 2020)
Infrastructures présentant un risque environnemental considérable	Aucune	-	Une ou plusieurs
Patrimoine non renforcé	< 5 % des bâtiments classés comme patrimoine culturel local, régional ou national important	≤ 10 % des bâtiments classés comme patrimoine culturel local, régional ou national important	> 10 % des bâtiments classés comme patrimoine culturel local, régional ou national important ; <b>ou</b> au moins un bâtiment classé comme bien culturel international
Vulnérabilité aux risques secondaires	Très faible	Modérée	Élevée
Facteurs sociaux	0 (peu inquiétant)	1 (inquiétant)	2 (très inquiétant)
Potentiel de risque pour la population	Aucun	Présent	Important
Groupes d'intérêt vulnérables ou fortement opposés	Aucun	Présents	Importants
Expérience négative avec des projets similaires	Aucun	Présents	Importants
Manque de confiance envers les opérateurs de projets ou les autorités	Néant	Présent	Important
Avantages pour la population locale	Avantages directs avec ou sans compensation financière	Compensation financière uniquement	Keine

\* <https://s.geo.admin.ch/8cb9c5fc86> (map.geo.admin.ch → Zones sismiques selon la norme SIA 261)

\*\* Si la classe de sol n'est pas définie, la figure 15 du rapport complet peut être utilisée.



**Figure 4** : Résultats de l'évaluation GRID pour les projets géothermiques de Bâle, Saint-Gall et Riehen ainsi que pour un projet hypothétique de type bâlois dans une région à faible risque sismique, mais à fort scepticisme social.

## Stratégies de gestion des risques pour les catégories GRID

En fonction des points cumulés GRID attribués aux différents facteurs de risque, le projet à évaluer entre dans l’une des catégories suivantes :

### Catégorie 0

Dans cette catégorie, il est très peu probable ou exclu qu’une sismicité induite se produise. Généralement, les systèmes fermés tels que les sondes géothermiques profondes ou les puits d’exploration sans stimulation hydraulique appartiennent à la catégorie 0.

#### Actions recommandées

Une évaluation des risques et de l’aléa ou une surveillance sismique spécifique n’est pas nécessaire. Toutefois, si l’acceptation sociale du projet est faible, les opérateurs ou les autorités peuvent recourir à des mesures volontaires de surveillance.

### Catégorie I

Il est peu probable qu’une sismicité induite se produise. En général, entrent dans cette catégorie les projets hydrothermaux dans les aquifères existants, situés à des profondeurs allant jusqu’à 3 km et dans des zones à faible risque sismique et à forte acceptation sociale (fig. 5).

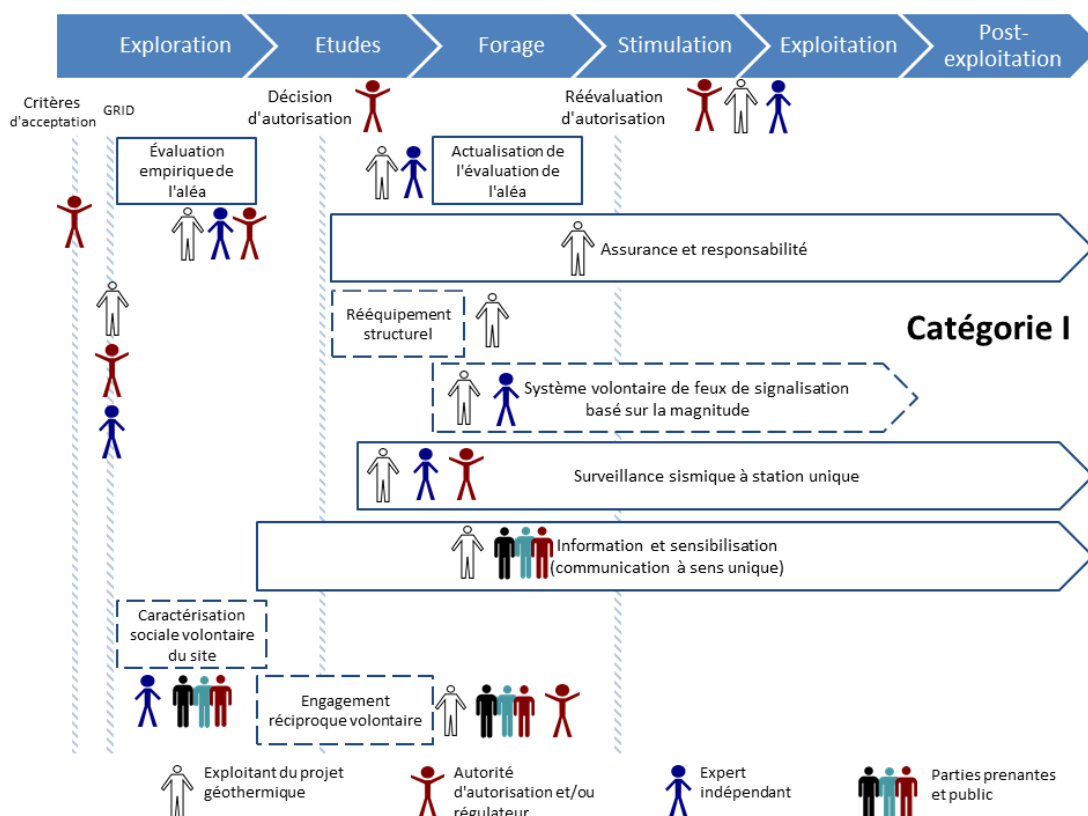


Figure 5 : Aperçu schématique des mesures recommandées pour la catégorie GRID I.



### **Mesures recommandées**

- Analyse d'aléa et de risque
  - Une évaluation de l'aléa lié à la sismicité induite doit être effectuée sur la base de données empiriques provenant de projets similaires et de calculs de scénarios simples. Il s'agit d'étudier la sismicité naturelle dans un rayon de 10 km ainsi que les variations de contrainte à proximité du puits. La probabilité annuelle moyenne d'un séisme de magnitude 2.0 (ML), estimée à partir de comparaisons avec des projets similaires et des données empiriques, ne devrait pas dépasser 1 %, sans quoi le projet doit être placé en catégorie II.
  - Une évaluation qualitative spéciale des risques doit être effectuée pour les bâtiments et les infrastructures de classe III (SIA, 2020) et pour les biens culturels dans un rayon d'au moins 5 km autour du site du projet.
  - Il n'est pas absolument nécessaire de faire fonctionner un système de feux de signalisation sismique. Toutefois, il est judicieux de définir et de documenter les contre-mesures et les canaux de communication pour les événements inattendus.
  - La réinterprétation des données de la sismique-réflexion n'est pas absolument nécessaire.
- Mécanismes de surveillance et de contrôle
  - Bien qu'une sismicité ressentie soit peu probable, elle doit être surveillée en permanence et diffusée de manière transparente. À cette fin, une station sismique doit enregistrer en continu les mouvements du sol au moins trois mois avant le début du projet et jusqu'à six mois après la fin du projet.
  - Avant la stimulation hydraulique, l'état des bâtiments et des infrastructures de classe III (SIA, 2020) ainsi que des biens culturels dans un rayon d'au moins 5 kilomètres doit être documenté.
  - Les mouvements sismiques du sol pour des bâtiments et des infrastructures de classe III (SIA, 2020) sélectionnés, ainsi que des biens culturels dans un rayon d'au moins 5 kilomètres doivent être surveillés.
- Couverture d'assurance
  - Une police d'assurance pour la sismicité induite est judicieuse.

## Catégorie II

Une sismicité induite pouvant aller jusqu'à entraîner des dégâts est possible. En général, cette catégorie comprend typiquement des projets hydrothermaux dans les aquifères d'une profondeur supérieure à 3 km. Des systèmes de failles qui ne sont pas stimulés peuvent cependant être situés à proximité du forage. Dans toutes les phases d'exploitation, la sismicité induite doit être prise en compte et diffusée de manière transparente (fig. 6).

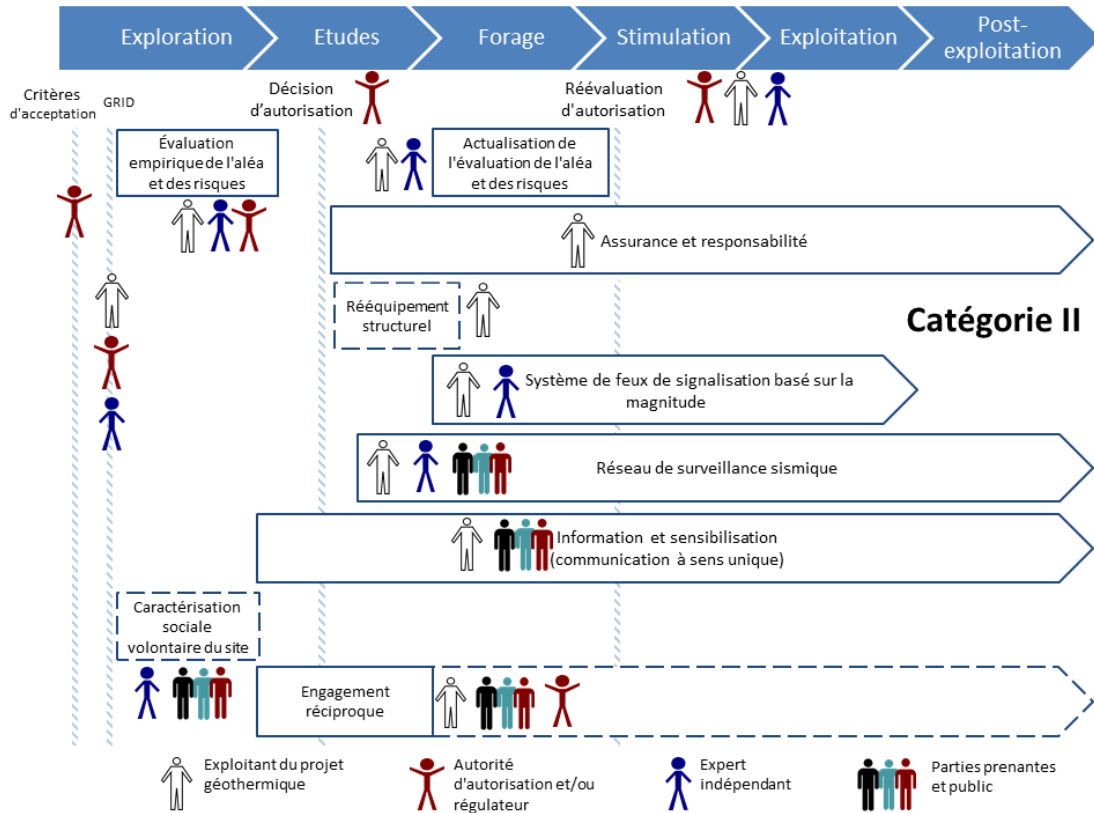


Figure 6 : Aperçu schématique des mesures recommandées pour la catégorie GRID II.

### Mesures recommandées

- Analyse d'aléa et de risque
  - En plus de l'évaluation déterministe de l'aléa de la catégorie I, les incertitudes doivent être quantifiées en tenant compte de modèles alternatifs et des mécanismes actifs. Il convient également de quantifier un scénario du « pire des cas ». Si la probabilité annuelle moyenne d'un tremblement de terre induit d'une magnitude de 3.0 (ML) ou plus, estimée à partir de données empiriques et de comparaisons avec des projets similaires, est supérieure à 1 %, le projet doit être placé dans la catégorie III de risque.
  - Une évaluation spéciale des risques doit être effectuée pour les bâtiments et les infrastructures de classe II et III (SIA, 2020) et pour les biens culturels dans un rayon d'au moins 5 km autour du site du projet.
  - Le fonctionnement d'un système de feux de signalisation classique est recommandé. À cette fin, des contre-mesures et des canaux de communication doivent être définis et documentés.
  - Il peut être judicieux de collecter des données représentatives en sismique-réflexion 2D ou, si nécessaire, en 3D ou de réinterpréter des données existantes.
  
- Mécanismes de surveillance et de contrôle
  - Il est conseillé de définir une stratégie de surveillance, y compris dans le cas où une sismicité induite se produirait.
  - Le réseau de surveillance sismique devrait permettre de localiser les tremblements de terre ressentis et de faire fonctionner un système classique de feux de signalisation. Cela nécessite un réseau sismique qui permette de bien localiser tous les tremblements de terre d'une magnitude supérieure ou égale à 1.0 (ML) dans un rayon d'au moins 5 km autour du site du projet. La campagne de mesure doit commencer six mois avant le début du projet.
  - Il est important de surveiller la sismicité pendant les six mois suivant la fin d'exploitation.
  - Si un tremblement de terre d'une magnitude supérieure ou égale à 1.0 (ML) se produit dans un rayon de 2.5 km autour du site du projet pendant la phase de stimulation hydraulique et de test, il faut interrompre cette phase et réévaluer l'aléa sismique.
  - Pendant la phase d'exploitation, les premiers mécanismes de contrôle du système de feux de signalisation devraient prendre effet si un tremblement de terre d'une magnitude supérieure ou égale à 1.5 (ML) se produit dans un rayon de 2.5 km autour du site du projet.
  - Avant la stimulation hydraulique, l'état des bâtiments et des infrastructures de classe III (SIA, 2020) ainsi que des biens culturels dans un rayon d'au moins 5 km doit être documenté.
  - Les mouvements sismiques du sol pour des bâtiments et des infrastructures de classe III (SIA, 2020) sélectionnés, ainsi que des biens culturels dans un rayon d'au moins 5 km doivent être surveillés.
  
- Couverture d'assurance
  - Une police d'assurance pour la sismicité induite est judicieuse.

### Catégorie III

Des tremblements de terre causant des dégâts et des réactions négatives de la population sont possibles. Les risques de tremblements de terre induits doivent donc être analysés et surveillés de près. Cette catégorie comprend généralement les projets SGS qui stimulent les roches cristallines de plus de 3 km de profondeur, éventuellement à proximité de systèmes de failles, mais il est également possible que des projets hydrothermaux dans des régions à haut risque, géologique ou sociétal, tombent dans cette catégorie. Il est recommandé de faire examiner l'évaluation de l'aléa et des risques de sismicité induite non seulement par les autorités compétentes en matière d'autorisation, mais aussi par des experts indépendants, par exemple le SED (fig. 7).

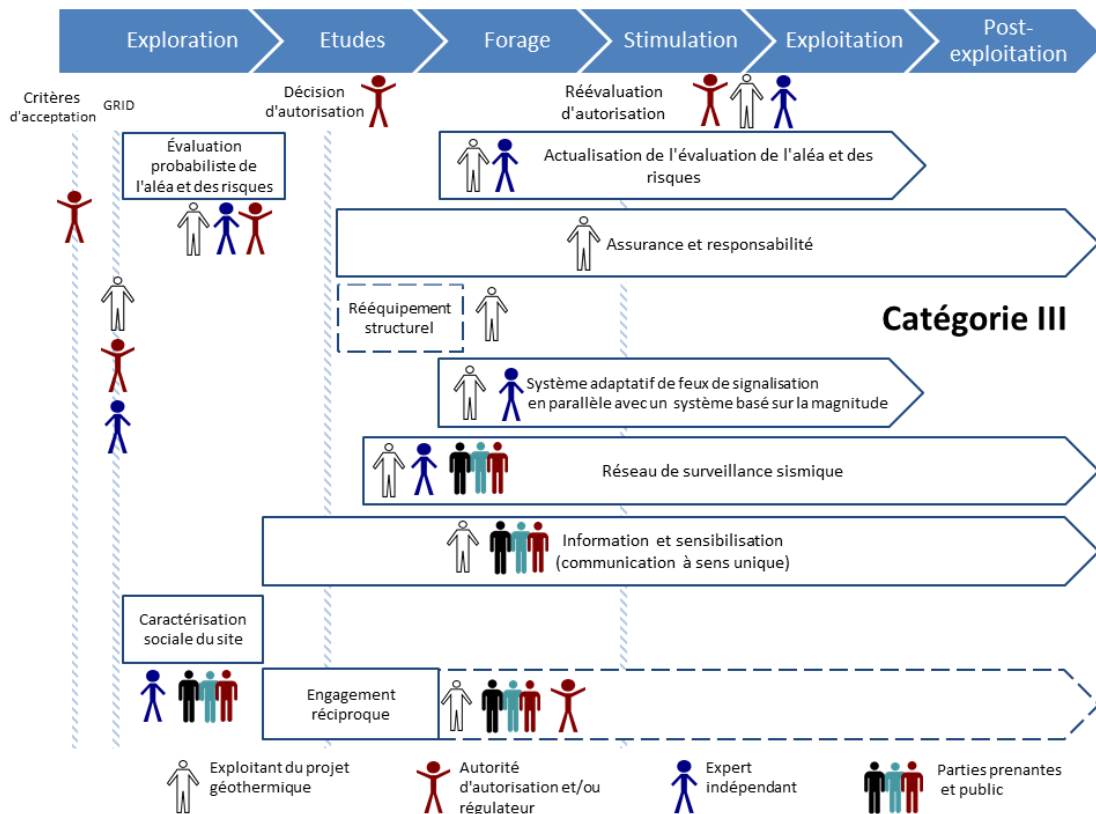


Figure 7 : Aperçu schématique des mesures recommandées pour la catégorie GRID III.

### Mesures recommandées

- Évaluation de l'aléa et des risques
  - Une évaluation détaillée et probabiliste de l'aléa et des risques est requise pour cette catégorie. Les événements qui ont une très faible probabilité d'occurrence, mais qui peuvent causer des dommages importants doivent être pris en compte.
  - Une évaluation spéciale des risques doit être effectuée pour les bâtiments et les infrastructures de classe I, II et III (SIA, 2020) et pour les biens culturels dans un rayon d'au moins 5 km autour du site du projet.
  - Parallèlement à un système classique de feux de signalisation, nous recommandons de mettre en place un système adaptatif de feux de signalisation comme mécanisme de contrôle. À cette fin, des contre-mesures et des canaux de communication doivent être définis et documentés.
  - Des critères d'acceptation de la sismicité induite doivent être spécifiés et documentés en accord avec toutes les parties prenantes.
  - Toute sismicité induite qui se produit doit être signalée le plus rapidement possible et de manière transparente, y compris à la population.
  - Il est recommandé d'inclure divers tests dans la phase de stimulation afin de valider les modèles prédictifs et les hypothèses de l'étude d'évaluation de l'aléa et des risques. Si nécessaire, cette dernière doit être ajustée par la suite.
  - Pour les projets réalisés au sein ou à proximité de séquences sédimentaires, il peut être utile de collecter des données 3D de sismique-réflexion de haute qualité. La réinterprétation des données 2D et 3D existantes est recommandée dans tous les cas.
  - Un panel d'experts externes indépendants devrait aider les autorités et l'exploitant en cas d'événements imprévus.
  
- Mécanismes de surveillance et de contrôle
  - Une stratégie de surveillance devrait être définie, envisageant également des tremblements de terre plus importants.
  - Le réseau de surveillance sismique devrait permettre de localiser les tremblements de terre ressentis et de faire fonctionner un système adaptatif de feux de signalisation. Cela nécessite un réseau sismique qui permette de localiser tous les tremblements de terre d'une magnitude supérieure ou égale à 0.5 (ML) dans un rayon de 5 km autour du site du projet. La campagne de mesure doit commencer six mois avant le début du projet.
  - Dans la phase post-opérationnelle, la surveillance sismique doit se poursuivre sans réduire le nombre de stations jusqu'à ce que la sismicité soit revenue au niveau d'avant la stimulation.
  - Si un tremblement de terre d'une magnitude supérieure ou égale à 1.5 (ML) se produit dans un rayon de 2.5 km du site du projet pendant la phase de stimulation hydraulique et de test, il faut interrompre cette phase et réévaluer l'aléa sismique.
  - Le système classique de feux de signalisation et le système adaptatif de feux de signalisation devraient fonctionner automatiquement.
  - Avant toute stimulation hydraulique, l'état des bâtiments et des infrastructures de classe II et III (SIA, 2020) ainsi que des biens culturels dans un rayon de 5 kilomètres doit être documenté.
  - Les mouvements sismiques du sol pour des bâtiments et des infrastructures de classes II et III (SIA, 2020) sélectionnés, ainsi que des biens culturels dans un rayon de 5 kilomètres doivent être surveillés.
  - Il faut envisager d'enregistrer l'état des bâtiments de classe I (SIA, 2020) et de surveiller les mouvements de terrain à leur proximité avec la participation de la population.
  
- Couverture d'assurance
  - Une police d'assurance pour la sismicité induite est judicieuse.



---

## Documents et informations complémentaires

Fichier Excel pour l'attribution des points GRID : [doi.org/10.3929/ethz-b-000453301](https://doi.org/10.3929/ethz-b-000453301)

Informations sur l'indépendance et la transparence du SED :  
[www.seismo.ethz.ch/about-us/portrait/independence-and-transparency/](http://www.seismo.ethz.ch/about-us/portrait/independence-and-transparency/)

Informations générales sur l'énergie géothermique et les tremblements de terre :

- [La géothermie en bref](#)
- [Formes de géothermie](#)
- [Géothermie et tremblements de terre induits](#)
- [Mesures de contrôle de la sismicité induite](#)
- [Plus d'informations sur le suivi des projets géothermiques par le SED](#)

---

## Littérature

Kraft, T., Roth P., & S. Wiemer (2020). Good Practice Guide for Managing Induced Seismicity in Deep Geothermal Energy Projects in Switzerland. Bericht des Schweizerischen Erdbebendienstes, pp. 68, <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000453228>

SIA (2020). SIA 261:2020 Einwirkung auf Bauwerke. Swiss Society of Engineers and Architects, Zurich. (German: <http://shop.sia.ch/normenwerk/ingenieur/sia%20261/d/2020/D/Product>  
French: <http://shop.sia.ch/normenwerk/ingenieur/sia%20261/d/2020/F/Product>  
Italian: <http://shop.sia.ch/normenwerk/ingenieur/sia%20261/d/2020/I/Product>)

Trutnevyte, E. & Wiemer, S. (2017). Tailor-made risk governance for induced seismicity of geothermal energy projects: An application to Switzerland. *Geothermics*, 65, 295–312, doi: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2016.10.006>.