

---

# Représentation du risque de sismicité induite causé par le projet de géothermie profonde à Glovelier

---

## Résumé

---

9 mars 2015

---

### 1. Introduction

Le Service Sismologique Suisse (SED) a été mandaté par le canton du Jura pour expertiser l'étude de risque sismique réalisée dans le cadre du plan spécial cantonal pour le projet de géothermie profonde de Geo-Energie Suisse à Glovelier dans la commune de Haute-Sorne. Dans ses conclusions, le SED a émis deux recommandations concernant l'amélioration de la représentation du risque de sismicité induite lié au projet, à savoir le calcul de scénarios de dommages pour des séismes de magnitude 4 et 5 ainsi que le calcul d'une courbe de risque sismique représentative des études déterministes et probabilistes réalisées. Qui plus est, le canton a également demandé à ce que le risque sismique soit évalué dans le cadre de l'ordonnance sur la protection contre les accidents majeurs (OPAM). Finalement, l'Office fédéral de l'environnement qui a été sollicité par le canton pour l'aider à apprécier l'acceptabilité du risque sismique a proposé de calculer le risque individuel que le projet peut représenter pour un habitant de la région.

Le présent résumé illustre et de discute les principaux résultats des calculs réalisés sur la base de ces recommandations et demandes.

### 2. Méthode de calcul

L'objectif de l'étude est de présenter une meilleure estimation possible du risque de sismicité induite causé par le projet de géothermie. La méthode de calcul reposant sur des « arbres logiques » développée par le SED est décrite en détail dans l'article de Mignan (2015)<sup>1</sup>. La procédure particulière développée pour cette étude est quant à elle décrite dans la note technique rédigée à l'attention du Canton<sup>2</sup>. La méthode consiste à combiner les probabilités d'occurrence de séismes

---

<sup>1</sup> Mignan, A., Landtwing, D., Kästli, P., Mena, B., Wiemer, S., 2015. Induced seismicity risk analysis of the 2006 Basel, Switzerland, Enhanced Geothermal System project: Influence of uncertainties on risk mitigation. *Geothermics* 53, 133-146.

L'article sera publié en 2015 mais est déjà disponible en ligne:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375650514000613>

<sup>2</sup> Bethmann, F., Zingg, O., 2015. Technical Note: Assessment of the seismic risk induced by the geothermal project of Haute-Sorne. Version 26. Feb. 2015.

induits calculées dans les études de risque déterministe et probabiliste avec des fonctions de prédiction de l'intensité ressentie en surface. Cette méthode, en considérant toutes les combinaisons possibles des paramètres de manière systématique, permet de dériver un certain nombre de modèles (ou branches de l'arbre logique) mettant en relation le montant des dommages ou le risque de décès à leur probabilité d'occurrence. La médiane de tous les modèles calculés est considérée comme la meilleure estimation possible du risque présenté par le projet. Le choix des paramètres des modélisations a été réalisé en concertation avec le SED. La méthode a également fait l'objet d'une validation consistant à comparer les modèles obtenus à des dommages réels causés par des séismes naturels ou induits. Les modèles couvrent de manière satisfaisante le spectre des valeurs observées dans la nature.

## 2.1. Représentation de l'incertitude

Des tests de sensibilité ont également été réalisés pour déterminer les facteurs influençant le plus fortement les résultats. Il en ressort que le degré d'incertitude dite « aléatoire » et liée à la nature stochastique des phénomènes naturels est le facteur influençant le plus fortement les résultats des calculs. Cette incertitude, incluse dans les équations, s'exprime en termes d'unités d'intensité épiscoptrale<sup>3</sup> par rapport à la médiane. Il est alors important de savoir si cette incertitude est correctement capturée par une variabilité de  $\pm 1$  ou 2 unités d'intensité autour de la médiane. La question de la variabilité de l'incertitude aléatoire ne fait pas l'unanimité parmi les spécialistes. Nous sommes d'avis que l'incertitude aléatoire est représentée au plus juste par une variabilité de  $\pm 1$  unité d'intensité. Cette conclusion est soutenue par l'étude des données des séismes induits de Bâle et de St-Gall. Une variabilité de  $\pm 2$  unités d'intensité est généralement admise dans les études de risque sismique probabilistes. Pour cette raison, et afin de considérer une grande marge de sécurité, nous avons choisi par la suite de montrer les résultats pour les deux variabilités différentes. Ceci illustre également l'influence de ce paramètre sur les résultats des calculs. Le degré d'incertitude aléatoire caractérisant le projet pourra être établi avec plus de précision après la réalisation du test de stimulation.

En plus de l'incertitude aléatoire, le « stress drop » est le paramètre influençant le plus l'incertitude dite épiscoptrique, à savoir les différents modèles calculés avec la méthode des arbres logiques. Le poids relatif accordé aux différentes branches de l'arbre logique joue également un rôle très important. Dans les deux cas, des hypothèses conservatrices ont été retenues.

Le test de stimulation qui sera effectué avant de procéder à la stimulation complète du réservoir aura notamment pour objectif de caractériser la réponse sismique du sous-sol à la stimulation hydraulique et de restreindre ainsi l'incertitude liée aux paramètres des modèles de cette étude<sup>4</sup>. Le

<sup>3</sup> L'Intensité épiscoptrale est l'intensité ressentie à l'aplomb du séisme et mesurée sur l'échelle EMS-98. Son établissement est une étape intermédiaire dans le calcul des dommages correspondant à une magnitude donnée.

<sup>4</sup> Si les résultats du forage de la section verticale du puits précédant ce test livreront des résultats importants pour la suite du projet, ils n'apporteront par contre pas de données permettant une réévaluation du risque. Seul le test de stimulation pourra délivrer ces éléments.

test de stimulation est un élément clef de la sécurité de ce projet et est décrit de manière détaillée dans l'étude de risque sismique. Il prévoit une approche très prudente par l'injection successive de petits volumes d'eau pour mesurer la réaction du sous-sol.

### 3. Résultats

#### 3.1. Scénarios de dommages pour des événements de magnitude 4 et 5 (1<sup>ère</sup> recommandation du SED)

Afin de représenter les dommages que pourraient causer des séismes de magnitude 4 ou 5, la méthode décrite ci-dessus est utilisée. Elle permet de fournir la meilleure estimation possible et la marge d'incertitude des dommages en fonction de la magnitude d'un séisme (Figure 1).

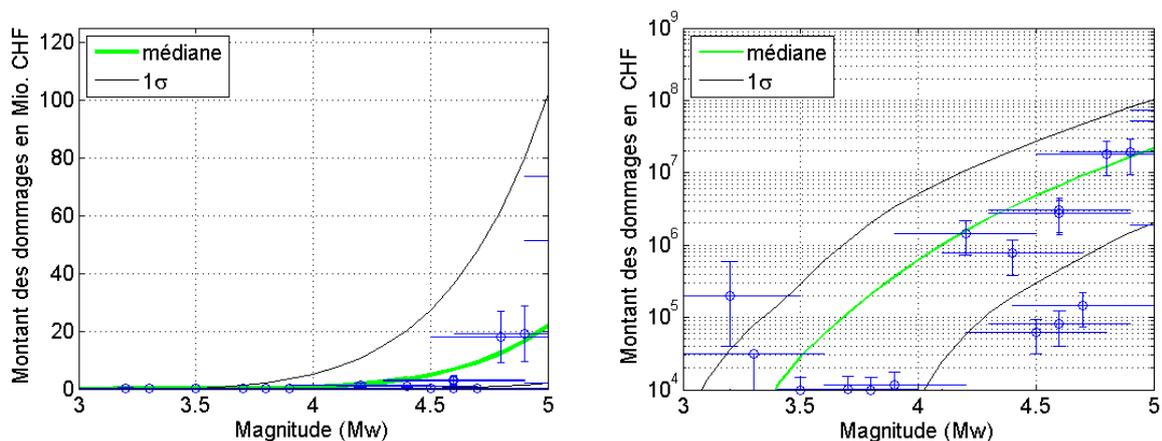


Figure 1: Représentation de la meilleure estimation possible des dommages en fonction de la magnitude d'un séisme, en vert, avec sa marge d'incertitude (de  $\pm 1$  écart-type  $\sigma$ ), en noir. Il s'agit de la médiane de tous les modèles physiques calculés par la méthode des « arbres logiques » de Mignan. Un certain nombre de séismes documentés dans la littérature et le montant des dommages qu'ils ont provoqués ont également été représentés sur cette figure (points bleus) avec leur marge d'incertitude (croix bleues). Les valeurs ont été corrigées en fonction de la profondeur du foyer du séisme et de la densité de la population pour les rendre comparables avec la situation en Haute-Sorne. La représentation logarithmique des dommages (à droite) permet une meilleure visualisation des faibles dommages (< 1 Mio. CHF).

Ces calculs permettent de dériver pour des séismes de magnitude 4 et 5 les montants des dommages suivants :

Magnitude	Valeur inférieure ( $1\sigma$ )	Médiane	Valeur supérieure ( $1\sigma$ )
M=4.0	<10'000 CHF*	<b>0.62 Mio. CHF</b>	5.2 Mio. CHF
M=5.0	2.2 Mio. CHF	<b>21.7 Mio. CHF</b>	102.3 Mio. CHF

\*En deçà de la résolution de cette méthode

Les calculs ci-dessus ne disent par contre rien de la probabilité d'occurrence de tels scénarios, ce qui nous renvoie au chapitre suivant.

## 3.2. Représentation probabiliste du risque de dommages (2<sup>ème</sup> recommandation du SED) et comparaison avec le cadre de l'OPAM

### 3.2.1. Risque probabiliste de dommages

Afin de répondre à cette demande, les modèles mettant en relation magnitude et montant des dommages du chapitre précédant ont été combinés avec les relations de probabilité d'occurrence des séismes établies dans le cadre de l'étude de risque sismique.

Les résultats sont présentés pour la stimulation de la première fissure ainsi que pour la stimulation de la totalité du réservoir (30 fissures). La représentation du risque est plus réaliste pour la stimulation de la première fissure. En effet, celle-ci sera stimulée dans le cadre d'un test de stimulation. L'étude de risque sera alors mise à jour et le projet adapté en fonction des résultats du test de stimulation. Pour l'heure, le risque représenté par la stimulation complète du réservoir correspond simplement et de manière conservatrice à la multiplication par 30 des probabilités de dépassement calculées pour le test de stimulation.

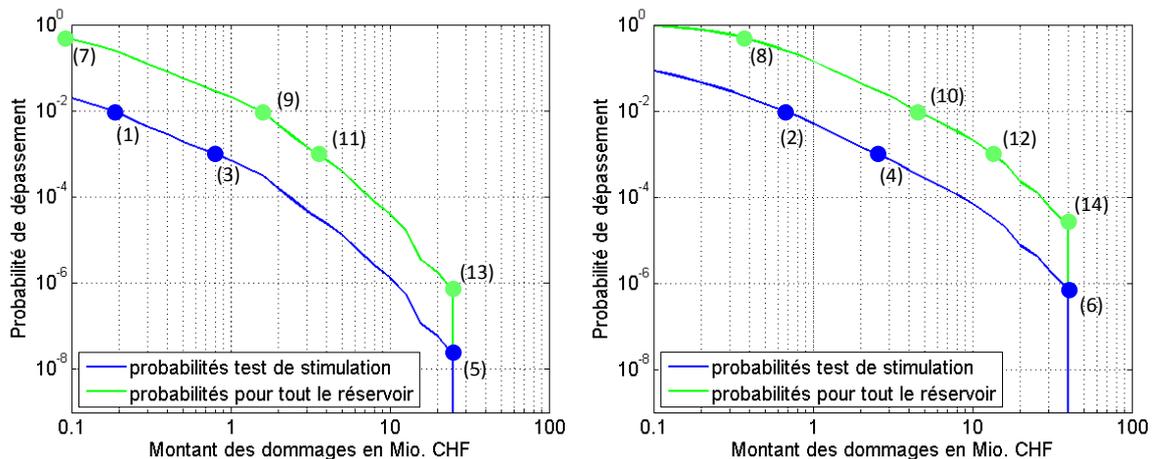


Figure 2: Probabilité de dépassement d'un certain montant des dommages. La figure de gauche représente les résultats des calculs pour une variabilité de  $\pm 1$  unité d'intensité (u.i.), celle de droite pour une variabilité de  $\pm 2$  unités d'intensité (u.i.). La courbe bleue représente la probabilité pour la première fissure (test de stimulation). La courbe verte représente la probabilité pour la stimulation du réservoir entier (30 fissures). Chaque courbe représente la médiane de tous les modèles calculés et est considéré comme la meilleure estimation possible du risque.

- ➔ Un montant des dommages de 10'000 CHF (1 et 2 unités d'intensité, u.i.) a une probabilité de 50 % d'être dépassé lors de la stimulation de la première fissure\*
- ➔ Un montant des dommages de 180'000 CHF (1u.i., point 1) / 669'000 CHF (2u.i., point 2) a une probabilité de 1 % d'être dépassé lors de la stimulation de la première fissure
- ➔ Un montant des dommages de 790'000 CHF (1u.i., point 3) / 2.5 Mio. CHF (2u.i., point 4) a une probabilité de 0.1 % d'être dépassé lors de la stimulation de la première fissure

- ➔ Un montant des dommages de 88'000 CHF (1u.i., point 7) / 365'000 CHF (2u.i., point 8) a une probabilité de 50 % d'être dépassé lors de la stimulation du réservoir entier
- ➔ Un montant des dommages de 1.6 Mio. CHF (1u.i., point 9) / 4.6 Mio. CHF (2u.i., point 10) a une probabilité de 1 % d'être dépassé lors de la stimulation du réservoir entier
- ➔ Un montant des dommages de 3.5 Mio CHF (1u.i., point 11) / 13.5 Mio. CHF (2u.i., point 12) a une probabilité de 0.1 % d'être dépassé lors de la stimulation du réservoir entier
- ➔ *Ces valeurs seront actualisées sur la base des résultats du test de stimulation.*

\*En deçà de la résolution de cette méthode

Chaque modèle, ou branche, de « l'arbre logique », possède un montant maximal des dommages en fonction la magnitude maximale possible de la relation de probabilité d'occurrence considérée. En conséquence, la médiane de ces modèles représentée sur la figure ci-dessus montre également une valeur maximale au-delà de laquelle la courbe ne peut plus être extrapolée. Ceci s'exprime par le trait vertical qui termine la courbe de probabilité sur la figure précédente.

- ➔ Le montant maximal des dommages lors de la stimulation de la première fissure est de CHF 25.1 Mio. associé à une probabilité de  $2.1 \cdot 10^{-8}$  (1u.i., point 5), respectivement de CHF 39.8 Mio. associé à une probabilité de  $6.3 \cdot 10^{-7}$  (2u.i., point 6)
- ➔ Le montant maximal des dommages lors de la stimulation du réservoir entier est de CHF 25.1 Mio. associé à une probabilité de  $6.2 \cdot 10^{-7}$  (1u.i., point 13), respectivement de CHF 39.8 Mio. associé à une probabilité de  $1.8 \cdot 10^{-5}$  (2u.i., point 14)

### 3.2.2. Risque de dommages dans le cadre de l'OPAM

Une évaluation des résultats selon la grille d'analyse de l'ordonnance sur la protection contre les accidents majeurs (OPAM) a été expressément souhaitée par les autorités cantonales. L'ordonnance s'applique à des projets industriels présentant un risque conséquent pour la population, le patrimoine ou l'environnement lors de la fabrication, de la manipulation, du stockage, du transport ou de l'élimination de substances ou d'organismes dangereux. Tombent sous le coup de cette ordonnance et à partir de certains seuils quantitatifs, des substances présentant un danger pour l'homme ou l'environnement (toxicité, explosivité, etc...). L'ordonnance définit un domaine d'acceptabilité des risques en fonction de leur probabilité d'occurrence. Bien que le projet de géothermie ne soit pas soumis à l'OPAM et que les critères de cette ordonnance n'aient pas été définis pour traiter de la sismicité induite, une comparaison est tentée ci-dessous.

Il est à noter que l'OPAM considère des probabilités d'occurrence cumulative annualisées associées à des risques permanents ou récurrents. Le cas de la stimulation du réservoir géothermique est différent car le risque est présent durant une période limitée dans le temps. Dans les sections suivantes, les résultats sont calculés pour la durée de la stimulation du réservoir et n'ont pas été annualisés, ce qui représente une approche conservatrice.

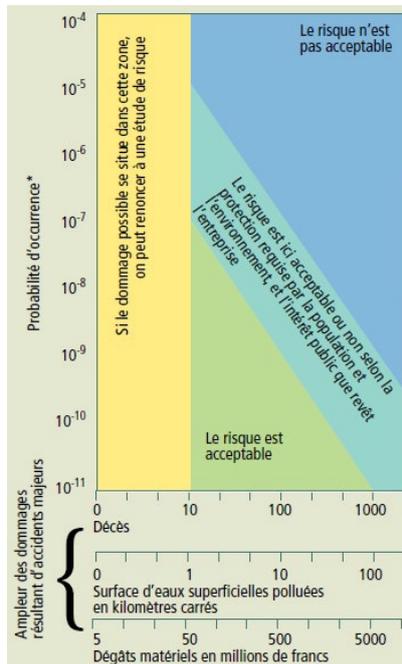


Figure 3: Classification de l'acceptabilité des risques selon l'OPAM. La limite des dommages matériels de CHF 50 Mio. est indexée sur les coûts de 1996 et doit être adaptée aux coûts actuels. Source : Critères d'appréciation I pour l'ordonnance sur les accidents majeurs OPAM, Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage OFEFP Berne, 1996.

En partant des graphiques de la Figure 2 pour la stimulation de la totalité du réservoir et en modifiant légèrement l'échelle verticale pour représenter la probabilité d'occurrence cumulative (au lieu de la probabilité de dépassement) d'un certain dommage, on obtient la figure ci-dessous qui permet une comparaison avec la grille d'évaluation de l'OPAM. La valeur maximale pour la stimulation de la totalité du réservoir (30 fissures) est de CHF 25.1 Mio. (1 unité d'intensité), respectivement de CHF 39.8 Mio. (2 unités d'intensité).

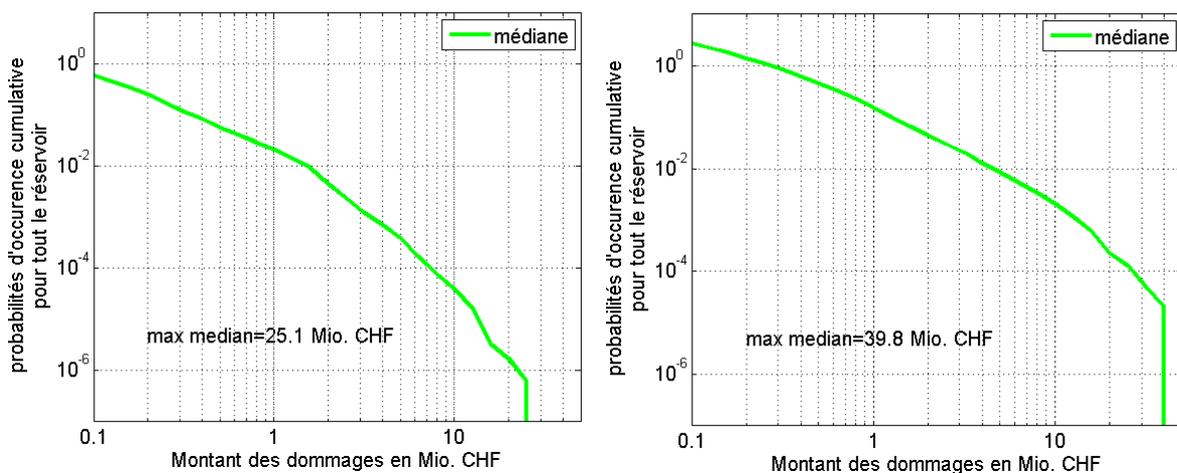


Figure 4: Probabilité d'occurrence cumulative d'un certain montant des dommages lors de la stimulation du réservoir entier (30 fissures). La figure de gauche représente les résultats des calculs pour une variabilité de  $\pm 1$  u.i., celle de droite pour une variabilité de  $\pm 2$  u.i.. Chaque courbe représente la médiane de tous les modèles.

Le domaine de caractérisation d'un accident majeur selon l'OPAM commence à partir de 50 Mio. de CHF (valeur 1996) correspondant à CHF 64 Mio. aujourd'hui<sup>5</sup>. Il est également à noter que le seul critère des dommages matériels, c'est-à-dire lorsque l'estimation des pertes humaines est inférieure à 10, n'a jamais été appliqué pour l'évaluation du risque dans le cadre de l'OPAM en Suisse (Serianex, AP 6000<sup>6</sup>).

→ Au sens de l'OPAM, le montant des dommages matériels que pourrait causer le projet est dans tous les cas acceptable.

### 3.3. Représentation probabiliste du risque de décès dans le cadre de l'OPAM et en tant que risque individuel

#### 3.3.1. Risque de décès dans le cadre de l'OPAM

Le Service Sismologique Suisse travaille avec des relations d'évaluation de la mortalité potentielle en fonction de l'intensité d'un séisme de la même manière que le montant des dommages peut être estimé en fonction de cette intensité. Ces fonctions ont été substituées aux fonctions de calcul des dommages dans les « arbres logiques » calculés dans le cadre de cette étude. Les résultats montrent que la valeur médiane des résultats est dans tous les cas inférieure à 1 décès et n'a donc pas de pertinence statistique<sup>7</sup>.

Le seuil inférieur de caractérisation d'un accident majeur au sens de l'OPAM est de 10 morts.

→ Au sens de l'OPAM, le risque représenté par le projet pour les personnes est dans tous les cas acceptable.

#### 3.3.2. Risque individuel

L'évaluation du risque de décès collectif selon l'OPAM ne permet pas de se rendre compte du risque individuel qu'il représente, à savoir le risque auquel est exposé un individu habitant à proximité du projet. Sur recommandation de l'OFEV, le risque individuel a donc été calculé. C'est le critère du risque individuel qui est utilisé dans l'appréciation de l'acceptabilité du risque lié aux éléments naturels. Ce paramètre pourrait donc également aider à juger de l'acceptabilité du risque de décès causé par le projet de géothermie à Haute-Sorne.

<sup>5</sup> L'indexation du seuil de l'OPAM est calculée sur la base de l'indice des prix de la construction fourni par l'Office fédéral de la statistique (Suisse entière et tous types de construction confondus). Pour les deux années d'indice manquantes (1996 et 1997), l'indice des prix à la consommation a été utilisé.

<sup>6</sup> Baisch, S., Carbon, D., Dannwolf, U., Delacou, B., Devaux, M., Dunand, F., Jung, R., Koller, M., Martin, C., Sartori, M., 2009. Deep Heat Mining Basel: Seismic Risk Analysis, SERIANEX Group. Département für Wirtschaft, Soziales und Umwelts des Kantons Basel-Stadt, Basel.

<sup>7</sup> Pour la stimulation de tout le réservoir, une valeur maximale de 0.013 pertes humaines correspondant à une probabilité de  $1.9 \cdot 10^{-5}$  a été calculée avec une variabilité de  $\pm 2$  unités d'intensité.

Dans ce cas également, la méthode de calcul s'appuie sur les arbres logiques. Au lieu d'utiliser les données statistiques des bâtiments de la région et de l'effet des différents types de sols de fondation, des hypothèses conservatrices sont posées pour un cas individuel, à savoir celui d'une personne se trouvant en permanence dans un bâtiment ancien et vulnérable construit sur un sol ayant un haut facteur d'amplification à l'aplomb direct du foyer d'un tremblement de terre se produisant à très faible profondeur (3.5 km). La méthode est décrite en détail dans la note technique.

La meilleure estimation du risque individuel de décès, définie comme la médiane des modèles de risque basés sur les hypothèses conservatrices décrites ci-dessus se monte à  $9.5 \cdot 10^{-9}$  pour la stimulation de la totalité du réservoir. Cette manière de calculer le risque en utilisant un scénario pessimiste est plus conservatrice que l'approche utilisée dans les calculs précédents et se basant sur des hypothèses moyennes auxquelles sont ajoutées une incertitude aléatoire de 1 ou 2 unités d'intensité.

La comparaison de cette valeur avec les limites d'acceptabilité définies dans le monde pour des risques naturels ou technologiques montre que ce risque ( $\sim 10^{-8}$ ) est inférieur au moins d'un facteur 100 en comparaison avec les limites les plus basses admises dans le monde ( $10^{-6}$ ). Qui plus est, la présente étude se base sur des hypothèses très conservatrices.

Il est évident qu'en aucun cas la perte de vies humaines n'est envisagée pour un tel projet et que toutes les mesures de sécurité sont prises pour exclure un tel scénario tout comme celui d'importants dommages matériels. Les considérations ci-dessus reflètent toutefois de la nécessité de quantifier au mieux le risque sur la base des connaissances actuelles pour pouvoir le comparer à d'autres risques naturels ou industriels et ainsi évaluer son acceptabilité.

**→ En comparaison avec d'autres risques naturels ou technologiques, le risque individuel de décès présenté par le projet de géothermie est largement acceptable.**

### 3.4. Conclusion

Les recommandations de Service Sismologique Suisse ainsi que les diverses requêtes du Canton et de l'OFEV ont permis une représentation synthétique du risque de dommages matériels et de décès posé par le projet de géothermie profonde de Geo-Energie Suisse en Haute-Sorne.

Les calculs effectués permettent de montrer que la meilleure estimation possible du risque de dommages matériels (valeur médiane des modèles calculés) pour le test de stimulation et pour la stimulation de tout le réservoir est toujours inférieure au seuil d'entrée de l'ordonnance sur la protection contre les accidents majeurs (OPAM). Les courbes de risque calculées dans cette étude offrent à l'Autorité une base pour définir l'acceptabilité du risque, également pour les dommages inférieurs au seuil de l'OPAM.

Les calculs du risque de décès, qu'il s'agisse d'un risque collectif dans le cadre de l'OPAM ou d'un risque individuel, montrent des valeurs extrêmement basses, en deçà d'une signification statistique

pour le risque collectif et d'au moins un facteur 100 inférieur aux valeurs conservatrices généralement admises dans le monde pour le risque individuel.

Les calculs réalisés dans cette étude reposent sur des méthodes représentant le meilleur état de l'art actuel. Ils dépendent toutefois de paramètres ayant parfois une grande marge d'incertitude conduisant à des modèles de risque présentant une forte variabilité. Le choix de la courbe médiane de tous les modèles calculés représente la meilleure estimation possible du risque. Il est prévu que le risque soit régulièrement réévalué au cours de l'avancement du projet lorsque de nouvelles données seront disponibles qui permettront de réduire l'incertitude sur les paramètres des modèles. Le test de stimulation, en particulier, permettra un préciser de nombreux paramètres avant de procéder à la stimulation de tout le réservoir. Il constitue un élément central de la sécurité du projet.

**Nous rappelons finalement ce fait cité par le Service Sismologique Suisse dans son rapport d'évaluation : « *It is a fact that deep geothermal energy projects have so far caused no structural damages to buildings nor harmed people.* »**