HAL
open science

# Etat des lieux des risques, impacts et nuisances liés à la géothermie profonde

Philippe Gombert, Franz Lahaie, Auxane Cherkaoui

## To cite this version:

Philippe Gombert, Franz Lahaie, Auxane Cherkaoui. Etat des lieux des risques, impacts et nuisances liés à la géothermie profonde. 9. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur (JNGG 2018) "Ressources et aménagement : quelles limites ?", Jun 2018, Marne la Vallée, France. ineris-01863348

**HAL Id: ineris-01863348**

**https://ineris.hal.science/ineris-01863348**

Submitted on 28 Aug 2018

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# ETAT DES LIEUX DES RISQUES, IMPACTS ET NUISANCES LIES A LA GEOTHERMIE PROFONDE

## *CURRENT KNOWLEDGE ABOUT THE RISKS, THE IMPACTS AND THE POTENTIAL NUISANCES ASSOCIATED WITH DEEP GEOTHERMAL ENERGY*

Philippe GOMBERT[1], Franz LAHAIE[2], Auxane CHERKAOUI[1]
[1] *INERIS, Verneuil-en-Halatte, France*
[2] *INERIS, Nancy, France*

**RÉSUMÉ –** La géothermie profond est amenée à se développer dans le cadre de la transition énergétique. Comme toute activité industrielle, elle s'accompagne d'impacts et de nuisances potentielles et d'un certain nombre de risques accidentels pour l'homme et l'environnement. Ceux-ci doivent être clairement identifiés et maîtrisés dans le but de rendre cette activité compatible avec les attentes et les exigences des citoyens.

**ABSTRACT –** Deep geothermal drilling is growing in the context of energetic transition. Like any industrial activity, it is coming with potential impacts and nuisances and a number of possible accidental risks for people and the environment. These risks have to be clearly identified and controlled in order to make this activity fully compatible with the expectations and the needs of the citizens.

### 1. Introduction

La géothermie profonde est une source d'énergie renouvelable et non intermittente qui peut contribuer à la transition mondiale vers un mix énergétique moins carboné et moins émetteur de gaz à effets de serre. Seule une faible part du potentiel géothermique mondial est aujourd'hui exploité et de nombreux de pays, dont la France, ont inscrit dans leurs objectifs un développement accéléré de cette activité dans les prochaines décennies (DGEC, 2016).

Comme toute activité industrielle, la géothermie profonde s'accompagne de nuisances et de risques potentiels pour les personnes et l'environnement, qu'il convient de bien identifier et maîtriser pour rendre cette activité compatible avec les attentes et les besoins des citoyens. Or, on a vu ces dernières années s'exprimer certaines inquiétudes au sujet de certains projets de géothermie profonde, notamment à haute température.

### 2. Accidentologie

Un recensement des accidents ou incidents reportés dans le domaine de la géothermie profonde fait état de 35 événements, dont 32 ont été jugés pertinents pour les conditions actuelles de sécurité de cette industrie (Gombert et al, 2017) : ils ont provoqué 1 mort et 9 blessés, en près de trois décennies de retour d'expérience et sur environ 1700 centrales géothermiques actuellement en fonctionnement dans le monde. Les autres types de conséquences sont des dommages matériels en surface (fissures sur bâtis ou infrastructures), des pollutions locales ou des impacts psychologiques sur les habitants (dus à la sismicité induite, voir § 4.3). La géothermie profonde bénéficie donc d'une accidentologie assez faible.

Sur un plan plus qualitatif, plus de la moitié des événements recensés sont des séismes ressentis (34%) ou des mouvements de la surface du sol (23%) lié à des désordres géomécaniques dans le sous-sol. Les autres types d'événements sont des

rejets toxiques en surface ou des contaminations d'aquifères souterrains. La plupart d'entre eux sont propres à toute activité d'exploitation des ressources du sous-sol par forages (hydrocarbures, stockage en aquifère, captage d'eau souterraine, etc..) et ne sont donc pas spécifiques à la géothermie profonde : cependant, elle offre des conditions plus propices à certains types d'accidents (ou de nuisances) et moins propices à d'autres.

### 3. Nuisances et impacts chroniques potentiels

De même que précédemment, les nuisances ou impacts chroniques potentiellement générés par une installation de géothermie profonde ne sont généralement pas spécifiques à la géothermie (Gombert et al, 2017). Il s'agit de :

- l'impact paysager, important au moment de la foration des ouvrages et de la réalisation des essais ; en phase d'exploitation, une centrale géothermique est un site industriel de taille assez modeste, comprenant un à quelques bâtiments, qui peuvent s'intégrer relativement facilement dans un paysage, notamment urbain.
- le bruit, les vibrations et un trafic routier additionnel (camions) peuvent être ressentis comme une source de nuisances par les riverains ; ces nuisances restent toutefois limitées à une période de quelques mois à un an maximum ; en phase d'exploitation, le bruit généré par une centrale géothermique reste généralement modéré, et non perceptible, notamment du fait de la construction de bâtiments anti-bruit. Toutefois, sur certains sites, en particulier en géothermie électrogène, des nuisances sonores dues au fonctionnement de certains appareils (turbines, ventilateurs, etc.) peuvent demeurer.
- l'impact sur la faune et la flore locale ; il revient à l'exploitant d'en faire l'évaluation dans son étude d'impact. Il faut toutefois noter que les sites géothermiques sont souvent situés dans des zones déjà urbanisées ou industrialisées, ce qui limite en général les impacts additionnels liés à la centrale.
- la ressource en eau est globalement peu impactée, au plan quantitatif, par la réalisation de forages ou par l'exploitation d'une centrale géothermique. Les phases les plus consommatrices d'eau sont les opérations de stimulation hydraulique, qui peuvent nécessiter plusieurs dizaines de milliers de $m^3$ d'eau. Là encore, il revient à l'exploitant d'évaluer l'impact de ces prélèvements dans le contexte spécifique du site. Sur le plan qualitatif, sauf rejets accidentels, la foration des ouvrages, la réalisation des essais ou l'exploitation du site n'ont pas lieu de mener à une dégradation de la qualité des nappes aquifères ou des eaux en surface.
- hors contexte accidentel, les principales émissions de gaz liées à une exploitation géothermique sont liées au dégazage du fluide géothermal. Un tel dégazage se produit, par exemple, lors des essais de production, opérations pendant lesquelles du fluide géothermal est pompé et stocké dans un bassin temporaire en surface. Ces essais se déroulent sur une période limitée, allant de quelques jours à quelques semaines. Pour les sites volcaniques à haute température, ces émissions peuvent en revanche se prolonger sur toute la phase d'exploitation. Dans tous les cas, ces émissions doivent être analysées et leur impact sur la qualité de l'air évalué dans le contexte spécifique de chaque site.
- en ce qui concerne le bilan carbone, la géothermie profonde bénéficie d'un bilan fortement positif : les émissions totales de $CO_2$ calculées sur toute la vie d'un projet géothermique varient entre 17 et 60 g/kWh produit, soit un à deux ordres de grandeur de moins que le pétrole ou le charbon.
- enfin, en ce qui concerne la radioactivité, le fluide géothermal peut faire remonter en surface du radon et du radium, susceptible d'engendrer un rayonnement radioactif à travers les équipements et canalisations qui transportent ce fluide (circuit primaire). Ceci ne constitue pas un risque pour les riverains mais cela en est un pour les travailleurs, qui doivent faire l'objet de mesures de radioprotection et de suivi, conformément aux règles en vigueur dans toutes les industries extractives.

## 4. Principaux risques accidentels

### *4.1. Le risque de rejet accidentel de fluides en surface*

La construction ou l'exploitation d'un site de géothermie profonde comporte des risques d'émissions gazeuses ou d'épanchements de fluides en surface, qu'il convient de maîtriser. Ces risques peuvent être de diverses natures.

Le risque d'une éruption de forage est à prendre en considération, même s'il est moins prégnant ici que dans le domaine des forages d'hydrocarbures car le but n'est pas la recherche d'un gisement sous pression. Néanmoins, tout forage profond peut traverser des formations contenant du gaz en surpression. L'exemple de Saint-Gall, en 2013, montre qu'une venue de gaz sous pression est toujours difficile à maîtriser (Moeck et al., 2015). En contexte volcanique, on a recensé des cas d'éruptions de fluides qui ont conduit à des accidents graves en géothermie profonde : Agua Shuca au El Salvador (Escobar et al., 1992 ; Goff & Goff, 1997) en 1990, Zunil 1 au Guatemala (Goff & Goff, 1997 ; Flynn et al., 1991) en 1991, Puna 2 à Hawaii en 1991 (Essoyan, 2002). Il s'avère donc nécessaire que les forages de géothermie profonde soient réalisés dans les mêmes conditions de sécurité, que les forages d'hydrocarbures, ce qui est déjà le cas en France.

Un chantier de géothermie comporte également des risques de fuites ou de débordement de réservoirs en surface, à l'instar de tout chantier de forage. La gestion de ces risques est classique dans le domaine des activités industrielles impliquant des stockages en surface, et elle ne présente pas de difficultés spécifiques à la géothermie.

Des fuites peuvent également survenir sur les équipements et canalisations des circuits primaire (fluide géothermal) ou secondaire (fluide caloporteur). La géothermie ne présente pas de spécificités par rapport à d'autres domaines industriels impliquant des transports de fluides. Cependant, du fait de l'agressivité du fluide géothermal, le circuit primaire est ici plus exposé à ce type de fuites, ce qui nécessite une surveillance accrue.

Enfin, un dégazage accidentel du fluide géothermal (par exemple suite à une fuite de celui-ci) est un risque à considérer, notamment lorsqu'il se produit en milieu confiné. Il peut en découler des impacts graves pour le personnel (intoxication, asphyxie), comme cela s'est produit au Japon en 1998 (Kage et al., 1998).

### *4.2. Le risque de contamination d'aquifères sensibles*

La contamination directe d'un aquifère au droit d'une exploitation géothermique profonde peut survenir suite à deux types d'événements.

Premièrement, une perte d'étanchéité longitudinale du forage peut induire la mise en communication d'aquifères de pression différente. Cela peut résulter d'une cimentation défectueuse (en phase d'exploitation) ou de défauts affectant les bouchons d'obturation du forage (en phase post-abandon). Bien que non spécifique à la géothermie, ce risque constitue un enjeu majeur de la sécurité des forages profonds, notamment dans le contexte sédimentaire (ex., le bassin de Paris). La conception, la mise en place et le bon contrôle des cimentations annulaires et des bouchons de ciment, font partie des points qui doivent susciter une attention particulière dans tout forage profond.

Deuxièmement, une fuite latérale d'un forage peut conduire à la contamination d'un aquifère sensible. Elle peut résulter du percement ou de la rupture d'un cuvelage, scénario particulièrement à suivre dans le cas des forages de géothermie profonde, où le cuvelage est en contact direct avec le fluide géothermal et de ce fait d'avantage exposé à la corrosion ainsi que, dans le cas de la géothermie haute température, aux effets thermomécaniques. La corrosion a ainsi affecté plusieurs puits de géothermie en Ile-de-France et a conduit à certains incidents, notamment celui de Coulommiers en 1996 (Vernoux et al., 2002).

### *4.3. Le risque de désordres et de secousses sismiques ressenties en surface*

L'exploitation d'un site de géothermie profonde peut générer des désordres géomécaniques en surface, de natures et d'origine diverses.

La sismicité induite est un des risques perçus par les riverains comme le plus important même si cela n'a jamais occasionné que des dégâts légers sur des bâtiments. Ce risque apparaît principalement lors des opérations de stimulation (en particulier hydraulique) mais il peut perdurer pendant la phase d'exploitation. Les retours d'expérience des événements sismiques ressentis à Soultz-sous-Forêts (Cuenot, 2012 ; ESG, 2015), Bâle (Häring, 2008) ou Saint-Gall (Moeck et al., 2015) permettent de mieux comprendre les mécanismes qui entrent en jeu dans le déclenchement de la sismicité induite, ainsi que des facteurs qui sont à l'origine des craintes suscitées auprès des habitants.

Une autre source de désordres de nature géomécanique peut provenir de la mise en contact d'une formation sensible à l'eau avec un fluide en déséquilibre chimique avec celle-ci (eau douce, eau géothermale, etc.). Il peut s'agir d'une formation sensible à la dissolution (évaporites) ou sensible à l'hydratation (gypse, certaines argiles).

Comme précédemment, ce scénario peut se produire en cas de perte d'étanchéité du forage. Il peut en résulter un soulèvement de la surface du sol (en cas de gonflement dû à une hydratation) ou un abaissement de la surface du sol (en cas de dissolution). Dans les deux cas, des dommages importants peuvent être occasionnés aux bâtiments, aux réseaux ou aux infrastructures en surface. Dans le domaine de la géothermie superficielle, des incidents de ce type se sont récemment produits à Lochwiller (Catoire et al., 2017), Staufen (Weber, 2011) ou Kirchheim (Miguet, 2014 ; Catoire et al., 2017). Il s'agit toutefois d'un risque qui relève de la bonne isolation des formations sensibles traversées par un forage, quelle que soit sa nature.

Un soulèvement ou une subsidence de la surface du sol peut également émaner d'effets poroélastiques, respectivement liés à la surpression ou à la dépression susceptible d'être induite au niveau du réservoir géothermique. Le risque de subsidence liée à une dépression importante se manifeste lorsque le fluide géothermal n'est que partiellement (ou pas du tout) réinjecté dans son aquifère d'origine. Cela se rencontre plus particulièrement sur les sites géothermiques de types volcaniques, où la réinjection est fréquemment incomplète et où des cas de subsidence importante (jusqu'à plusieurs mètres) ont été observées au droit de certains sites de production. Il convient toutefois de noter que ces cuvettes de subsidence se développent lentement et que leurs conséquences peuvent être donc anticipées et maîtrisées.

Sur certains sites de géothermie réalisés dans des contextes montagneux, on relève également l'occurrence d'incidents de type glissement de terrain. Là encore, ce risque n'est pas spécifique à la géothermie et relève du choix plus général de l'implantation de forages profonds par rapport à des zones à risques naturels, en l'occurrence de mouvements de terrain.

## 5. Analyse comparative des risques, impacts et nuisances liés à la géothermie profonde

L'ensemble des risques, impacts et nuisances mentionnés sont synthétisés dans les tableaux 2 et 3, avec une échelle d'appréciation permettant de les comparer en termes de probabilité d'occurrence et de gravité des conséquences qu'ils pourraient avoir.

Cette appréciation repose sur une échelle de 4 valeurs, fournie dans le tableau 1. Elle est proposée pour chaque phase de vie d'un site géothermique (foration, essais, exploitation, post-abandon). Il s'agit toutefois d'une appréciation générique qui n'a pas vocation à se substituer à l'analyse spécifique qui doit être réalisée sur chaque site.

Tableau 1. Critères d'appréciation des risques-impacts-nuisances liés à la géothermie profonde (Gombert et al, 2017)

| Probabilité | | Gravité | |
|---|---|---|---|
| ● | P0 : peu plausible et jamais observé. | ■ | G0 : pas de gêne ressentie ni d'impact notable sur les biens ou l'environnement |
| ● | P1 : peu probable avec les techniques ou pratiques récentes mais déjà observé au moins une fois. | ■ | G1 : gêne limitée, impact environnemental de faible intensité ou peu étendu[a] |
| ● | P2 : probable sur la durée de vie du système même avec des techniques ou pratiques récentes. | ■ | G2 : gêne significative, impact chronique sur la santé, dommages non structurels[b] aux biens, impact environnemental d'intensité et d'étendue significatives[c] |
| ● | P3 : très probable, peut même se produire plusieurs fois pendant la durée de vie du système. | ■ | G3 : atteinte à la sécurité des personnes, dommages structurels aux biens, impact environnemental d'intensité et d'étendue importantes[d] |

[a] limité à l'emprise du site ou de l'ordre de la dizaine de mètres alentour
[b] qui ne portent pas atteinte à l'intégrité globale des bâtiments ou infrastructures
[c] de l'ordre de quelques dizaines à centaines de mètres autour du site
[d] au-delà de plusieurs centaines de mètres autour du site

Tableau 2. Nuisances et impacts chroniques potentiels liés à la géothermie profonde (Gombert et al, 2017)

Légende : ■ Gravité[1] s. o. = sans objet

| **Impacts chroniques ou nuisances** | **Foration** | **Essais** | **Exploitation** | **Abandon** |
|---|---|---|---|---|
| Impact paysager et occupation du sol | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Bruit | ■ | ■ | ■ | *s. o.* |
| Trafic routier | ■ | ■ | ■ | *s. o.* |
| Impact sur les écosystèmes | ■ | ■ | ■[b] | ■[a] |
| Impact sur la ressource en eau | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Emissions de gaz et d'odeurs | ■ | ■ | ■ | ■[a] |
| Impact carbone | ■ | ■ | ■ | *s. o.* |
| Radioactivité pour les travailleurs | ■ | ■ | ■ | *s. o.* |

[a] sauf en cas de fuite chronique de fluide géothermal liée à un mauvais bouchage ou à une dégradation du bouchage (vieillissement).
[b] sauf en cas de réinjection incomplète ou de non réinjection du fluide géothermal.

[1] La notion de probabilité n'est pas pertinente pour ce tableau puisqu'on est ici dans le domaine chronique.

*Tableau 3. Risques et impacts accidentels potentiels liés à la géothermie profonde (Gombert et al, 2017)*

*Légende :* ● *Probabilité* ■ *Gravité* *s. o. = sans objet*

| **Evènement ↓** | **Phase →** | **Foration** | **Essais** | **Exploitation** | **Abandon** |
|---|---|---|---|---|---|
| **Risque d'émanations gazeuses ou d'épanchements accidentels en surface** | | | | | |
| Eruption de fluides en surface | | ● ■ | ● ■ | ● ■ | *s. o.* |
| Fuite/débordement en surface | | ● ■ | ● ■ | ● ■ | *s. o.* |
| Fuite sur le circuit 1aire ou 2aire | | *s. o.* | *s. o.* | ● ■ | *s. o.* |
| Emission de gaz dissous | | ● ■ | ● ■ | ● ■ | ● ■ |
| **Risque de contamination de nappes d'eau souterraine** | | | | | |
| Mise en communication d'aquifères | | ● ■ | ● ■ | ● ■ | ● ■ |
| Fuite du forage dans un aquifère | | ● ■ | ● ■ | ● ■ | ● ■ |
| **Risque de désordres en surface de nature géomécanique** | | | | | |
| Secousses sismiques | | ● ■ | ● ■ | ● ■ | *s. o.* |
| Soulèvement de la surface du sol[a] | | ● ■ | ● ■ | ● ■ | ● ■ |
| Abaissement de la surface du sol[a] | | ● ■ | ● ■ | ● ■ | ● ■ |
| Glissement de terrain | | ● ■ | ● ■ | ● ■ | ● ■ |

[a] Dans une approche majorante, les classes de probabilité attribuées à ces risques prennent en compte le retour d'expérience de la géothermie superficielle.

## 6. Conclusion

La géothermie profonde est une source d'énergie renouvelable et non intermittente qui peut contribuer à la transition vers un mix énergétique moins carboné et moins émetteur de gaz à effets de serre. Seule une faible part du potentiel géothermique mondial est aujourd'hui exploité et de nombreux de pays, dont la France, ont inscrit dans leurs objectifs un développement accéléré de cette activité dans les prochaines décennies.

Comme toute activité industrielle, la géothermie profonde s'accompagne de nuisances potentielles et d'un certain nombre de risques possibles pour les personnes et pour l'environnement, qu'il convient de bien identifier et de savoir maîtriser, afin de rendre cette activité pleinement compatible avec les attentes et les besoins des citoyens, en particulier des riverains de telles installations. Or, on a vu ces dernières années s'exprimer localement un certain nombre d'inquiétudes par rapport au développement de certains projets de géothermie profonde, notamment dans le domaine de la haute température, basées sur les risques et nuisances potentiels liés à cette industrie. Il existe également des confusions, dans l'esprit du public, avec des incidents récemment survenus dans le domaine de la géothermie superficielle.

Pourtant, au final, la géothermie profonde bénéficie d'une accidentologie assez faible. Les risques, impacts ou nuisances qu'elle est susceptible d'engendrer ne sont pas, pour la plupart, spécifiques à ce domaine mais inhérents à tout projet de forage profond comme ceux nécessaires à la recherche et à l'exploitation d'hydrocarbures ou de stockages souterrains profonds.

## 7. Bibliographie


Catoire S, Guignard P, Jean-Francois M, 2017. Modalités de gestion et d'indemnisation des dégâts occasionnés par un forage géothermique sur la commune de Lochwiller (Bas-Rhin). Rapport CGEDD n° 010788-01, CGE n° 2016/22/CGE/SG, janvier 2017.

Cuenot N, 2015. Sismicité induite et réseaux de surveillance du projet EGS de Soultz-sous-Forêts. GEIE Exploitation Minière de la Chaleur.

DGEC, 2016. Panorama Energies-Climat. Direction générale de l'énergie et du climat - Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie, édition 2016.

Escobar Bruno CA, Burgos JA, Ayala MS, 1992. Agua Chuca hydrothermal eruption. Geothermal Resources Council BULLETIN, December 1992: 361-399.

ESG, 2015. Microsismicité induite. és géothermie, http://www.es-geothermie.fr/var/ezflow_site/storage/original/application/2c412ade5282e243cb81d2e59b41b75f.pdf

Essoyan S, 2002. Blowout shuts geothermal unit in Hawaii. http://articles.latimes.com/1991-06-15/news/mn-503_1_puna-geothermal-venture

Flynn T, Goff F, Van Eeckhout E, Goff S, Ballinger J, Suyama J, 1991. Catastropic landslide at Zunil i geothermal field, Guatemala. Geothermal Resources Council Transactions, Vol. 15. October 1991.

Goff SJ, Goff F, 1997. Environmental impacts during geothermal development: some examples from Central America. NEDO Int. Geothermal Symp., Sendai, Japan, March 11-14, 1997.

Gombert P, Lahaie F, Cherkaoui A, 2017. Etat des connaissances sur les risques, impacts et nuisances potentiels liés à la géothermie profonde. Rapport INERIS DRS-16-157477-00515A, juillet 2017, www.ineris.fr

Häring MO, Schanz U, Ladner F, Dyer BC, 2008. Characterisation of the Basel 1 enhanced geothermal system, Geothermics 37 (2008): 469–495.

Kage S, Ito S, Kishida T, Kudo K, Ikeda N, 1998. A fatal case of hydrogen sulfide poisoning in a geothermal power plant. Journal of Forensic Sciences, July 1998, Vol. 43 Issue: 4: 908-910.

Miguet L, 2014. Géothermie : deux villages alsaciens sinistrés. Le Moniteur, http://www.lemoniteur.fr/article/geothermie-deux-villages-alsaciens-sinistres-23652043

Moeck I, Bloch T, Graf R, Heuberger S, Kuhn P, Naef H, Sonderegger M, Uhlig S, Wolfgramm M, 2015.The St. Gallen Project: Development of fault controlled geothermal systems in urban areas. Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, 19-25 April 2015.

Vernoux JF, Degouy M, Machard de Grammont H, Galin R, 2002. Etude bibliographique sur le suivi des risques engendrés par les forages profonds sur les nappes d'eau souterraine du bassin Seine-Normandie. Réf. BRGM/RP-51312-FR.

Weber KF, 2011. Réseau pour une ville déchirée en deux. Le magazine mondial de Leica Geosystems : 3-5.