

RAPPORT D'ÉTUDE  
DRS-16-157477-00515A

10/07/2017

**Etat des connaissances sur les risques, impacts  
et nuisances potentiels liés à la géothermie pro-  
fonde**

**INERIS**

*maîtriser le risque |  
pour un développement durable |*



# **Etat des connaissances sur les risques, impacts et nuisances potentiels liés à la géothermie profonde**

Direction des Risques du Sol et du Sous-sol

## **REMERCIEMENTS**

Nous remercions vivement Mme Judith SAUSSE, professeur au département de géoingénierie, laboratoire GEORESSOURCES, à MINES NANCY, pour sa relecture approfondie du présent rapport, ses conseils avisés et ses remarques constructives qui ont permis de l'améliorer de manière significative.

## PREAMBULE

Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalents qui seraient portés par l'INERIS dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Etant donné la mission qui incombe à l'INERIS de par son décret de création, l'INERIS n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'INERIS ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'INERIS dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.

	Rédaction	Vérification	Approbation
Nom	Philippe GOMBERT Franz LAHAIE Auxane CHERKAOUI	Régis FARRET Christian FRANCK	Pascal BIGARRE
Qualité	Ingénieurs à la Direction des Risques du Sol et du sous-sol	Respectivement, Responsable de l'unité « Eaux Souterraines et Emissions de Gaz » et Responsable de l'Appui Technique à la Direction des Risques du Sol et du sous-sol	Directeur des Risques du Sol et du Sous-sol
Visa			

**Autre personne ayant contribué à l'étude :** Zbigniew POKRYSZKA – Référent technique « Émissions et transport souterrain de gaz » à l'Unité ESEG de la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol

## **RESUME**

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 exploitée et de nombreux 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 projets de géothermie profonde, notamment dans le domaine de la haute température, basées sur les risques liés à cette industrie.

Ce rapport se veut une contribution scientifique et objective à ce débat. Il vise à présenter de manière factuelle et documentée l'état des connaissances sur les risques, impacts et nuisances potentiels liés à la géothermie profonde. Outre la littérature scientifique, il s'appuie sur le retour d'expérience des incidents ou accidents survenus dans ce domaine. Il met également à profit l'expertise de l'INERIS dans le domaine des risques liés à d'autres secteurs d'activités, notamment celui des forages pétroliers, pour porter un regard distancié sur les technologies de la géothermie profonde.

Les principaux enseignements tirés de ce travail sont fournis dans le chapitre de synthèse, à la fin du document. Le lecteur y trouvera notamment une analyse globale et comparée de l'ensemble des risques, impacts ou nuisances potentiels liés à cette filière.

Compte tenu de la grande quantité de travaux publiés dans le domaine de la géothermie profonde, que ce soit en recherche ou en ingénierie, les auteurs ne prétendent pas être exhaustifs. Ils ont tâché de couvrir au mieux les sources d'informations disponibles pour offrir au lecteur indulgent ce qu'ils pensent être une vue relativement complète des principaux enjeux de sécurité et d'environnement liés à cette industrie.

## **MOTS CLES**

Géothermie, Aléa, Risque, Impact, Nuisance, Acceptabilité, Forage, Puits, Sismicité

## **TERRITOIRE**

France, Europe, Monde

## **ABSTRACT**

Deep geothermal is a renewable and non-intermittent source of energy that can contribute to the world transition for a less carbon-intensive and greenhouse gas-emitting energy mix. Only a small part of the worldwide geothermal potential has been exploited so far and many countries, including France, are aiming for a fast growing of this industry in the next decades.

Like most industrial activities, deep geothermal energy shows potential local inconveniences and possible risks for the safety of persons and of the environment. Preventing and managing those risks is of utmost importance to ensure that deep geothermal development is fully compatible with the needs and expectations of citizens, especially those of neighboring inhabitants. Indeed, in the past years, concerns have been raised by local populations regarding the development of some deep geothermal projects, especially in the field of high temperature geothermal, based on the risks related to this industry.

This report is intended as a scientific and objective contribution to this matter. It aims to present, in a factual and documented way, the state of knowledge on the risks, impacts and potential inconveniences associated with deep geothermal energy. In addition to the scientific literature, it is based on lessons from incidents or accidents in this field of activity. It also makes use of INERIS expertise in the field of risks related to other sectors of activity dealing with underground operations and georesources, especially oil wells drilling, to provide a distanced view of deep geothermal technologies.

Main lessons learned from this work are provided in the synthesis chapter ending the document. It includes a global and comparative analysis of the risks, impacts or potential inconveniences identified in this sector.

Considering the large amount of published works related to this field of this industry both in the research and engineering areas, the authors do not claim to be exhaustive. They tried to cover as largely as possible the sources of information available to offer to the indulgent reader what they thought to be a reasonably objective comprehensive view of the key safety and environmental issues related to this industry.

## **KEYWORDS**

Geothermal, Hazard, Risk, Impact, Inconvenience, Acceptability, Drilling, Well, Induced seismicity

## **TERRITORIES**

France, Europe, World

## TABLE DES MATIÈRES

<b>1. INTRODUCTION .....</b>	<b>9</b>
<b>2. GÉNÉRALITÉS, DÉFINITIONS ET PRÉSENTATION DE LA DÉMARCHE D'ANALYSE DE RISQUES .....</b>	<b>13</b>
2.1 Classifications de la géothermie.....	13
2.2 Situation de la géothermie profonde en France et dans le monde .....	15
2.2.1 Géothermie à usage direct pour la production de chaleur .....	15
2.2.1.1 Principes.....	15
2.2.1.2 Situation dans le monde .....	16
2.2.1.3 Situation en France .....	17
2.2.2 Géothermie pour la production d'électricité .....	19
2.2.2.1 Principes.....	19
2.2.2.2 Situation dans le monde .....	20
2.2.2.3 Situation en France .....	21
2.3 Description succincte d'un site de géothermie profonde .....	22
2.3.1 Phases de vie d'un site .....	22
2.3.2 Forages .....	23
2.3.3 Installations de surface .....	24
2.4 Présentation de la démarche d'analyse de risques .....	25
<b>3. RETOUR D'EXPÉRIENCE DES ACCIDENTS ET INCIDENTS .....</b>	<b>27</b>
3.1 Constitution d'une base de données .....	27
3.2 Analyse de la base de données .....	27
3.2.1 Enseignements en termes de risques pour les personnes .....	29
3.2.2 Enseignements en termes d'évolution temporelle de la sécurité .....	30
3.2.3 Enseignements en termes de typologie des accidents .....	31
3.3 Analyse d'accidents particuliers .....	33
3.3.1 Séismes induits par stimulation hydraulique .....	34
3.3.1.1 Soultz-sous-Forêts (Bas-Rhin) .....	34
3.3.1.2 Bâle (Suisse) .....	36
3.3.1.3 Landau et Insheim (Allemagne).....	37
3.3.1.4 Cooper Basin (Australie) .....	37
3.3.1.5 Wairakei (Nouvelle-Zélande) .....	38
3.3.1.6 The Geysers et Salton Sea (Californie, USA).....	38
3.3.2 Mouvements de terrain liés à des intrusions d'eau souterraine dans des formations sensibles .....	39
3.3.2.1 Soulèvement de la surface lié au gonflement d'une formation évaporitique.....	39
3.3.2.2 Affaissement ou effondrement en surface lié à la dissolution d'une formation saline .....	40

3.3.3	Intrusion de fluide géothermal dans un aquifère d'eau douce .....	41
3.3.3.1	Coulommiers (Seine-et-Marne) .....	41
3.3.3.2	Belcova (Turquie) .....	42
<b>4.</b>	<b>IMPACTS CHRONIQUES ET NUISANCES POTENTIELS LIÉS À LA GÉOTHERMIE PROFONDE.....</b>	<b>43</b>
4.1	Généralités .....	43
4.2	Impact paysager et occupation du sol .....	44
4.2.1	En phase de foration et d'essais .....	44
4.2.2	En phase d'exploitation .....	44
4.3	Bruit et vibrations .....	45
4.3.1	En phase de foration et d'essais .....	45
4.3.2	En phase d'exploitation .....	46
4.4	Nuisances liées à l'augmentation du trafic routier .....	47
4.5	Impact potentiel sur les écosystèmes .....	47
4.6	Impact potentiel sur les ressources en eau .....	47
4.6.1	Impact quantitatif .....	47
4.6.2	Impact qualitatif .....	48
4.7	Emissions de gaz, d'aérosols et odeurs .....	49
4.8	Emissions de gaz à effets de serre .....	50
4.9	Radioactivité .....	51
4.10	Conclusion .....	51
<b>5.</b>	<b>EMANATIONS OU EPANCHEMENTS ACCIDENTELS DE FLUIDES EN SURFACE.....</b>	<b>55</b>
5.1	Eruptions de fluides souterrains en surface .....	55
5.1.1	Événement redouté .....	55
5.1.2	Mécanismes et scénarios initiateurs .....	55
5.1.2.1	En phase de foration .....	55
5.1.2.2	En phase d'essais .....	56
5.1.2.3	En phase d'exploitation .....	56
5.1.3	Effets et conséquences potentiels .....	56
5.2	Fuite ou débordement d'un réservoir en surface .....	56
5.2.1	Événement redouté .....	56
5.2.2	Mécanismes et scénarios initiateurs .....	57
5.2.3	Effets et conséquences potentiels .....	57
5.3	Fuite sur le circuit primaire ou secondaire .....	57
5.3.1	Événement redouté .....	57
5.3.2	Mécanismes et scénarios initiateurs .....	57
5.3.3	Effets et conséquences potentiels .....	58
5.4	Emission d'un volume excessif de gaz dissous .....	58
5.4.1	Événement redouté .....	58
5.4.2	Mécanismes et scénarios initiateurs .....	59

5.4.3 Effets et conséquences potentiels .....	59
5.5 Conclusion .....	59
<b>6. CONTAMINATIONS POTENTIELLES DU MILIEU SOUTERRAIN .....</b>	<b>61</b>
6.1 Mise en communication d'aquifères .....	61
6.1.1 Événement redouté .....	61
6.1.2 Mécanismes et scénarios initiateurs .....	62
6.1.3 Effets et conséquences potentiels .....	62
6.2 Intrusion de fluide dans un aquifère .....	62
6.2.1 Événement redouté .....	62
6.2.2 Mécanismes et scénarios initiateurs .....	63
6.2.3 Effets et conséquences potentiels .....	64
6.3 Conclusion .....	64
<b>7. DÉSDORDRES POTENTIELS EN SURFACE OU SECOUSSES SISMIQUES RESSENTIES .....</b>	<b>67</b>
7.1 Sismicité induite .....	67
7.1.1 Événement redouté .....	67
7.1.2 Mécanismes et scénarios initiateurs .....	67
7.1.2.1 Augmentation excessive de la pression de pore .....	67
7.1.2.2 Refroidissement excessif de la formation .....	70
7.1.2.3 Dépression excessive du réservoir .....	70
7.1.3 Effets et conséquences potentiels .....	70
7.2 Surrection ou soulèvement de la surface du sol .....	72
7.2.1 Événement redouté .....	72
7.2.2 Mécanismes et scénarios initiateurs .....	72
7.2.3 Effets et conséquences potentiels .....	73
7.3 Subsidence ou abaissement de la surface du sol .....	73
7.3.1 Événement redouté .....	73
7.3.2 Mécanismes et scénarios initiateurs .....	74
7.3.2.1 Dissolution incontrôlée d'une formation évaporitique .....	74
7.3.2.2 Rabattement de nappe excessif .....	74
7.3.2.3 Entraînement de particules excessif par suffosion .....	75
7.3.2.4 Réinjection incomplète ou absente .....	76
7.3.2.5 Modification des flux souterrains .....	76
7.3.3 Effets et conséquences potentiels .....	76
7.4 Glissement de terrain .....	78
7.4.1 Événement redouté .....	78
7.4.2 Mécanismes et scénarios initiateurs .....	78
7.4.3 Effets et conséquences potentiels .....	78
7.5 Conclusion .....	78
<b>8. SYNTHÈSE .....</b>	<b>81</b>

8.1	Enseignements sur l'accidentologie .....	81
8.2	Nuisances et impacts chroniques potentiels liés à la géothermie profonde	82
8.3	Principaux risques accidentels .....	83
8.4	Analyse comparative des risques, impacts et nuisances liées à la géothermie profonde .....	86
<b>9.</b>	<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>89</b>
<b>10.</b>	<b>LISTE DES ANNEXES .....</b>	<b>101</b>
<b>ANNEXE. 1</b>	<b>TERMINOLOGIE UTILISÉE DANS CE RAPPORT</b>	
<b>ANNEXE. 2</b>	<b>CADRE RÉGLEMENTAIRE D'UN SITE DE GÉOTHERMIE PROFONDE</b>	
<b>ANNEXE. 3</b>	<b>BASE DE DONNÉES D'ACCIDENTS</b>	
<b>ANNEXE. 4</b>	<b>FICHES DÉTAILLÉES D'ACCIDENTS</b>	

# 1. INTRODUCTION

L'accord de Paris sur le climat, adopté le 12 décembre 2015 par 195 pays, a réaffirmé la volonté internationale de lutter contre le dérèglement climatique en réduisant les émissions de gaz à effet de serre. Un des leviers qui permettront d'atteindre cet objectif est d'augmenter la part des énergies renouvelables dans l'offre énergétique mondiale.

La France s'inscrit en tête de cette démarche, notamment à travers les orientations prises dans la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV), qui prévoit de porter à 32%<sup>1</sup> la part des énergies renouvelables dans la consommation énergétique finale du pays d'ici 2030<sup>2</sup>.

La géothermie, qui utilise l'énergie thermique du sous-sol pour produire de la chaleur ou de l'électricité, est une technologie à même de contribuer à cet objectif. Il s'agit en effet d'une source d'énergie renouvelable<sup>3</sup>, à très faible empreinte carbone et qui a l'avantage, par rapport à l'énergie éolienne ou solaire, de ne pas être intermittente.

A ce jour, la géothermie représente encore une faible part (0,9%) de la production d'énergies renouvelables en France, loin derrière l'hydraulique (20%), l'éolien (8%) ou le solaire (3,4%) (Figure 1).

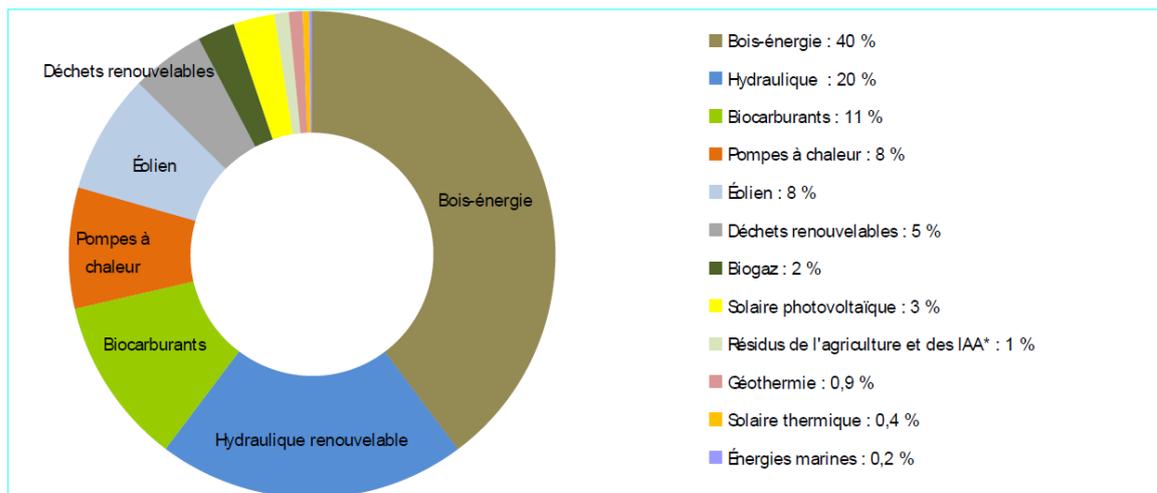


Figure 1. Production primaire d'énergies renouvelables par filières en 2015 (DGEC, 2016)

Toutefois, ses atouts en termes de bénéfice pour le climat, son potentiel encore largement inexploité<sup>4</sup> (y compris en France), les politiques de soutien dont elle bénéficie et les avancées attendues en matière de technologies et de réduction des coûts, laissent augurer un développement accéléré de la géothermie dans les

<sup>1</sup> Cette part est aujourd'hui de 14,9%, soit 22,7 Mtep (source : DGEC, 2016)

<sup>2</sup> 38% de la consommation finale de chaleur et 40% de la production d'électricité.

<sup>3</sup> Tant que la puissance captée reste inférieure à la capacité du gisement à se recharger en chaleur.

<sup>4</sup> Pour la production d'électricité, on estime que moins de 6% du potentiel géothermique mondial est aujourd'hui exploité (PPE, 2016)

prochaines années. Ainsi, la France affiche un objectif de doublement de sa capacité de production d'énergie d'origine géothermique d'ici 2023 (Tableau 1).

Tableau 1. Situation et perspectives du marché de la géothermie en France  
(sources : AFPG, 2016 ; PPE, 2016, Bertani, 2015)

Situation et perspectives des filières de la géothermie			Actuel		2023		2030	
			Production (GWh)	Capacité (MW)	Production (GWh)	Capacité (MW)	Production (GWh)	Capacité (MW)
Géothermie	Filières Chaleur	Très Basse Energie (PAC)	3686 <sup>(1)</sup>	2280 <sup>(1)</sup>	5593 <sup>(1)</sup>	3335 <sup>(1)</sup>	7488 <sup>(1)</sup>	4440 <sup>(1)</sup>
		Basse énergie (réseaux de chaleur)	1244 <sup>(1)</sup>	377 <sup>(1)</sup>	4128 <sup>(1)</sup>	790 <sup>(1)</sup>	6454 <sup>(1)</sup>	1250 <sup>(1)</sup>
		Haute énergie (réseaux de chaleur, usages industriels)	0 <sup>(1)</sup>	0 <sup>(1)</sup>	45 <sup>(1)</sup>	104 <sup>(1)</sup>	70 <sup>(1)</sup>	160 <sup>(1)</sup>
		TOTAL Chaleur	4930	2657	9766	4229	14012	5850
	Filière Electricité	115 <sup>(3)</sup>	17 <sup>(1)</sup>	-	53 <sup>(2)</sup>	-	150 <sup>(1)</sup>	
	TOTAL Géothermie	5045	2674	-	4282	-	6000	
	Ensemble des EnR	Chaleur	145350 <sup>(2)</sup>	-	220932 <sup>(2)</sup>	-	-	-
	Electricité	93000 <sup>(2)</sup>	41000 <sup>(2)</sup>	150000 <sup>(2)</sup>	78000 <sup>(2)</sup>	216000 <sup>(2)</sup>	-	

Sources : <sup>(1)</sup> AFPG, 2016 <sup>(2)</sup> PPE, 2016 <sup>(3)</sup> Bertani, 2016

La géothermie se structure autour de trois grandes filières :

- l'une qui exploite la chaleur à basse température présente dans les premières centaines de mètres du sous-sol et dont l'utilisation (principalement pour le chauffage de bâtiments individuels et collectifs) nécessite l'ajout d'une pompe à chaleur ; on parle alors de géothermie assistée par pompe à chaleur ;
- les deux autres qui exploitent des horizons plus profonds, à savoir :
  - la géothermie à usage direct pour la production de chaleur, qui puise la chaleur à moyenne température contenue dans les aquifères profonds et l'utilise notamment pour alimenter des réseaux de chaleur (chauffage urbain collectif) ;
  - la géothermie pour la production d'électricité, qui capte les eaux ou les vapeurs très chaudes circulant dans des zones volcaniques ou dans des milieux profonds fracturés (bassins d'effondrement, bassins d'arrière-arc, cf. Genter et al., 2003), afin de produire de l'électricité.

Si la première filière fait appel à une variété de techniques (boucles enterrées, pieux géothermiques, sondes géothermiques verticales, forages sur nappe superficielle), les deux autres, que nous désignerons sous le terme de « géothermie profonde », reposent globalement sur le même principe d'exploitation : il s'agit de réaliser des forages profonds (un à plusieurs kilomètres), sur le modèle de ceux que l'on trouve dans l'industrie pétrolière, par lesquels des eaux ou des vapeurs chaudes sont extraites, valorisées en surface (sous forme de chaleur ou d'électricité) et le plus souvent, réinjectées dans le sous-sol par le biais d'un deuxième forage, selon le principe du « doublet géothermique ».

Même si la géothermie profonde, en tant qu'énergie renouvelable, bénéficie globalement d'une image favorable, elle est parfois confrontée localement à des problèmes d'acceptabilité. Les réticences qui peuvent s'exprimer sur cette technologie sont liées à un ensemble de facteurs d'ordre technique (sismicité induite, pollution potentielle des nappes, bruit, nuisances, occupation du sol, etc.), économique (bénéfices non nécessairement perçus par les riverains), ou idéologique (opposition à toute forme d'exploitation du sous-sol) (Chavot, 2016). Les incidents survenus récemment dans le fossé Rhénan (Bâle, Landau, Staufen, etc.), même s'ils ont été le résultat d'actions contraires aux bonnes pratiques de la profession (voir par ex. Hervé, 2009 ; Goyénèche et al., 2015) ont également contribué à ternir l'image de la géothermie profonde.

Afin de tenter d'apporter un regard objectif et documenté sur ces questions, l'INERIS se propose, dans ce rapport, de dresser un état des connaissances sur les principaux risques, impacts ou nuisances potentiels liés à la géothermie profonde.

Cet état des lieux s'appuie tout d'abord sur le retour d'expérience des incidents ou accidents survenus dans ce domaine au cours des dernières décennies. Il se base également sur une revue de la littérature scientifique et technique portant sur les risques ou impacts liés à la construction ou à l'exploitation d'un site géothermique. Enfin, il s'appuie sur l'expertise de l'INERIS dans le domaine des risques liés aux forages pétroliers (Lahaie, 2015a ; Lahaie, 2015b ; Lafortune, 2016), auxquels s'apparentent grandement les forages de géothermie profonde.

Il est bien précisé que ce rapport ne traite que des risques ou impacts liés à la géothermie profonde. Les impacts liés à la géothermie superficielle (géothermie par pompe à chaleur) ont déjà fait l'objet de documents complets (par exemple, Bezelgues-Courtade et al. 2012) et ne sont donc pas abordés ici. Par contre, l'expérience acquise au cours de certains projets de géothermie superficielle a pu être mise à profit, lorsqu'elle était applicable à la géothermie profonde.

Ce rapport commence par un rappel de quelques éléments de contexte et définitions sur la géothermie profonde (chapitre 1) : on donne également une description générique d'un site d'exploitation et on présente la démarche d'analyse de risques retenue pour cette étude. Le chapitre 3 renferme une analyse du retour d'expérience des accidents survenus dans le monde, dans le domaine de la géothermie profonde. Les chapitres suivants (chapitres 4 à 7) décrivent les principaux événements redoutés, leurs causes, leurs conséquences et les mesures de prévention ou de mitigation possibles. Le rapport se termine par une synthèse (chapitre 8) qui comprend notamment une analyse comparative de l'ensemble des risques, impacts et nuisances liés à la géothermie profonde.

La terminologie utilisée par la suite est rassemblée en ANNEXE. 1.



## **2. GÉNÉRALITÉS, DÉFINITIONS ET PRÉSENTATION DE LA DÉMARCHE D'ANALYSE DE RISQUES**

### **2.1 CLASSIFICATIONS DE LA GÉOTHERMIE**

Pour bien situer la notion de géothermie profonde, il convient d'aborder dans un premier temps les différentes classifications de la géothermie. Il en existe en effet plusieurs, dont les critères de définition sont précisés dans le Tableau 2 :

- A. une classification basée sur le potentiel énergétique récupérable<sup>5</sup> : très basse énergie<sup>6</sup> (<30°C), basse énergie (entre 30°C et 90°C), moyenne énergie (entre 90°C et 150°C) ou haute énergie (>150°C) ;
- B. une classification juridique : activités non soumises au code minier, soumises au code minier sous le régime de la géothermie basse température dite « de minime importance » (GMI), soumises au code minier sous le régime de la géothermie basse température ou soumises au code minier sous le régime de la géothermie haute température (voir détails en 0) ;
- C. une classification selon les types de valorisation de la chaleur géothermique : production de chaleur assistée par pompe à chaleur, production de chaleur par usage direct de la chaleur géothermique, production d'électricité.

On notera que les domaines délimités par chacune de ces classifications coïncident plus ou moins, avec cependant quelques décalages. Ainsi, par exemple :

- la géothermie assistée par pompe à chaleur ne se limite pas à la géothermie très basse énergie mais empiète sur le domaine de la basse énergie ; certains réseaux de chaleur peuvent en effet nécessiter l'ajout d'une pompe à chaleur jusqu'à des températures de l'ordre de 50°C ;
- la production d'électricité par géothermie ne concerne pas uniquement le domaine de la haute énergie ; cette production est techniquement possible à partir de températures de l'ordre de 120°C (voire moins), c'est-à-dire dans le domaine de la géothermie de moyenne énergie.

La géothermie profonde abordée dans le présent rapport est basée sur la troisième classification ci-avant, c'est-à-dire par types de valorisation. Ainsi, désignons-nous par « géothermie profonde » le domaine qui couvre à la fois la géothermie à usage direct pour la production de chaleur et celle destinée à la production d'électricité. Ce domaine est représenté par l'encadré rouge dans le Tableau 2.

---

<sup>5</sup> Essentiellement associé à la température du fluide caloporteur au niveau du captage.

<sup>6</sup> On trouvera aussi parfois le terme « enthalpie »

Tableau 2. Classifications de la géothermie (le domaine de la « géothermie profonde » est encadré en rouge)

Classification selon potentiel énergétique récupérable	Critères de définition	Classification juridique	Critères de définition	Classification selon les types de valorisation	Principes d'exploitation <sup>5</sup>	Profondeurs indicatives <sup>5</sup>	Températures indicatives en sortie de forage	Puissance indicative d'une installation	Principales applications
Très Basse Energie <sup>1</sup> (TBE)	T° < 30°	Non soumis au Code minier	prof < 10 m	Production de chaleur ou de froid avec l'assistance d'une PAC <sup>3</sup>	Capteurs enterrés Pieux géothermiques	de 0 à 10 m	10° < T < 15°	10 à 100 kW <sub>th</sub> (1 à 20 logements)	* Chauffage (résidentiel, collectif ou tertiaire) * Eau chaude sanitaire * Froid ou rafraîchissement de bâtiments * Usages industriels, agricoles ou de loisirs (piscines, serres, etc.)
		Code minier Régime de la "GMI" <sup>2</sup>	10 m < prof < 200 m P < 500 kW Hors zones rouges T < 30° + réinjection + Débit limité		Sondes géothermiques verticales (SGV)	de 10 à 200 m	15° < T < 20°		
Basse Energie <sup>1</sup> (BE)	30° < T° < 90°	Code minier Régime de la Basse T°	30° < T° < 150° ou T < 30° ne respectant pas les critères de la GMI		Forages sur nappes aquifères superficielles	de 10 à 1000 m	15° < T < 50°	100 à 1000 kW <sub>th</sub> (20 à 300 logements)	
Moyenne Energie <sup>1</sup> (ME)	90° < T° < 150°			Production de chaleur par usage direct de la chaleur géothermique	Forages sur nappes aquifères profondes	de 1 à 3 km	50° < T < 120°	1 à 20 MW <sub>th</sub> (300 à 1000 logements)	* Chauffage urbain collectif (réseaux de chaleur)
Haute Energie <sup>1</sup> (HE)	T° > 150°	Code minier Régime de la Haute T°	T° > 150°	Production d'électricité	Forages en milieux fracturés profonds (bassins d'effondrement)	de 2 à 5 km	120° < T < 200°	2 à 30 MW <sub>e</sub>	* Usage industriel (séchage haute T°) * Production d'électricité ou cogénération <sup>4</sup> (avec fluide intermédiaire)
					Forages en zones volcaniques actives	de 300 m à 2 km	180° < T < 350°	5 à 120 MW <sub>e</sub>	* Production d'électricité ou cogénération (utilisation directe du fluide)

<sup>1</sup> "Energie" ou "Enthalpie"

<sup>2</sup> Géothermie basse température dite "de minime importance"

<sup>3</sup> PAC = Pompe à chaleur

<sup>4</sup> Cogénération = production d'électricité + chaleur

<sup>5</sup> Dans le contexte français

## 2.2 SITUATION DE LA GÉOTHERMIE PROFONDE EN FRANCE ET DANS LE MONDE

### 2.2.1 GÉOTHERMIE À USAGE DIRECT POUR LA PRODUCTION DE CHALEUR

#### 2.2.1.1 Principes

La géothermie à usage direct pour la production de chaleur consiste à extraire la chaleur de l'eau chaude présente dans des aquifères profonds et à l'utiliser directement (c'est-à-dire sans l'assistance d'une pompe à chaleur) pour l'alimentation de réseaux de chaleur (chauffage urbain collectif) ou pour des usages industriels, agricoles ou de loisirs. La température nécessaire pour alimenter directement un réseau de chaleur (sans l'aide d'une pompe à chaleur) se situe entre 50 et 90°C, selon l'utilisation qui est faite en surface. Dans des régions à gradient géothermique normal, c'est-à-dire entre 2 et 4°C/100m<sup>7</sup>, il faut descendre à des profondeurs situées entre 1000 et 2500 m pour trouver des eaux couvrant cette gamme de températures.

Pour que la ressource soit exploitable, il faut également que l'aquifère hôte dispose des propriétés adéquates (perméabilité, porosité, épaisseur, etc.) afin de permettre un débit de captage suffisant (généralement entre 100 et 300 m<sup>3</sup>/h) et pérenne. En France, on trouve ces types de conditions principalement dans les deux grands bassins sédimentaires (bassin parisien et bassin aquitain).

Le procédé d'exploitation repose sur la réalisation d'un forage (forage de production) par lequel l'eau chaude est extraite<sup>8</sup>. Une fois en surface, cette eau passe dans un échangeur de chaleur, où elle cède ses calories à un fluide caloporteur qui les transporte ensuite vers les utilisateurs du réseau.

Le plus souvent<sup>9</sup>, l'eau géothermale refroidie est réinjectée dans l'aquifère d'origine par l'intermédiaire d'un deuxième forage (forage d'injection). Ce principe dit du « doublet géothermique » est illustré sur la Figure 2. Il présente deux intérêts majeurs :

- trouver une destination finale à une eau généralement très minéralisée et de ce fait impropre à la consommation, et éviter tout impact de cette eau sur l'environnement ;
- maintenir la pression dans l'aquifère d'origine et ainsi contribuer à préserver la ressource.

Le premier avantage de ce type de géothermie est qu'elle peut être mise en œuvre dans des régions où le gradient géothermique est normal, comme c'est le cas dans le bassin parisien, car elle joue essentiellement sur la profondeur. Un

---

<sup>7</sup> Le gradient géothermique est de 3,3°C/100 m en moyenne en France métropolitaine.

<sup>8</sup> Généralement, l'eau est maintenue sous pression tout au long du circuit primaire (c'est-à-dire depuis le forage de production jusqu'au forage de réinjection) afin notamment de limiter les problèmes de précipitation, d'écoulement turbulent ou de corrosion qui pourraient être induits par la vaporisation d'une partie de l'eau.

<sup>9</sup> Les quelques cas, en France, où l'eau n'est pas réinjectée dans le sous-sol mais dans la mer (par exemple la centrale de Bouillante en Guadeloupe) ou dans des eaux superficielles (certains forages en Aquitaine par exemple) sont strictement encadrés et justifiés par la faible différence de composition chimique entre l'eau géothermale extraite et le milieu récepteur.

autre avantage est que les réservoirs géothermiques profonds peuvent y être atteints avec plus de certitude du fait de la continuité des formations géologiques qui les hébergent, ce qui limite le risque dit « géologique », c'est-à-dire le risque pour l'opérateur de ne pas atteindre une ressource géothermique économiquement viable.

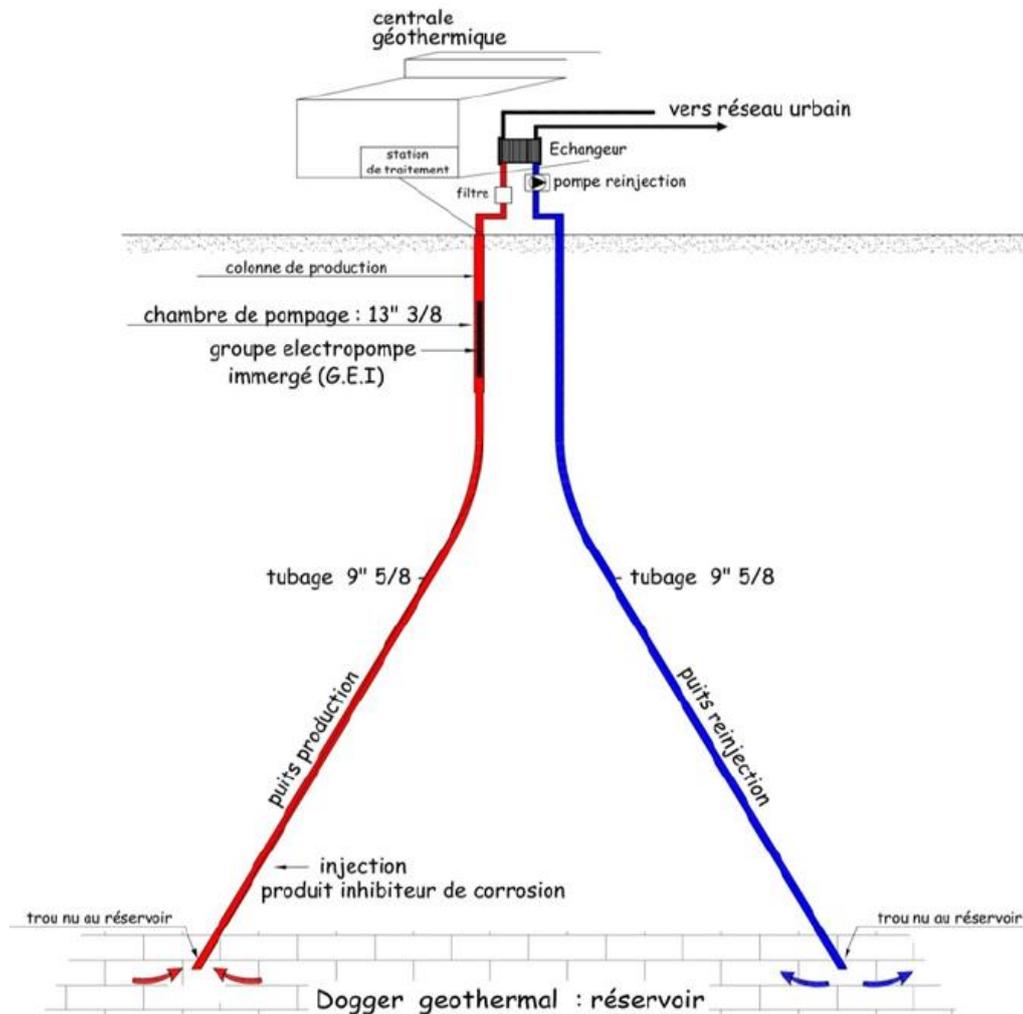


Figure 2. Schéma de principe d'un doublet géothermique au Dogger dans le bassin de Paris (source : CFG services)

#### 2.2.1.2 Situation dans le monde

A l'échelle mondiale, la capacité totale de production de chaleur par géothermie est estimée à 70 GW et la production annuelle est d'environ 163 TWh (Lund & Boyd, 2015). 71% de cette capacité, et 55% de cette énergie produite, sont fournies par des pompes à chaleur. La géothermie à usage direct représente donc 29% de la capacité (soit environ 20 GW) et 45% de l'énergie produite (soit environ 73 TWh/an), répartie sur environ 1100 installations (en considérant que la capacité moyenne d'une installation est d'environ 18 MW<sub>th</sub>, EGEC, 2015).

Ces deux filières réunies (pompes à chaleur géothermiques et usage direct) connaissent une nette croissance au plan mondial (environ 10% par an). Selon l'AIE (Agence Internationale de l'Énergie), la production de chaleur d'origine géothermique pourrait atteindre 1600 TWh d'ici 2050, ce qui couvrirait 3,9 % de la demande finale de chaleur. Les premiers pays en termes de production sont la

Chine, les Etats-Unis, la Suède, la Turquie, l'Islande et le Japon, mais rapporté au nombre d'habitants, ce sont les pays nordiques (Islande, Suède, Finlande, Norvège) ainsi que la Nouvelle-Zélande qui sont au premier rang (Lund & Boyd, 2015).

En ce qui concerne la géothermie à usage direct, les principales applications au plan mondial sont le chauffage de piscines (45% de la chaleur géothermique consommée), le chauffage collectif urbain (34%), les serres agricoles (10%), l'aquaculture (4,5%) et les usages industriels (4%) (Lund & Boyd, 2015).

En Europe, ce sont les réseaux de chaleurs pour le chauffage collectif qui constituent le principal usage direct de la géothermie. L'Europe compte aujourd'hui 257 réseaux de chaleur géothermiques, pour une puissance totale installée de 4,7 GW<sub>th</sub> et une production annuelle d'environ 4,3 TWh (EGEC, 2015). Les pays leaders dans ce domaine sont l'Islande (46% de la capacité européenne), la Turquie (18%), la France (8%), la Hongrie (6%) et l'Allemagne (5,5%). L'Islande se démarque surtout par la puissance de ses installations (70 MW<sub>th</sub> en moyenne soit dix fois plus qu'une installation moyenne en France).

### 2.2.1.3 Situation en France

Au début des années 1980, suite au second choc pétrolier, la France a engagé un vaste programme de développement de réseaux de chaleur géothermiques (voir Figure 3). La baisse du prix du pétrole et les problèmes techniques, aujourd'hui maîtrisés, qui ont ensuite été rencontrés sur les forages (corrosion, dépôts) ont freiné la construction de nouveaux projets dans les années 1990-2000. Depuis 2007, le secteur se redynamise, sous l'impulsion de politiques publiques favorables aux énergies renouvelables. Ainsi, entre 2015 et 2016, huit nouveaux réseaux de chaleur urbains alimentés par la géothermie ont vu le jour en Île-de-France.

Ces réalisations portent à 52 le nombre de réseaux de chaleur géothermiques désormais installés en France, représentant une capacité totale de 377 MW<sub>th</sub> et permettant de chauffer 210 000 logements (soit 450 000 personnes). La France se place ainsi au troisième rang européen en termes de capacité et au premier rang en termes de nombre de réseaux.

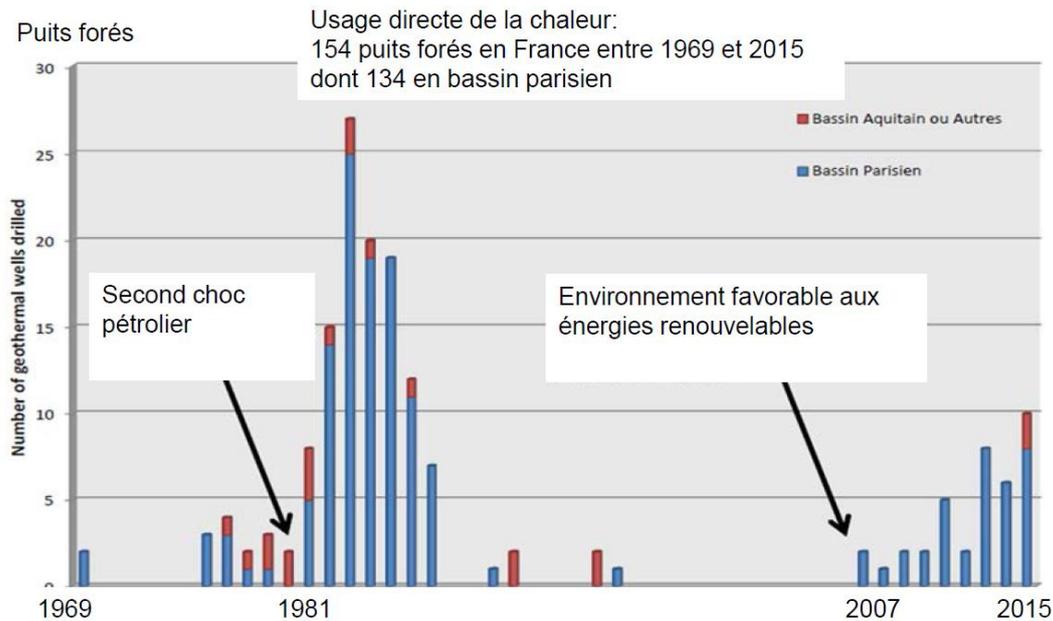


Figure 3. Puits forés en France pour l'usage direct de la chaleur (source : CFG Services)

Les principales ressources en France se situent dans les deux grands bassins sédimentaires, à savoir les bassins parisien et aquitain (voir Figure 4). Le premier est de loin le plus exploité (82% des installations) car il bénéficie d'une conjonction entre une géologie favorable (empilement de formations aquifères jusqu'à plus de 3 km de profondeur) et une forte densité de population. Les doublets géothermiques y exploitent principalement l'aquifère du Dogger, à des profondeurs situées entre 1500 et 2000 m. La température en sortie du captage varie entre 55 °C et 85 °C.

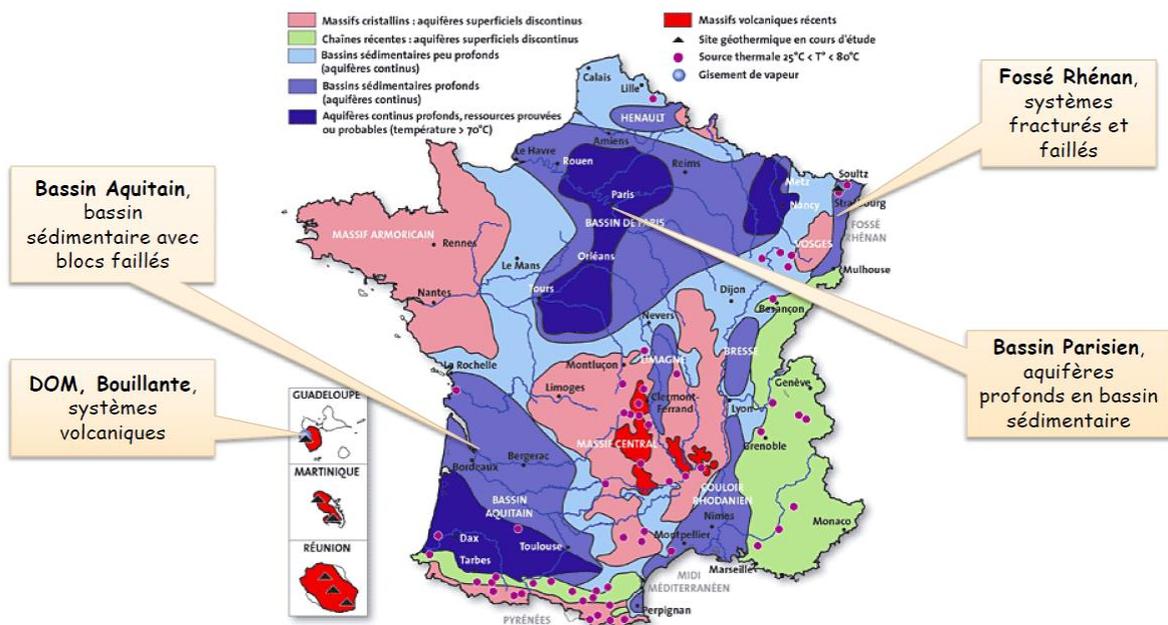


Figure 4. Zones favorables à l'usage direct de la chaleur géothermique en France (source : BRGM)

La France ambitionne un doublement de ses capacités en matière de réseaux de chaleur géothermiques d'ici 2023 (cf. Tableau 1). Il est à noter que du fait d'une saturation des doublets géothermiques au Dogger dans certaines zones du bassin parisien, la possibilité d'exploiter l'aquifère plus profond du Trias (vers 2500 m de profondeur) est actuellement à l'étude.

## 2.2.2 GÉOTHERMIE POUR LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ

### 2.2.2.1 Principes

La géothermie appliquée à la production d'électricité (ou géothermie électrogène) se développe aujourd'hui autour de trois principaux concepts :

- la géothermie de type « volcanique », de loin la plus ancienne et la plus répandue au monde, qui exploite la chaleur contenue dans les fluides très chauds (entre 150 et 400°C) circulant dans les systèmes faillés des zones de volcanisme actif ou récent. Les fluides sont extraits sous forme de vapeur ou plus généralement, sous forme d'un mélange vapeur-liquide. Après séparation, la vapeur est envoyée vers une turbine (technologie « flash ») pour produire de l'électricité. Une partie de cette vapeur est ensuite libérée dans l'atmosphère (après avoir été purifiée de ses gaz toxiques) alors que le reste se retrouve condensé sous forme liquide puis réinjecté dans le sous-sol ou parfois, rejeté en mer. C'est par exemple le cas de la centrale géothermique de Bouillante en Guadeloupe (voir Figure 5).

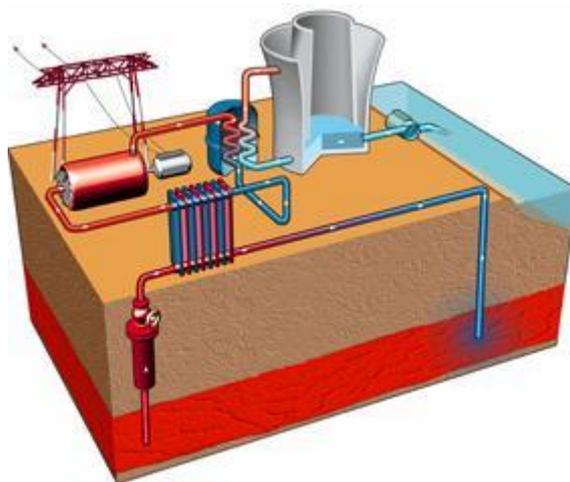


Figure 5. Principe de fonctionnement d'une centrale géothermique électrogène (<http://www.geothermie-perspectives.fr/>)

- la géothermie de type HDR (« *Hot Dry Rock*»), qui consiste à créer, à grande profondeur (entre 2 et 5 km), un réseau de fractures artificielles dans une roche dure en injectant de l'eau sous pression (fracturation hydraulique). Après avoir circulé dans le réseau de fractures et s'être réchauffée au contact de la roche, l'eau est théoriquement récupérée par un forage de production. Ce concept, appliqué notamment aux Etats-Unis (Los Alamos), présente un certain nombre d'inconvénients : difficulté de récupérer une portion suffisante de l'eau injectée, sismicité induite par la fracturation hydraulique. Bien

qu'expérimenté à Soultz-sous-Forêts (Bas-Rhin), ce concept n'a pas été mis en œuvre en France et ne sera donc pas étudié dans la suite de ce rapport ;

- la géothermie de type EGS (« *Enhanced geothermal Systems* » ou Systèmes Géothermiques Améliorés) , encore émergente, qui consiste à exploiter les eaux chaudes (généralement entre 120 et 200 °C) circulant dans des milieux profonds naturellement fracturés (entre 2 et 5 km de profondeur) typiques des grands bassins d'effondrement : c'est par exemple le cas du fossé rhénan. Le fluide géothermal est maintenu sous forme liquide dans le forage de production, puis il passe dans un échangeur de chaleur où il cède ses calories à un fluide secondaire dont le point d'ébullition est plus bas que celui de l'eau. Ceci déclenche la vaporisation du fluide secondaire qui est ensuite envoyé vers une turbine pour produire de l'électricité. Le fluide primaire, refroidi aux alentours de 80 °C, est soit réinjecté directement dans le sous-sol, soit utilisé pour une autre valorisation (par exemple, l'alimentation d'un réseau de chaleur). On parle dans ce cas de « cogénération ». A la différence du concept d'HDR, l'EGS<sup>10</sup> ne nécessite pas de fracturation artificielle de la roche, laquelle est déjà naturellement fracturée. En revanche, afin de bien connecter les forages à ce réseau de fractures naturelles, il est nécessaire d'utiliser des techniques dites de « stimulation » (hydraulique, chimique et/ou thermique), comme c'est le cas dans d'autres domaines d'exploitation par forages (forages d'hydrocarbures, forages de captage d'eau potable, etc.).

#### 2.2.2.2 Situation dans le monde

Au plan mondial, la production d'électricité d'origine géothermique représente aujourd'hui une capacité de 13,3 GW<sub>e</sub> (PIPAME, 2016) pour une production annuelle d'environ 75 TWh<sub>e</sub>. Cette capacité est répartie sur environ 600 installations (Bertani, 2015), soit en moyenne 22 MW<sub>e</sub> par installation.

La majorité des sites de production sont situés dans des contextes volcaniques, c'est-à-dire en bordure de plaques tectoniques ou dans des zones de rifts : ceinture de feu Pacifique, arcs antillais et méditerranéen, rift africain (Figure 6). On trouve en tête des pays producteurs les États-Unis (26% de la puissance mondiale installée, essentiellement dans l'ouest), puis les Philippines (14%), l'Indonésie (10%), le Mexique (7,5%) et la Nouvelle-Zélande (7,5%). Suivent l'Italie, l'Islande, le Japon, le Kenya et la Turquie. Au total, une vingtaine de pays dans le monde produisent de l'électricité géothermique (Bertani, 2015).

Aux États-Unis, les principaux sites de production sont en Californie, où se trouve notamment le site de The Geysers qui présente à lui seul une capacité de production de 1500 MW<sub>e</sub>. Parmi les autres installations majeures dans le monde, on peut également citer les centrales de Lardarello en Italie, Krafla en Islande, Olkaria au Kenya ou Amatitlan au Guatemala.

---

<sup>10</sup> Attention, une certaine confusion existe dans la littérature, où le terme « EGS » est parfois utilisé pour désigner des systèmes géothermiques qui relèvent en fait du concept d'HDR.

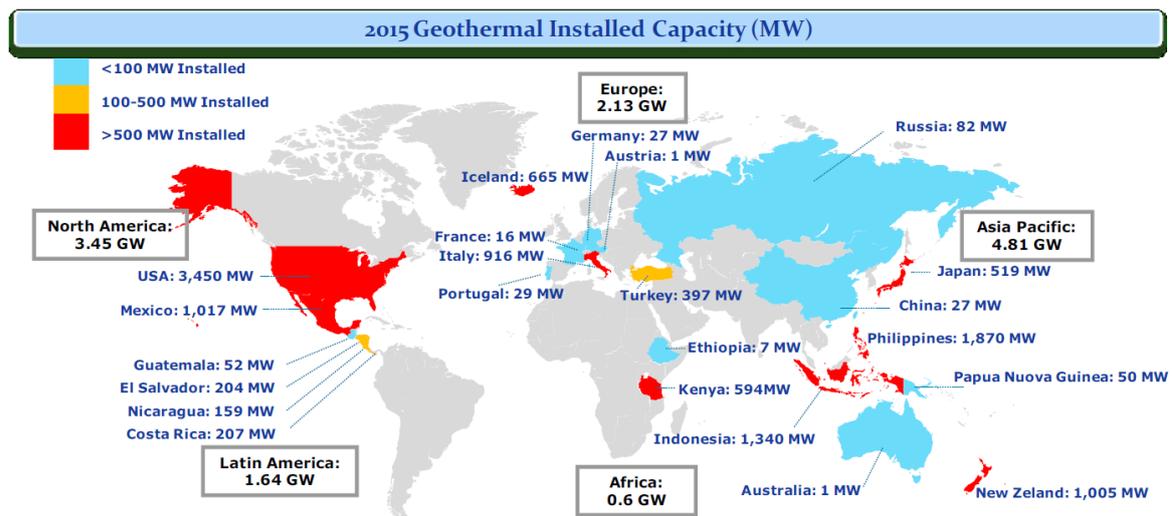


Figure 6. Capacités installées dans le domaine la production d'électricité par géothermie (Bertani, 2015)

En Europe, on comptabilise 88 installations opérationnelles, totalisant une puissance installée de 2285 MW<sub>e</sub> (EGEC, 2015). Ces installations sont principalement situées en Italie, en Islande et en Turquie. 32 autres installations sont en cours de construction et 176 autres sont au stade de projet.

La production d'électricité d'origine géothermique connaît actuellement un taux de croissance d'environ 10% par an (Bertani, 2015 ; DGEC, 2016). D'après l'Agence Internationale de l'Energie (AIE), cette production devrait être multipliée par vingt d'ici 2050 pour atteindre 1400 TWh, soit environ 3,5% de la production totale d'électricité dans le monde (PIPAME, 2016). A l'instar de la filière chaleur, la filière électricité de la géothermie s'affiche donc comme une ressource importante de demain.

### 2.2.2.3 Situation en France

La France compte aujourd'hui deux centrales électriques d'origine géothermique :

- la centrale de Bouillante en Guadeloupe, de type volcanique, qui est opérationnelle depuis 1984. Cette centrale délivre aujourd'hui 15 MW<sub>e</sub> ;
- la centrale de Soultz-sous-Forêts, dans le Bas-Rhin, berceau de la recherche européenne en matière de technologie EGS et qui, après avoir été opérée en tant que site pilote pendant près de 30 ans, est passée en phase industrielle en 2016. Elle délivre aujourd'hui une capacité électrique de 2,1 MW<sub>e</sub> ;

Ces deux centrales produisent environ 115 GWh/an (cf. Tableau 1), ce qui place la France au vingtième rang mondial et au cinquième rang européen dans le domaine de la géothermie électrogène.

Notons également l'inauguration, en 2016, de la centrale de Rittershoffen (Bas-Rhin), qui a la particularité d'être une application de l'EGS à la production de chaleur industrielle et non d'électricité. Comme celle de Soultz-sous-forêts, cette centrale, d'une puissance énergétique fournie de 24 MW<sub>th</sub>, exploite l'eau chaude (aux alentours de 165°C) présente dans les réservoirs fracturés profonds du fossé rhénan. Même si la chaleur produite ici n'est pas à usage électrique, cette centrale joue un rôle de vitrine dans le développement de la filière EGS en France.

Les objectifs affichés par la France en matière de géothermie électrogène sont d'atteindre une capacité de production de 150 MW<sub>e</sub> d'ici 2030 (cf. Tableau 1). Ces perspectives ambitieuses doivent s'appuyer, notamment, sur un déploiement de la technologie EGS sur le territoire métropolitain. Ainsi de nombreux projets sont à l'étude (ou en phase de développement) en Alsace, mais aussi dans le Massif Central (Limagne), le couloir rhodanien ou au pied des Pyrénées (Béarn) (voir Figure 7). La géothermie volcanique devrait également être développée, notamment à travers le projet d'extension de la centrale de Bouillante (dont le capital a été récemment ouvert à l'entreprise américaine Ormat) et au travers d'autres projets dans les DROM, notamment en Martinique et à la Réunion.

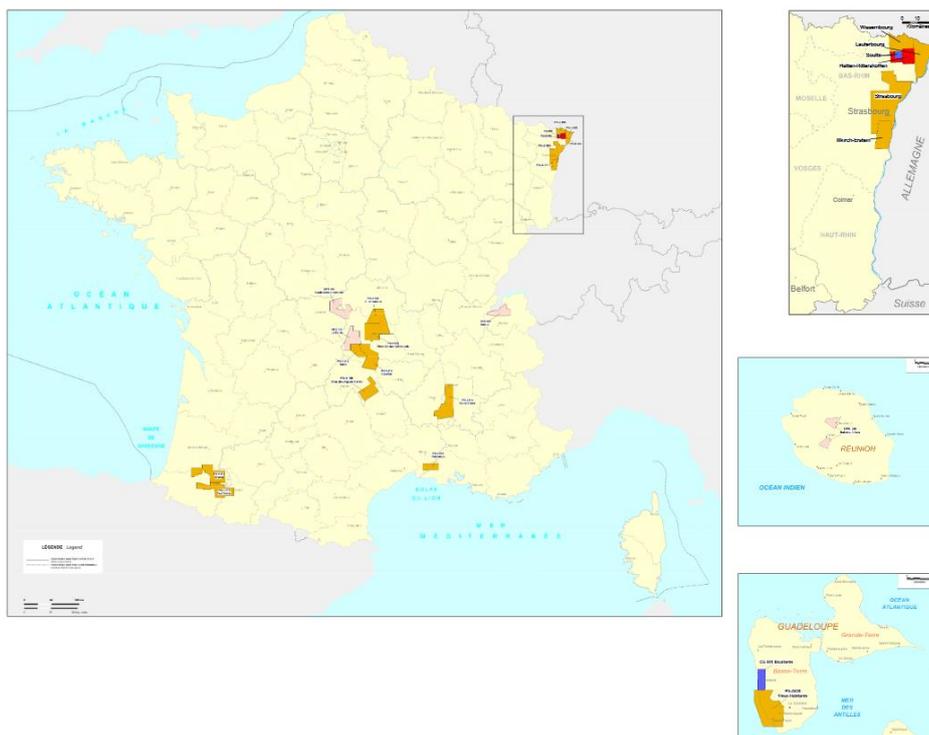


Figure 7. Cartographie des titres miniers en France pour la géothermie haute température (DGEC, 2015).

**Légende :** en orange, les permis de recherche attribués en première période ; en rouge, les permis de recherche attribués en deuxième période ; en rose, les permis de recherche attribués en troisième période ; en beige, les demandes de permis de recherche en cours d'instruction ; en violet, les concessions en cours de validité.

## 2.3 DESCRIPTION SUCCINCTE D'UN SITE DE GÉOTHERMIE PROFONDE

L'objet principal de ce rapport étant de caractériser les Risques, Impacts ou Nuisances potentiels (RIN) liés aux activités de géothermie profonde, il est utile de rappeler les principales phases de déroulement de la vie d'un site géothermique (les RIN n'étant pas les mêmes selon les phases) et de décrire les ouvrages et installations présentes en surface lors de chacune de ces phases.

### 2.3.1 PHASES DE VIE D'UN SITE

Quel que soit le domaine de la géothermie profonde concerné (pour la production de chaleur ou d'électricité), le développement d'un projet comporte deux phases

principales<sup>11</sup> (exploration et exploitation) et à l'intérieur de ces phases, deux phases secondaires (évaluation de la ressource et abandon) :

- les phases d'exploration et d'évaluation de la ressource : Il s'agit de réaliser un premier forage jusqu'à la formation géologique cible, c'est-à-dire hébergeant une ressource géothermique potentielle, et d'y effectuer une série de tests afin de caractériser cette ressource, notamment le débit et la température du fluide récupérable en surface. Si cette ressource est jugée économiquement viable, un deuxième forage est réalisé (dans le cas d'un doublet) dans lequel une série d'essais (de production et/ou d'injection) est également réalisée. A l'issue de cette phase, qui dure entre 4 et 12 mois selon la profondeur et la complexité des forages, une décision est prise sur la mise en exploitation (ou non) du doublet géothermique ;
- les phases d'exploitation et d'abandon : Il s'agit de construire les installations nécessaires à l'exploitation du site et de les mettre en service pour une durée d'au moins 30 ans, durée généralement requise pour que l'investissement dans une installation géothermique profonde soit rentabilisé. En cours d'exploitation, des opérations de contrôle et de maintenance sont réalisées sur les forages ou sur les installations de surface. En fin d'exploitation, les installations sont démantelées, les forages bouchés et le site est réhabilité : la concession accordée à l'exploitant est alors renoncée.

Le cadre réglementaire dans lequel ces opérations se déroulent est rappelé en 0.

### 2.3.2 FORAGES

Les techniques de foration et les architectures des forages de géothermie sont proches de celles des puits pétroliers. La description précise de ceux-ci sort du cadre de ce rapport : on renvoie par exemple à la lecture du rapport de l'INERIS « Contexte et aspects fondamentaux du forage et de l'exploitation des puits d'hydrocarbures » (Lahaie, 2015b).

On peut toutefois noter les différences suivantes avec les puits pétroliers :

- les forages de géothermie ne possèdent pas de complétion, c'est-à-dire que la production de l'eau géothermale se fait directement par les cuvelages. Ces derniers se trouvent donc davantage exposés à la corrosion et, dans des contextes de forages haute température, à de fortes variations thermiques, qui peuvent mener à des effets de dilatation/contraction des aciers. L'absence d'annulaire de contrôle<sup>12</sup> rend également plus difficile la surveillance des éventuelles fuites (lié à un percement du cuvelage par exemple) ;
- par voie de conséquence, les cuvelages sont systématiquement cimentés sur toute leur hauteur ; ceci permet notamment de renforcer la barrière d'étanchéité avec les terrains (du fait de l'absence de complétion), de limiter la corrosion externe des tubages, et d'assurer une bonne tenue mécanique du

---

<sup>11</sup> Au-delà des phases préalables d'études (géologiques, technico-économiques) et éventuellement de prospection (notamment géophysique).

<sup>12</sup> Dans le cas des puits d'hydrocarbures ou de stockages souterrains, la présence d'un espace annulaire entre la complétion et le cuvelage, appelé « annulaire de contrôle », permet d'effectuer un suivi de la pression en tête et ainsi de détecter d'éventuelles fuites.

forage vis-à-vis des variations thermiques (dans les contextes à haute température) ;

- les diamètres de cuvelage sont plus importants, le cuvelage externe étant souvent en diamètre 9<sup>5/8</sup> (245 mm) pour les forages géothermiques alors qu'il est plus généralement en diamètre 7" (178 mm) voire même 4"1/2 (114 mm) pour les puits pétroliers ; ceci permet un débit de production (ou d'injection) plus important, ce qui est nécessaire pour qu'un forage géothermique soit viable économiquement ; en outre, l'épaisseur des cuvelages est plus importante que dans le secteur pétrolier, afin de prendre en compte la vitesse plus rapide de réduction d'épaisseur liée à la corrosion ;
- les températures peuvent être importantes (180°C dans le cas de l'EGS Alsacien ; 250°C dans le cas de la géothermie volcanique des Antilles) ; les ciments et les équipements du forage doivent donc être adaptés à de tels environnements ;
- les pressions sont globalement moins élevées que dans le domaine pétrolier, les réservoirs géothermiques étant généralement peu pressurisés. Pour permettre de produire à un débit suffisant, les forages sont d'ailleurs équipés, le plus souvent, d'une électropompe immergée placée dans une chambre réservée dans le forage, à quelques centaines de mètres sous la surface ;
- les forages sont généralement « dirigés », c'est-à-dire non verticaux sur toute leur longueur, du fait du principe du doublet géothermique (voir Figure 2) ; les inclinaisons sont le plus souvent comprises entre 30 et 45° mais elles peuvent atteindre 60°, voire plus, dans les conceptions plus récentes (drains horizontaux) ; même si ces technologies sont globalement bien maîtrisées, les difficultés de forage (frottement des outils lors de leur descente ou remontée, défaut de centrage des cuvelages, défaut de cimentation annulaire sur la génératrice supérieure du forage, etc.) y sont plus fréquents que dans les forages verticaux ;
- les forages d'injection sont présents en aussi grand nombre (voire plus) que ceux de production, du fait que l'injectivité des forages est souvent plus faible (ou plus sujette à diminution au cours du temps) que leur productivité.

### 2.3.3 INSTALLATIONS DE SURFACE

La nature des installations présentes en surface et leur emprise au sol dépendent de la phase de vie considérée.

En phases de foration et d'essais, on retrouve en surface toutes les installations nécessaires à un chantier de forage profond classique (voir exemples en Figure 21) : appareil de forage, moteurs, zones de stockage des tiges et cuvelages, bacs à boue, bassin de stockage provisoire du fluide géothermal en phase d'essai, etc.

En phase d'exploitation, certaines installations sont spécifiques à la géothermie (voir exemples en Figure 22) : canalisation reliant les deux forages (circuit primaire), pompes, échangeur de chaleur, boucle secondaire, éventuellement turbine en cas de production d'électricité.

## 2.4 PRÉSENTATION DE LA DÉMARCHE D'ANALYSE DE RISQUES

Dans la suite de ce rapport, on entendra par :

- « risques », les incidences potentielles sur la santé ou la sécurité des personnes (internes ou externes au site) résultant des activités menées sur le site géothermique ; on distinguera les risques accidentels (liés à un événement non prévu) et les risques chroniques (liés aux activités courantes du site) ;
- « impacts », les atteintes avérées aux biens (bâtiments, infrastructures, etc.), aux activités humaines (transport, etc.) ou à l'environnement (faune, flore, eau, sol, climat, etc.) résultant des activités menées sur le site géothermique ; on distinguera également les impacts accidentels et les impacts chroniques ;
- « nuisances », les gênes occasionnées aux personnes résultant des activités courantes (non accidentelles) menées sur le site géothermique.

Ce rapport s'intéressera uniquement aux atteintes potentielles aux personnes ou à l'environnement ; les risques de nature technique ou économique ne seront pas abordés, en particulier :

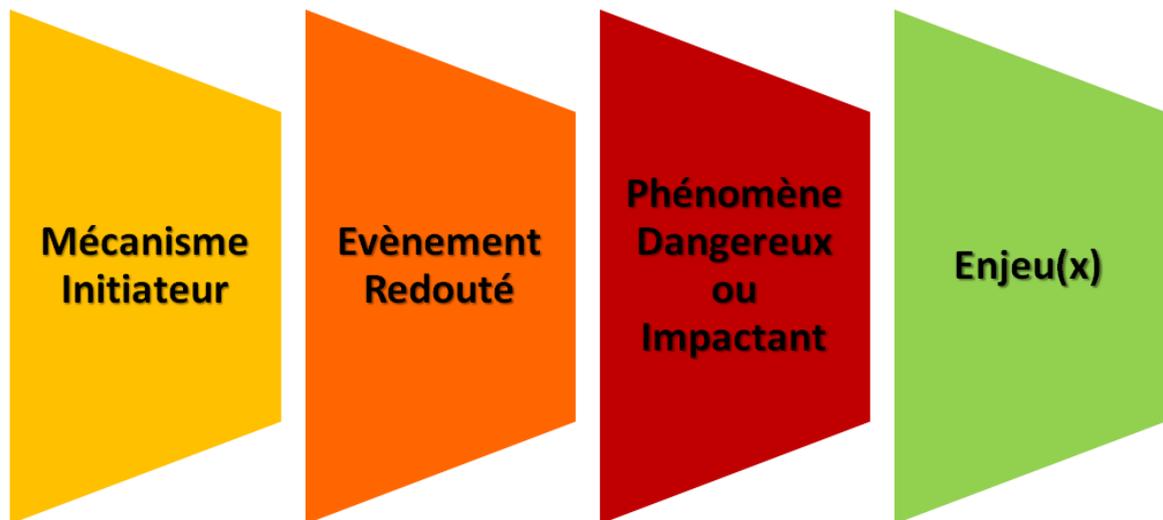
- le risque « géologique », autrement dit le risque pour le maître d'ouvrage de ne pas atteindre une ressource géothermique économiquement exploitable ;
- le risque de perte de productivité ou d'injectivité des forages ou d'altération de la ressource géothermique au cours du temps.

De même, les risques liés aux opérations ponctuelles (interventions sur puits, opérations de bouchage) ne seront pas abordés.

Les risques ou impacts de nature accidentelle seront représentés, le plus souvent, sous forme d'une séquence accidentelle simplifiée (Figure 8), faisant intervenir :

- un événement redouté, conventionnellement défini au centre de la séquence accidentelle ;
- un mécanisme initiateur, situé en amont de l'événement redouté et qui en constitue la cause ;
- un phénomène dangereux (ou impactant), c'est-à-dire un phénomène résultant de l'événement redouté et susceptible de porter atteinte aux personnes (phénomène « dangereux »), aux biens ou à l'environnement (phénomène « impactant ») ;

On parlera « d'accident » lorsqu'une séquence accidentelle se développe de manière complète et atteint effectivement des enjeux (personnes, biens, ou environnement). Dans les autres cas, on parlera « d'incident ».



*Figure 8. Représentation simplifiée d'une séquence accidentelle*

Toute analyse de risques s'intéresse en premier lieu au retour d'expérience des accidents et incidents précédemment survenus dans le domaine concerné. C'est pourquoi le chapitre 3 fait un point sur l'accidentologie recensée dans le secteur de la géothermie profonde.

Le chapitre 4 passe ensuite en revue un certain nombre de risques et d'impacts de nature chronique et discute de leur pertinence dans le cas des activités de géothermie profonde.

Les chapitres 5 à 7 examinent enfin la pertinence des risques ou impacts accidentels les plus fréquemment cités dans le cas de la géothermie profonde, regroupés en trois grandes catégories :

- les rejets accidentels de fluides en surface (chapitre 5) ;
- les pollutions éventuelles du milieu souterrain (chapitre 6) ;
- les risques de mouvements de terrain ou de secousses sismiques dommageables (chapitre 7).

Pour chacun d'entre eux, on présentera systématiquement :

1. l'évènement redouté concerné;
2. ses principaux mécanismes initiateurs possibles ;
3. les phénomènes dangereux ou impactants susceptibles d'en découler et les effets et conséquences potentiels sur les personnes, les biens ou l'environnement.

Une conclusion terminera chacun de ces chapitres et une synthèse générale des risques, impacts et nuisances potentielles liées à la géothermie profonde sera fournie à la fin du rapport (chapitre 8).

Notons que ce rapport n'a pas pour objet de faire un inventaire exhaustif et universel des risques liés à la géothermie profonde, dont l'analyse et les mesures de maîtrise doivent rester spécifiques à chaque site. Il vise à apporter un éclairage générique sur les risques les plus forts ou les plus fréquemment reportés dans l'accidentologie liée à la géothermie profonde.

### **3. RETOUR D'EXPÉRIENCE DES ACCIDENTS ET INCIDENTS**

#### **3.1 CONSTITUTION D'UNE BASE DE DONNÉES**

Il n'existe pas, à notre connaissance, de base de données spécifique sur les incidents ou accidents liés à la géothermie. Des informations sur ces événements sont fournies, parfois de manière sommaire, dans des rapports généraux sur la géothermie ou dans des articles de presse. Pour les plus conséquents d'entre eux, on peut trouver certains rapports spécifiques qui en donnent une description et une analyse plus précises. De manière générale, les informations sur les accidents ou incidents liés à la géothermie sont dispersées et très inégales.

Pour les répertorier au mieux, la démarche suivie a consisté à :

- identifier les accidents/incidents cités dans des rapports généraux sur la géothermie ou dans la presse ;
- rechercher des rapports plus spécifiques sur ces accidents ;
- analyser chaque accident et regrouper les principales informations correspondantes dans une base de données, présentée sous forme de tableau en 0.

Cette base de données comprend 35 accidents ou incidents qui sont synthétisés dans le Tableau 3. Pour alléger la rédaction, on utilisera par la suite le terme global « accident » pour désigner un incident ou un accident.

Seuls les accidents suffisamment renseignés ont été répertoriés. Il s'agit, pour la plupart, d'accidents survenus dans le domaine de la géothermie profonde. On y trouve également quelques accidents liés à la géothermie superficielle, dont le retour d'expérience a été jugé applicable à la géothermie profonde.

Cette base de données n'étant pas exhaustive, il sera difficile d'en tirer des enseignements quantitatifs sur l'accidentologie de la géothermie profonde et notamment, d'établir des comparaisons avec d'autres secteurs industriels. Les enseignements tirés seront donc essentiellement qualitatifs.

#### **3.2 ANALYSE DE LA BASE DE DONNÉES**

Les principaux enseignements qui peuvent être dégagés de l'analyse des 35 accidents/incidents recensés sont résumés ci-après, en tenant compte du fait qu'il existe un biais lié à l'origine des sources disponibles (essentiellement européennes) :

- 51% des cas répertoriés se sont produits en Europe, dans les pays suivants : France (7 cas), Allemagne (6 cas), Suisse (2 cas), Islande (2 cas) et Italie (1 cas) ; ce constat n'est pas révélateur d'une sécurité dégradée en Europe mais résulte du biais lié à l'utilisation prépondérante de sources d'information européennes ;
- 89% des cas répertoriés correspondent spécifiquement à des opérations de géothermie profonde et 11% à des cas de géothermie superficielle retenus comme pertinents pour le domaine de la géothermie profonde.

Tableau 3. Synthèse des évènements accidentels recueillis

Identifiant	Date	Type d'activité	Pays	Lieu	Evènement survenu	Phénomène résultant	Nb morts	Nb blessés
Agua Shuca	13/10/1990	Géothermie profonde	Salvador	Sud Ouest de Ahuachapan	Eruption	Explosion Projection	25	35
Ahuachapan 1	été 1994	Géothermie profonde	Salvador	Ahuachapan	Fuite en surface	Rejet toxique Rejet écotoxique	plusieurs	plusieurs
Ahuachapan 2	année 1994	Géothermie profonde	Salvador	Ahuachapan	x	x	plusieurs	plusieurs
Bâle	08/12/2006	Géothermie profonde	Suisse	Bâle	Séisme	Secousses ressenties	x	x
Berlin 1	1993-1994	Géothermie profonde	Salvador	Usulután	Fuite en surface	Emission gazeuse	x	x
Berlin 2	16/09/2003	Géothermie profonde	Salvador	Usulután	Séisme	Secousses ressenties	x	x
Biliran	23/06/2014	Géothermie profonde	Philippines	Biliran	Dégazage massif	Emission gazeuse	x	8
Bouillante	04/02/2010	Géothermie profonde	France	Bouillante, Guadeloupe	-	Désordres géotechniques Subsidence	x	x
Coulommiers	année 1996	Géothermie profonde	France	Coulommiers	Fuite souterraine	Rejet écotoxique	x	x
Geysers	1980-2010	Géothermie profonde	Etats-unis	Nord Califormie, 120 km au nord de San Francisco	Séisme	Secousses ressenties	x	x
Habanero	mois de nov. 2012	Géothermie profonde	Australie	Cooper Bassin	Séisme	Secousses ressenties	x	x
Hengill	15/10/2011	Géothermie profonde	Islande	Hengill, sud ouest de l'Islande	Séisme	Secousses ressenties	x	x
Hillsprich	à partir de 2006	Géothermie superficielle	France	Lorraine	Dissolution incontrôlée	Subsidence	x	x
Innamincka	24/04/2009	Géothermie profonde	Australie	Innamincka	Fuite en surface	Rejet toxique Projection	x	x
Insheim	mois d'avril 2010	Géothermie profonde	Allemagne	Bavière	Séisme	Secousses ressenties	x	x
Japon	année 1998	Géothermie profonde	Japon	-	Fuite en surface	Rejet toxique	1	x
Kirchheim	année 2007	Géothermie superficielle	France	Alsace	Intrusion d'eau dans une formation d'anhydrite	Surrection	x	x
Landau 1	15/08/2009	Géothermie profonde	Allemagne	Landau	Séisme	Secousses ressenties	x	x
Landau 2	13/03/2014	Géothermie profonde	Allemagne	Landau	-	Surrection	x	x
Lardarello	année 1985	Géothermie profonde	Italie	Lardarello	Fuite souterraine	Rejet écotoxique	x	x
Lochwiller	2008-2013	Géothermie superficielle	France	Alsace	Intrusion d'eau dans une formation d'anhydrite	Surrection	x	x
Margamukti	07/05/2015	Géothermie profonde	Indonésie	Pangalengan ouest de Java	-	-	x	x
Meaux	année 2013	Géothermie profonde	France	Meaux	-	x	x	x
Neustadt-Glewe	année 1998	Géothermie profonde	Allemagne	Neustadt-Glewe	x	x	x	x
Puna 1	07/08/2014	Géothermie profonde	Hawaii	Honolulu	Fuite en surface	Rejet toxique	x	x
Puna 2	15/06/1991	Géothermie profonde	Hawaii	Honolulu	Eruption	Rejet toxique	x	1
Rotokawa	01/01/2010	Géothermie profonde	Nouvelle Zélande	Rotokawa	Séisme	Secousses ressenties	x	x
Saint Gall	20/07/2013	Géothermie profonde	Suisse	Saint Gall	Séisme	Secousses ressenties	x	x
Salton Sea	1981-2012	Géothermie profonde	Etats-unis	Californie	Séisme	Secousses ressenties	x	x
Soultz-sous-Forêts	année 2003	Géothermie profonde	France	Alsace	Séisme	Secousses ressenties	x	x
Staufen	01/11/2007	Géothermie superficielle	Allemagne	Staufen	Intrusion d'eau dans une formation d'anhydrite	Surrection	x	x
Svartsengi	1976-1999	Géothermie profonde	Islande	Svartsengi	Déplétion excessive du réservoir	Subsidence	x	x
Unterhaching	-	Géothermie profonde	Allemagne	Bavière	Séisme	Secousses ressenties	x	x
Warakei	1950 à 1997	Géothermie profonde	Nouvelle Zélande	Warakei	Déplétion excessive du réservoir	Subsidence	x	x
Zunil 1	05/01/1991	Géothermie profonde	Guatemala	Sud-Ouest du Guatemala, 8 km au sud de Quetzaltenango	Fuite en surface	Explosion Projection	23	oui

### 3.2.1 ENSEIGNEMENTS EN TERMES DE RISQUES POUR LES PERSONNES

14% des accidents répertoriés ont donné lieu à la mort d'une ou plusieurs personnes. Sur l'ensemble des accidents, on dénombre 49 morts et 44 blessés, sachant que dans certains accidents, le nombre exact de victimes n'est pas précisé.

Cette proportion d'accidents mortels peut paraître impressionnante à première vue mais il faut avoir à l'esprit d'une part, que les accidents publiés et bien documentés sont généralement les plus graves et d'autre part, que 98% de ces décès sont dus à deux accidents particulièrement graves, survenus dans les années 1990, dans des contextes particuliers, peu transposables à la France :

- l'accident le plus meurtrier est celui d'Agua Shuca survenu au Salvador en 1990, qui a fait 25 morts et 35 blessés (Escobar et al., 1992 ; Goff & Goff, 1997) ; sa cause exacte n'a pas pu être définie mais l'évènement redouté survenu est une éruption massive (*blowout*) due à une montée en pression incontrôlée du réservoir ; notons qu'un tel scénario est fortement improbable dans le contexte français (en particulier en dehors des zones volcaniques) et serait de plus vraisemblablement maîtrisé du fait de l'utilisation, aujourd'hui systématique, d'un bloc d'obturation ou BOP<sup>13</sup> en tête de puits (voir chapitre 5.1.1) ;
- l'accident du forage Zunil 1 au Guatemala a également été très meurtrier avec 23 morts en 1991 (Goff & Goff, 1997 ; Flynn et al., 1991) ; il s'agit ici d'un grand glissement de terrain (dont on ne sait s'il a été induit ou pas par l'opération de forage géothermique) qui a provoqué la rupture du cuvelage, entraînant une projection massive de fluide géothermal chaud aux alentours ; cet accident est assez mal documenté et il n'est pas sûr que la majorité des victimes, qui a été ensevelie par le glissement de terrain, ait été impactée par le *blowout*.

Hormis ces deux accidents survenus, comme on peut le voir, dans des contextes très particuliers et sur lesquels les informations disponibles sont peu précises, on ne dénombre, sur l'ensemble des 33 accidents restants, que des victimes dues à des rejets de H<sub>2</sub>S :

- le seul décès date de 1998 au Japon ; il a eu lieu au cours d'une opération de maintenance et résulte d'un rejet de H<sub>2</sub>S en surface, qui s'est accumulé dans un local confiné ;
- un blessé est dû à un rejet de H<sub>2</sub>S lors d'une éruption sur puits à Puna 2 (Hawaï) en 1991 ; huit autres personnes ont été atteintes par une émission de H<sub>2</sub>S lors d'un essai de production à Biliran (Philippines) en 2014 ; il s'agit du seul accident sérieux recensé au cours de cette dernière décennie.

Il faut également noter le cas de deux autres accidents référencés Ahuachapan 1 et 2, survenus au Salvador en 1994, de nouveau dans un contexte très particulier. Sur ce site, le fluide géothermal ne pouvait pas être réinjecté sur place et un canal à ciel ouvert de 82 km de long a été construit entre la centrale géothermique et l'océan. Une fuite est alors apparue sur ce canal qui contenait de l'eau toxique et très chaude : il s'agit de l'accident Ahuachapan 1 qui ne semble pas avoir fait de victimes. Cependant, plusieurs personnes se sont alors approchées du canal, qui

---

<sup>13</sup> le BOP ou « bloc d'obturation de puits » est un équipement de sécurité situé en tête de puits et permettant d'obturer rapidement celui-ci en cas d'afflux non contrôlé de fluide.

ne bénéficiait pas de barrière de protection, y sont tombées et ont été brûlées : il s'agit de l'accident Ahuachapan 2. On notera que ce deuxième accident ne pourrait pas se produire aujourd'hui en Europe, compte-tenu du fait que le transport de fluide géothermal se ferait par canalisation. Quant au premier accident, le risque de fuite serait également nettement moindre dans le cas d'un transport par canalisation, même si ce scénario reste plausible.

Ainsi donc, si l'on exclut les accidents très particuliers de Agua Shuca, Zunil 1 et Ahuachapan 2, survenus dans des circonstances peu transposables au contexte français, notre recensement fait état d'un mort et de neuf blessés en près de trois décennies de retour d'expérience et sur environ 1700 centrales géothermiques actuellement en fonctionnement (voir § 2.2.1.2 et 2.2.2.2).

L'impression globale qui en ressort est que la géothermie profonde bénéficie d'une accidentologie assez faible. On rappelle toutefois que ce recensement n'est que partiel, puisqu'il se fonde essentiellement sur des sources occidentales et sur des informations trouvées dans le domaine public. Nous ne pouvons donc qu'encourager la profession, au travers de ses structures représentatives à l'échelle nationale et internationale, à poursuivre le travail initié ici par l'INERIS et à mettre en place un recensement systématique des incidents et accidents survenant dans le domaine de la géothermie profonde, afin de consolider une analyse quantitative qui ne peut être qu'amorcée dans le présent rapport.

### 3.2.2 ENSEIGNEMENTS EN TERMES D'ÉVOLUTION TEMPORELLE DE LA SÉCURITÉ

La répartition des victimes n'est pas homogène dans le temps. Ainsi, les accidents survenus avant les années 2000 totalisent 91% des victimes (Figure 9).

En outre, la gravité des événements semble avoir diminué au cours du temps : en effet, aucun mort n'est recensé après 2000 et seulement 18% des blessés.

Cette diminution du nombre de victimes et de la gravité de leurs blessures au cours du temps est d'autant plus significative que, pendant cette période, le nombre d'installations géothermiques n'a cessé de croître dans le monde : en effet, la puissance installée a été multipliée par 6 depuis 1995 dans le domaine de la chaleur directe (Lund & Boyd, 2015) et multipliée par 3 depuis 1985 dans le domaine de l'électricité (Bertani, 2015).

La diminution du nombre de victimes observée au cours du temps est donc considérée comme probablement révélatrice d'une amélioration des pratiques de sécurité et d'une prise en compte du retour d'expérience des premiers accidents, dans les opérations de géothermie profonde. Notons qu'une amélioration similaire est observée dans le domaine de l'exploration-exploitation des hydrocarbures (Lahaie, 2015a).

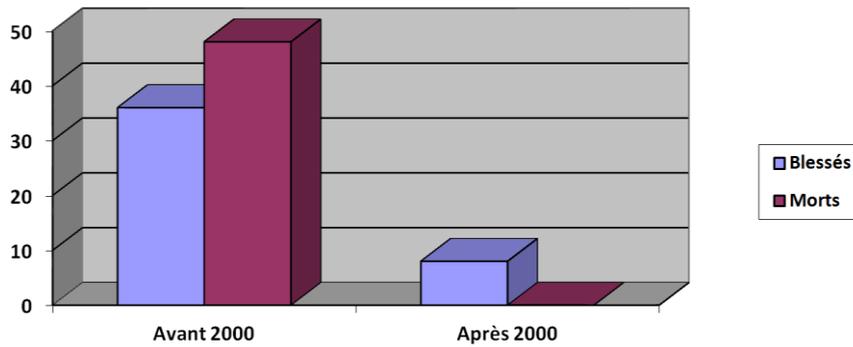


Figure 9. Nombre de victimes avant et après l'année 2000

### 3.2.3 ENSEIGNEMENTS EN TERMES DE TYPOLOGIE DES ACCIDENTS

Les événements redoutés les plus observés sont la sismicité induite (34% des cas), les fuites en surface ou souterraines (23%), les intrusions d'eau dans des formations gonflantes (anhydrite) (9%), des cas de déplétion excessive du réservoir géothermique ou d'éruption en surface (6% chacun), des dégazages massifs en surface ou des cas de dissolution incontrôlée de formations évaporitiques (3% chacun) (Figure 10). On notera également que, dans 17% des cas, le type d'évènement accidentel n'est pas connu.

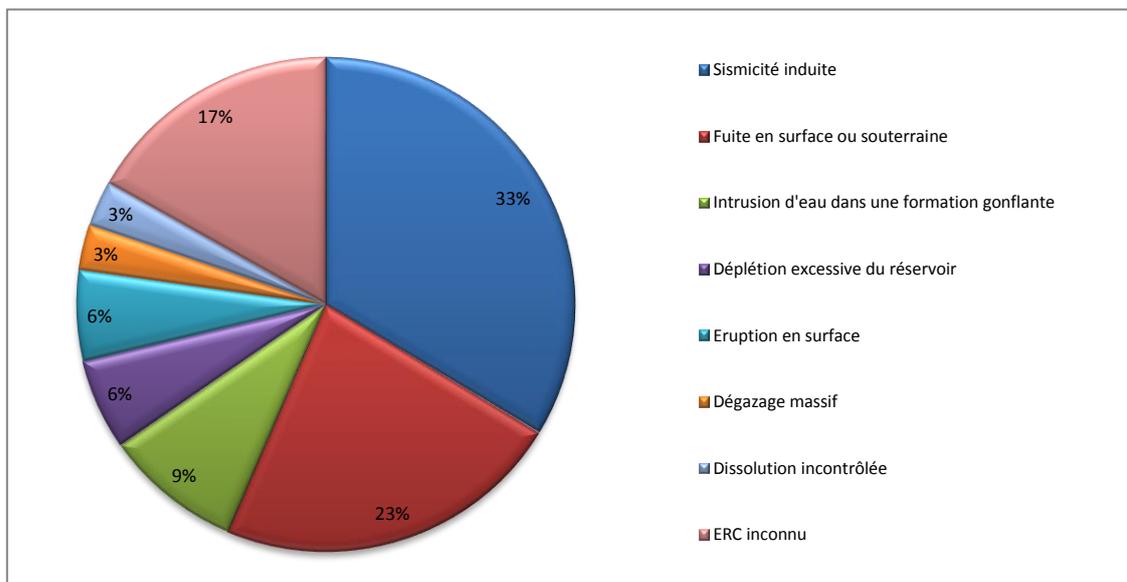


Figure 10. Nature et proportion des principaux événements redoutés dans l'accidentologie des opérations de géothermie profonde.

Les phénomènes dangereux ou impactants résultant le plus souvent de ces événements accidentels sont des secousses sismiques ressenties (dans 34% des cas), des mouvements de terrain (surrection ou subsidence) (23%), des rejets toxiques ou écotoxiques (20%), des émissions gazeuses (6%) ou des explosions/projections (également 6%) (Figure 11). Dans 11% des cas, le phénomène dangereux ou impactant n'est pas précisé ou n'existe pas.

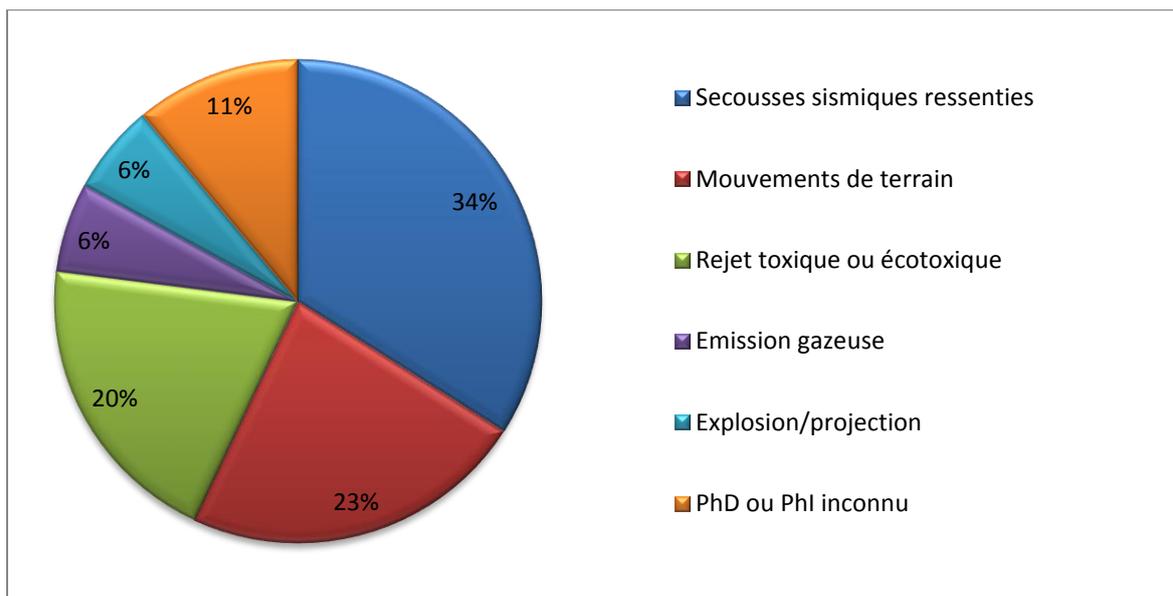


Figure 11. Nature et proportion des phénomènes dangereux ou impactants dans l'accidentologie des opérations géothermiques

Dans trois accidents plutôt atypiques, un mouvement de terrain a provoqué une rupture de cuvelage entraînant une fuite en surface. Ces accidents reflètent l'importance du choix de la zone d'implantation du forage par rapport aux risques naturels, notamment de mouvements de terrain.

Lorsque l'accident mène à des phénomènes de surrection ou de subsidence et que les forages géothermiques sont localisés dans des zones urbanisées (ce qui est généralement le cas), les conséquences sur les habitations et les infrastructures peuvent être importantes. Pour preuve, les accidents survenus dans le Bade-Wurtemberg en Allemagne (Staufen, Landau 2 ...) ou dans le Grand Est en France<sup>14</sup> (Lochwiller, Kirchheim, Hilsprich) dont l'origine est globalement la même, à savoir une intrusion d'eau dans des formations sensibles menant à leur affaissement par dissolution (sel, gypse) ou à leur gonflement (anhydrite, argile) (Catoire et al., 2017). Ce type d'intrusion peut résulter d'une méconnaissance de la géologie au droit du site, d'une mauvaise cimentation du puits, d'une absence de maîtrise des venues d'eau et/ou encore d'une déplétion excessive du réservoir due à une absence de réinjection (ou une réinjection partielle) du fluide géothermique dans le sous-sol. Même si ces accidents sont survenus dans le domaine de la géothermie superficielle, ils révèlent des phénomènes géologiques (dissolution ou gonflement de formations sensibles à l'eau) qu'il convient de prendre en compte lors de la conception et de la réalisation de tous forages, qu'ils soient superficiels ou profonds.

<sup>14</sup> Il est à noter que ces accidents se sont produits dans le domaine de la géothermie superficielle dite « de minime importance ». Leur survenue a conduit à une importante mise à jour de la réglementation française dans ce domaine (décret 2015-15 du 8 janvier 2015). Ainsi, du fait de leur position par rapport au zonage réglementaire établi depuis 2015 (MEDDE, 2015), ces types de travaux nécessiteraient aujourd'hui l'avis d'un expert agréé, voire d'une autorisation au titre du code minier. La survenue de tels accidents est donc beaucoup moins probable aujourd'hui, dès lors que les opérations de forage respectent cette réglementation.

Lorsque l'accident mène à des secousses sismiques ressenties, les dégâts matériels sont souvent mineurs mais l'impact psychologique et médiatique peut être très fort, notamment du fait de l'inquiétude suscitée pour d'éventuelles secousses plus fortes à venir. Ainsi, les cas de St-Gall ou de Bâle, en Suisse, survenus en pleine zone urbaine, ont conduit à l'arrêt provisoire ou définitif des projets géothermiques correspondants. Ces accidents montrent que l'occurrence d'une sismicité induite perceptible<sup>15</sup> est favorisée lorsque l'exploitation géothermique est réalisée dans un contexte de socle (plutôt qu'en bassin sédimentaire), dans des formations profondes, faillées et tectoniquement actives. Il existe cependant des mesures pour limiter et maîtriser ce risque, notamment modérer la pression d'injection, mettre en place un réseau de surveillance sismique afin de suivre l'activité sismique générée et anticiper l'occurrence d'un éventuel séisme perceptible, informer en amont la population locale, etc. (voir le § 7.1 pour de plus amples détails)

De manière générale, on peut retenir que les types d'accidents observés dans le contexte de la géothermie profonde ne sont pas spécifiques à ce domaine mais sont propres à toute activité d'exploitation du sous-sol par forages profonds : émanations de gaz en surface, fuites liées à des défauts d'étanchéité du puits, sismicité induite, désordres géomécaniques liés à une mauvaise isolation de formations évaporitiques, etc.

Cependant, le contexte de la géothermie profonde fournit des conditions plus propices à certains types d'accidents (ou de nuisances) et moins propices à d'autres. Ainsi, on peut considérer que les risques d'accidents de types *blowout* ou d'émanations de gaz en surface sont moins probables en géothermie profonde<sup>16</sup> que dans le cas de l'exploitation pétrolière, par exemple, du fait que les réservoirs sont généralement moins pressurisés et qu'il est moins fréquent d'y rencontrer des formations hébergeant des hydrocarbures ou des gaz toxiques (en tout cas hors contexte volcanique).

Par contre, la géothermie haute température, en particulier pratiquée dans les zones tectoniquement actives, semble fournir des conditions plus favorables à la survenue de sismicité induite ressentie que la géothermie basse température ou l'exploitation pétrolière classique. De même, on peut considérer que le contact direct de l'eau géothermale avec le cuvelage rend plus probable le percement de celui-ci par corrosion dans les forages de géothermie que dans les forages pétroliers. Des mesures préventives sont d'ailleurs prévues à cet effet : doublement des cuvelages en face des aquifères à protéger, surépaisseur des cuvelages, etc.

Nous reviendrons en détails sur l'ensemble de ces risques, ainsi que sur leurs mesures de prévention ou de réduction, aux chapitres 4 à 7 du rapport.

### **3.3 ANALYSE D'ACCIDENTS PARTICULIERS**

Nous avons procédé à la description de quelques accidents survenus dans le contexte de la géothermie profonde<sup>17</sup> (voir ci-après), puis à une analyse plus détaillée,

---

<sup>15</sup> Correspondant approximativement à une magnitude de l'ordre de 2 (voir définition de « sismicité induite » dans le glossaire en 0)

<sup>16</sup> Hormis éventuellement en contexte volcanique.

<sup>17</sup> Ou dans d'autres domaines (forages pétroliers, géothermie superficielle) pertinents pour la géothermie profonde.

sous forme de fiches, de six cas particulièrement bien renseignés et représentatifs des principaux risques (voir en 0) : Bâle (Suisse), Saint Gall (Suisse), Coulommiers (France), Puna 2 (Hawaï, USA) et Staufen (Allemagne).

### 3.3.1 SÉISMES INDUITS PAR STIMULATION HYDRAULIQUE

La production d'évènements microsismiques est une conséquence directe et attendue des opérations de stimulation hydraulique, où un volume conséquent d'eau est injecté sous pression dans les fractures naturelles de la roche, ainsi parfois que des opérations de stimulation chimique ou thermique. Ce qui est par contre accidentel est la survenue de secousses sismiques ressenties par la population.

En géothermie profonde, les séismes induits sont principalement produits au cours de la phase d'essais, lors des opérations de stimulation hydraulique (ou chimiques), mais ils peuvent également survenir en phase d'exploitation.

#### 3.3.1.1 Soultz-sous-Forêts (Bas-Rhin)

Le site de Soultz-sous-Forêts se trouve à 50 km au nord de Strasbourg. Depuis 1987, quatre forages y ont été réalisés jusqu'au granite naturellement fracturé où circule un fluide géothermal saumâtre<sup>18</sup> : trois forages de plus de 5000 m de profondeur et un de 3600 m. Pendant plus de 20 ans, ce site international de développement et de recherche a été le plus avancé au monde dans le domaine de la géothermie profonde. Depuis 2008, une centrale électrique industrielle d'une puissance de 2,1 MW<sub>e</sub> y produit de l'électricité.

Lors des phases d'essais, chaque stimulation a engendré plusieurs milliers d'évènements sismiques avec des magnitudes allant de -2,0 à 2,9 (Cuenot & Genter, 2013). La très grande majorité d'entre eux étaient des microséismes (voir définition en ANNEXE. 1) : sur un total de près de 45 000 évènements engendrés par la stimulation des forages GPK2, GPK3 et GPK4 de 2000 à 2005, seuls 9 ont atteint la magnitude 2, à partir de laquelle ces évènements ont été ressentis par la population (ESG, 2015).

La localisation des hypocentres ou foyer des séismes montre d'autre part leur étroite relation avec les forages géothermiques (Figure 12a). Il est probable qu'il existe également un contrôle structural par les fractures et failles, comme le montre l'anisotropie du nuage de points sur la vue en plan (Figure 12b).

---

<sup>18</sup> <http://labex-geothermie.unistra.fr/article200.html>

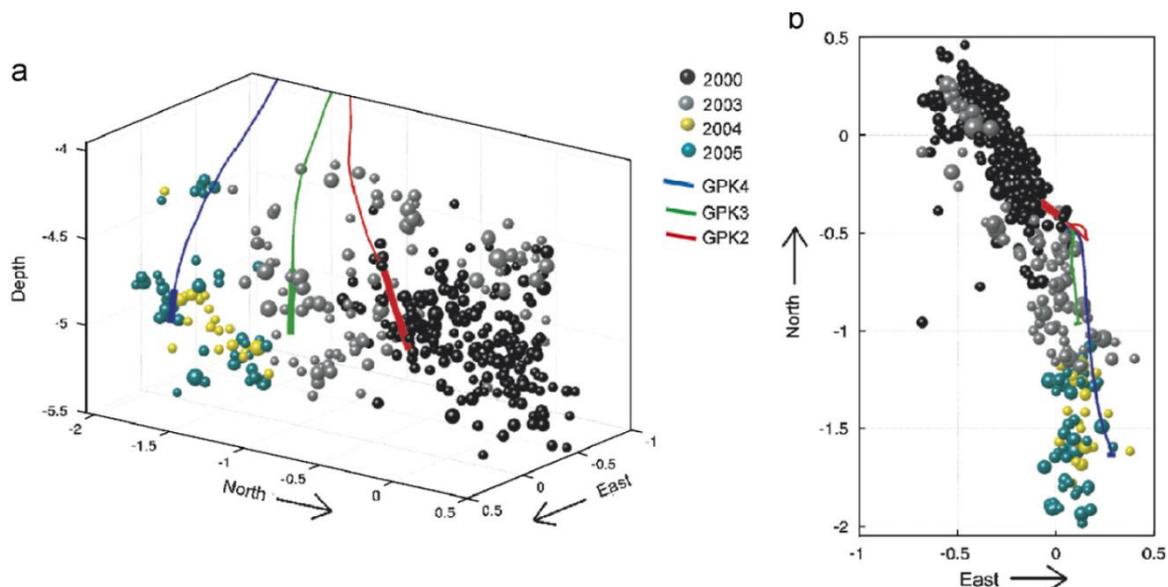


Figure 12. Nuages microsismiques enregistrés lors des différentes stimulations hydrauliques effectuées à Soultz-sous-Forêts (Charléty et al., 2007)

Après la phase d'essais, des tests de circulation ont été réalisés préalablement à la mise en exploitation de la centrale mais dans des conditions très proches de celles de l'exploitation (ESG, 2015) :

- en 2005, un premier test a duré 6 mois, entre les forages de production GPK2 et GPK4 et le forage d'injection GPK3 ; il a engendré environ 600 micros sismes et 2  v nements sismiques ressentis par la population, atteignant une magnitude maximum de 2,3 ;
- en 2008 et 2009, trois nouveaux tests de circulation ont été réalisés avec les pompes d'exploitation en place ; l'activité sismique est alors rest e très modérée avec un total d'environ 443  v nements dont aucun n'a été senti, la magnitude maximale n'ayant été que de 1,7 ;
- en 2010, un autre test de circulation d'eau en condition d'exploitation a été mené pendant 11 mois mais sur un seul forage d'injection dans lequel a été appliquée une surpression de l'ordre de 50 bar (ESG<sup>19</sup>) ; ce test a généré 400 micros sismes et 4  v nements d'une magnitude supérieure à 2 (Cuenot, 2012) ;
- en 2011, un dernier test de circulation d'eau a sollicité deux forages d'injection avec une surpression d'une vingtaine de bar, ce qui n'a engendré que 5  v nements en 6 mois dont aucun n'a été senti.

Cet exemple montre que la prise en compte des informations obtenues lors des tests peut permettre de réduire le nombre de séismes ressentis par la population.

<sup>19</sup> <http://www.es-geothermie.fr/documentation/faq>

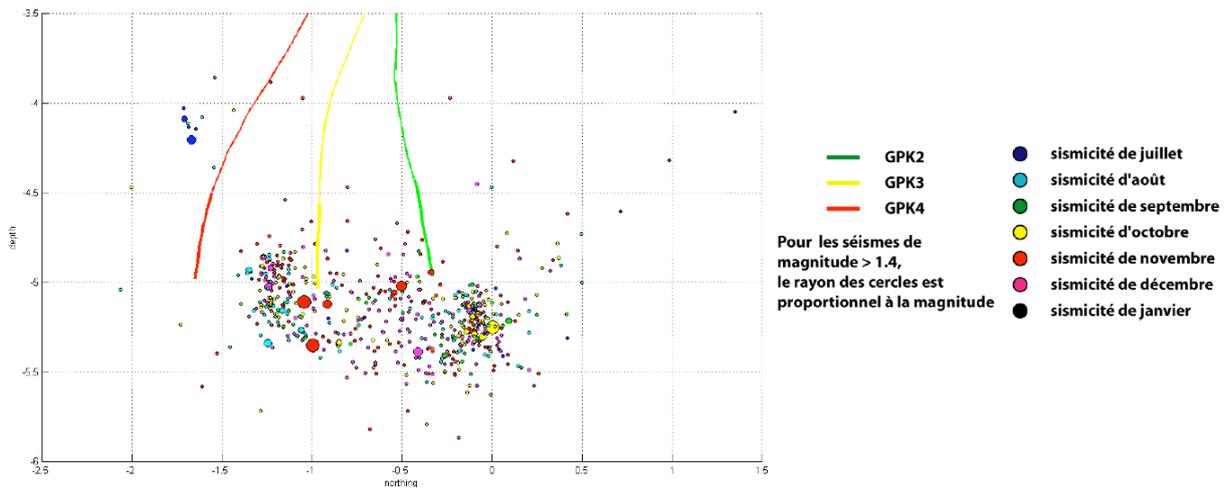


Figure 13. Activité microsismique enregistrée lors du test de circulation de 2005 à Soultz-sous-Forêts (ESG, 2015)

### 3.3.1.2 Bâle (Suisse)

En 2006, le projet géothermique « *Deep Heat Mining* » de Bâle (Suisse) constituait la première tentative de réalisation d'un système EGS dans le pays (Géo-Energie Suisse, 2014). Le premier forage a été implanté en pleine ville et a atteint environ 5000 m de profondeur. Les opérations de stimulation hydraulique qui ont suivi ont engendré de nombreux microséismes et au moins trois événements sismiques perçus par la population. Ces opérations ont été temporairement suspendues mais, pendant ce temps, est survenu un séisme de magnitude 3,4, exceptionnellement fort pour une opération géothermique (Doherr, 2012). Ce séisme a provoqué des dommages légers à certains bâtiments (fissuration ou chute de crépi) mais surtout de nombreuses plaintes de la population. On doit en effet se rappeler que Bâle a subi deux séismes naturels dévastateurs en 1348 et 1356, ce dernier ayant détruit la ville et fortement marqué son histoire.

Suite à ces événements, l'opération a été abandonnée, ainsi que le projet de centrale correspondant (voir détails dans la fiche en 0).

### 3.3.1.3 Landau et Insheim (Allemagne)

En phase d'essais, à Landau (2009) et Insheim (2010), des opérations EGS ont engendré des séismes dont la magnitude a atteint respectivement 2,7 et 2,4 et qui ont été ressentis par la population (Groos et al, 2013) (Figure 14).

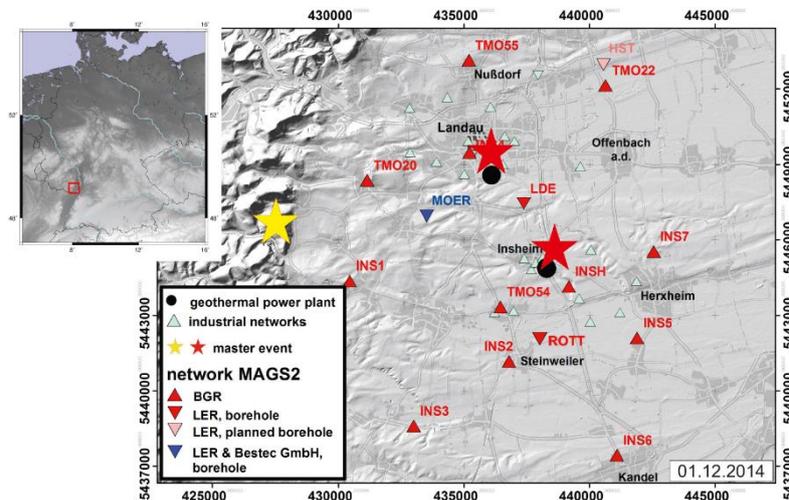


Figure 14. Séismes induits par l'exploitation des sites géothermiques de Landau et Insheim en Allemagne (Brüste et al., 2015)

*Légende* : ● centrale géothermique, ▲ industrie, ▼ réseau de surveillance sismique, ★ séisme (en rouges, les séismes de nature géothermique ; en jaune, celui dû à des tirs en carrière)

### 3.3.1.4 Cooper Basin (Australie)

Sur ce site, les tests de stimulation réalisés en 2003, 2005 et 2012 ont engendré au total plus de 45 000 événements sismiques dont la magnitude a culminé à 3,7 (Baish & Vörös, 2010). La localisation de ces événements a tout d'abord été centrée sur le puits d'injection puis elle a migré vers l'extérieur lorsque la durée de la stimulation a augmenté : elle s'est ainsi déplacée d'environ 1 km sur une période de 45 jours. Les auteurs ont montré que, à l'instar de Soultz-sous-Fôrets, la distribution spatiale des séismes induits était initialement contrôlée par des structures bidimensionnelles pouvant correspondre à des failles préexistantes.

Toujours à Cooper Basin, le champ géothermique de Habanero a fait l'objet d'une vaste campagne de stimulation hydraulique en novembre 2012, dans le but d'améliorer la connectivité du réservoir EGS profond (Humphreys, 2014). La campagne a duré 3 semaines pendant lesquelles ont été injectés 34 000 m<sup>3</sup> d'eau à 4077 m de profondeur, au niveau de la faille d'Habanero. Un total de 27 000 événements sismiques a été recensé dont 20 000 ont pu être localisés sur une surface de 4 km<sup>2</sup>, avec des magnitudes locales allant de -1,6 à 3,0. La Figure 15 montre que le nuage de points s'étend principalement sur une surface subhorizontale correspondant probablement à un plan de faille.

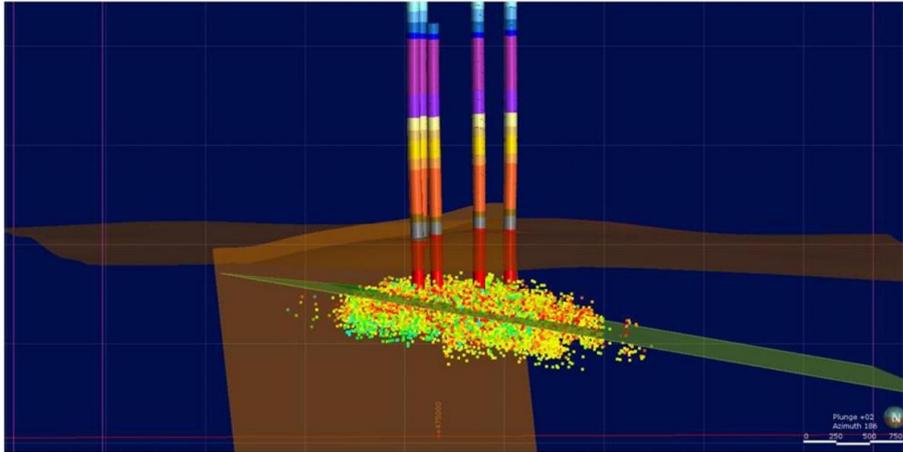


Figure 15. Localisation des hypocentres de séismes lors de la stimulation hydraulique du forage Habanero 4 à Cooper Basin, Australie (Humphreys, 2014)

*Légende* : les tubes verticaux sont les forages géothermiques (Habanero 4 étant le plus à gauche) avec les formations géologiques recoupées et le plan vert, celui de la faille d'Habanero.

### 3.3.1.5 Wairakei (Nouvelle-Zélande)

Maréchal et al. (2008) mentionnent que 90 microséismes de magnitude 1 à 2 (dont trois ont été ressentis) se sont produits sur le champ de Wairakei pendant une injection à haute pression. Les événements sismiques ont débuté dans les 24 heures qui ont suivi l'injection à une surpression de 44 à 55 bar.

### 3.3.1.6 The Geysers et Salton Sea (Californie, USA)

Salton Sea est l'un des plus importants sites géothermiques des Etats-Unis. Le fluide géothermique, très chaud, est pompé vers 2 km de profondeur à raison de 10 Mm<sup>3</sup>/mois et produit de la vapeur en surface. Environ 81% de cette vapeur est condensée et renvoyée dans le réservoir, le reste étant perdu dans l'atmosphère. Il existe donc ici un déficit chronique de fluide géothermique depuis le démarrage des opérations en 1982. Parallèlement à cela, on observe une recrudescence des séismes (McGuire et al., 2015) : de 1981 à 2012, plus de 10 000 séismes et microséismes de magnitude supérieure à 1,75 ont été enregistrés. Ce « bruit de fond sismique » est modélisable par une combinaison linéaire des taux d'injection et d'extraction (Brodsky & Lajoie, 2013) : la sismicité des dernières années est en effet corrélée au volume net de fluide perdu entre l'extraction et l'injection.

A The Geysers, l'étude des séismes induits par l'exploitation géothermique entre 2008 et 2009 montre que plusieurs mécanismes peuvent opérer à différentes échelles (Martinez-Garzon et al., 2015) : des mécanismes thermoélastiques<sup>20</sup> prédominants, induits par le contraste thermique du fluide injecté dans le champ proche du forage de réinjection (voir chapitre 7.1.2.2) ainsi que des mécanismes poroélastiques<sup>21</sup> qui, lors des périodes de forte réinjection, induisent une augmentation de la pression de pores à plus grande distance.

<sup>20</sup> C'est-à-dire relatifs à l'élasticité d'un corps et à sa dilatation en fonction de la chaleur.

<sup>21</sup> C'est-à-dire relatifs à l'élasticité d'un matériau poreux renfermant un fluide

### 3.3.2 MOUVEMENTS DE TERRAIN LIÉS À DES INTRUSIONS D'EAU SOUTERRAINE DANS DES FORMATIONS SENSIBLES

#### 3.3.2.1 Soulèvement de la surface lié au gonflement d'une formation évaporitique

Il s'agit du mécanisme principal de soulèvement de la surface du sol constaté lors d'accidents récents survenus dans des contextes de géothermie superficielle. Ce mécanisme résulte du gonflement d'une formation sensible, peu profonde, suite à une intrusion accidentelle d'eau non géothermale. C'est notamment le cas des couches d'anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ ) qui peuvent s'hydrater en gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) au contact d'une eau non saturée en sulfates, ce qui engendre une augmentation de volume de la matrice rocheuse de l'ordre de 60% (Weber, 2011).

En France, un exemple récent de ce type de phénomène concerne la commune de Lochwiller dans le Bas-Rhin (Boissavy & Garroustet, 2013 ; Antoine, M., 2013 ; Miguët, 2014 ; Ercket, G., 2015). Il s'agit là d'un forage de 140 m de profondeur destiné à une opération de géothermie superficielle pour un besoin de chauffage individuel. Le problème a résulté notamment d'une mauvaise reconnaissance de la géologie locale, d'une mauvaise cimentation du forage et de la difficulté de gérer une arrivée d'eau artésienne survenue vers 60 m de profondeur.

Un phénomène comparable s'est produit à Kirchheim (Bas-Rhin), à une dizaine de kilomètres de distance (Miguët, 2014 ; Catoire et al., 2017). Le gonflement de l'anhydrite a plutôt été engendré par des infiltrations d'eau le long d'un forage réalisé en 2007 : la moindre importance de cette arrivée d'eau expliquerait la faiblesse des dégâts avec, pour l'instant, l'atteinte d'un seul immeuble collectif.

Dans le Bade-Wurtemberg (Allemagne), six sites comparables ont été impactés par ce phénomène (Catoire et al., 2017). Le plus connu est celui de Staufen-im-Brisgau où un forage de géothermie superficielle a traversé un banc d'anhydrite à l'automne 2007 (voir détails dans la fiche en 0). Cette opération a induit un gonflement de la surface du sol qui a impacté des centaines de bâtiments (Weber, 2011 ; Libération, 2013).

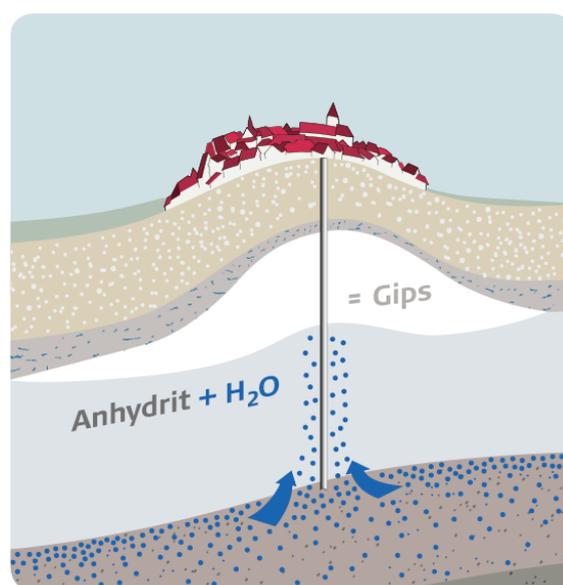


Figure 16. Schéma du gonflement de l'anhydrite (anhydrit) lors de sa transformation en gypse (gips) peu après la réalisation du forage de Staufen-im-Brisgau, Allemagne (Weber, 2011)

### 3.3.2.2 Affaissement ou effondrement en surface lié à la dissolution d'une formation saline

Il existe un cas d'affaissement lié à la dissolution d'une formation saline dans le contexte de la géothermie superficielle mais aucun cas connu d'effondrement.

L'affaissement en question est survenu à Hilsprich (Moselle), environ un an après le creusement de deux forages de géothermie superficielle à 95 et 99 m de profondeur (Barras, 2015 ; Carton, 2015, Bezelgues-Courtade et al., 2012 ; Catoire et al., 2017). Suite aux difficultés survenues pendant la foration, les ouvrages n'ont pas pu être correctement cimentés, ce qui a permis la mise en connexion de la nappe phréatique avec un horizon salifère de 20 m d'épaisseur situé à une centaine de mètres de profondeur. Du fait de la différence de charge entre la nappe superficielle d'eau douce et la nappe salée présente en profondeur, une percolation d'eau douce s'est produite et a engendré une dissolution du sel qui s'est traduite par des affaissements en surface (Figure 18). Une cuvette d'affaissement de plus de 1 km d'extension s'est formée avec une amplitude verticale atteignant 90 cm au centre, induisant des dommages sur une quinzaine de maisons et sur le réseau routier jusqu'à 450 m alentour.

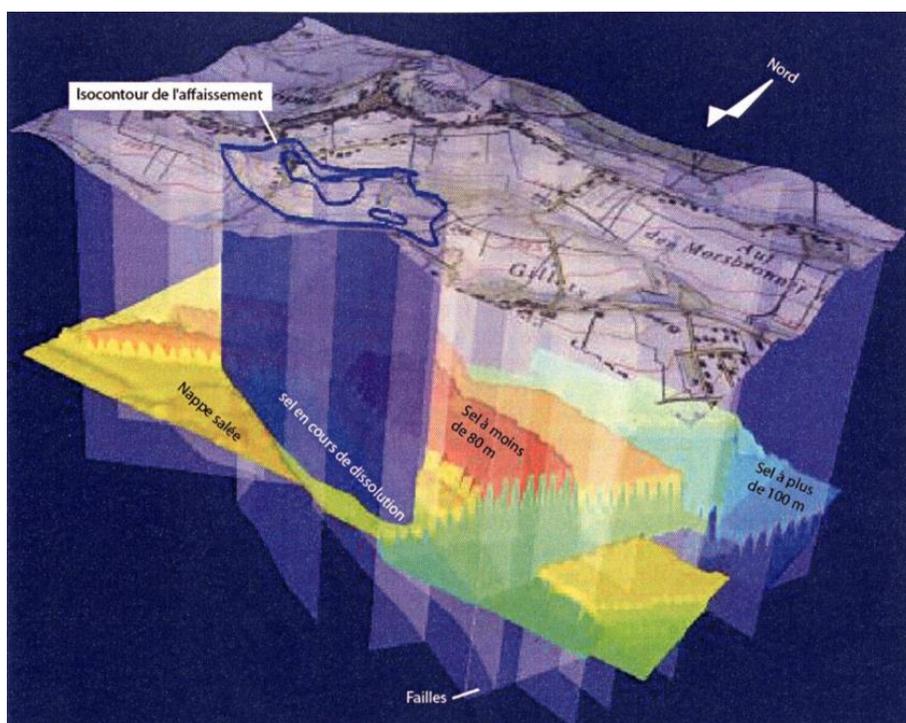


Figure 17. Représentation 3D schématisée du toit du sel et de la zone d'affaissement (courbes bleues) à Hilsprich (Carton, 2015)

Si aucun effondrement ne s'est jamais produit dans le domaine de la géothermie, ce type d'évènement n'en reste pas moins possible dans tout forage traversant des évaporites, comme le démontre l'exemple survenu dans le contexte pétrolier, à Haoud Berkaoui en Algérie (Morisseau, 2000). Sur ce site, un forage d'exploitation de pétrole a été abandonné sans cuvelage ni comblement (Figure 18). Ce forage a alors mis en communication un aquifère profond en surpression avec un niveau salifère sus-jacent, dont il était séparé par un niveau imperméable. Le sel a été lessivé en profondeur, ce qui a conduit à la formation d'une cavité

souterraine puis d'un effondrement spectaculaire en surface, d'environ 300 m de large et 75 m de profondeur.

Un accident similaire a été observé à Wink Sink (Etats-Unis, Texas), suite à la corrosion d'un puits pétrolier non cimenté (Baumgardner et al., 1982 ; K.S. Johnson, 1987 et 2001).

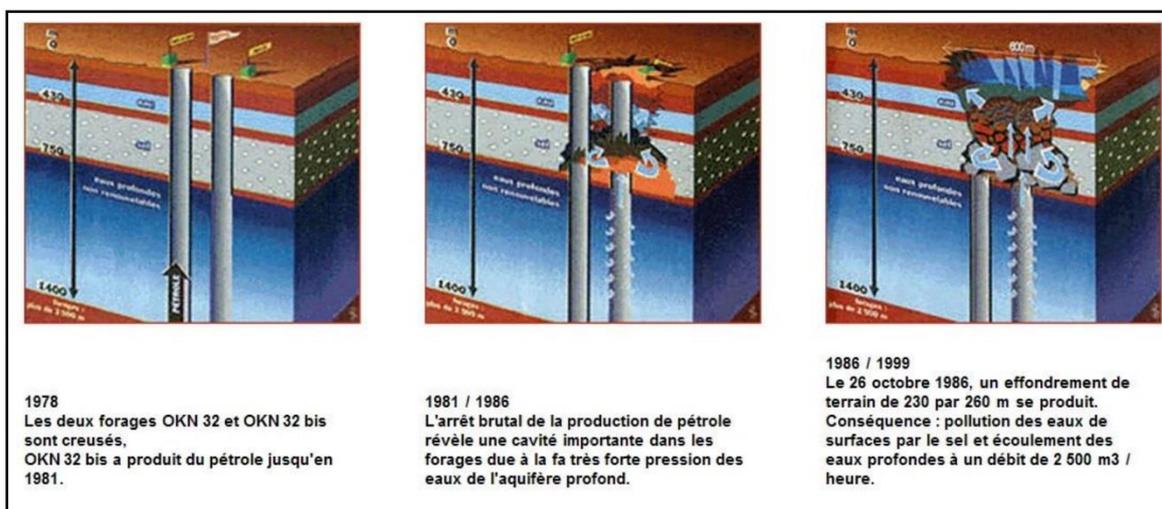


Figure 18. Mécanisme de l'effondrement d'Haoud Berkaoui, Algérie (d'après <http://www.h2o.net/magazine/urgences/catastrophes>)

### 3.3.3 INTRUSION DE FLUIDE GÉOTHERMAL DANS UN AQUIFÈRE D'EAU DOUCE

#### 3.3.3.1 Coulommiers (Seine-et-Marne)

En 1996, à Coulommiers, une fuite sur un forage géothermie profonde a conduit à une intrusion accidentelle de fluide géothermique dans des aquifères d'eau douce superficiels. Il s'agissait d'un fluide issu du réservoir du Dogger, situé vers 2000 m de profondeur. Cette fuite est apparue sur un forage de réinjection en cours d'exploitation et a été détectée suite à l'observation d'une baisse anormale de pression en tête de ce forage entre octobre 1995 (pression de 10 bar) et juillet 1996 (pression de 1,2 bar). Des diagraphies ont permis de repérer deux perforations du cuvelage, situées vers 50 m et 440 m de profondeur, soit respectivement au droit des calcaires de Champigny (Tertiaire) et de la craie. Ces deux formations renferment chacune un aquifère d'eau douce, localement capté pour l'alimentation en eau potable. Ces perforations sont probablement apparues en octobre 1995 : la fuite, d'abord faible, a dû atteindre son débit maximal (soit 70% des 135 m<sup>3</sup>/h produits) en avril 1996, ce qui représente un volume total de fuite de l'ordre de 660 000 m<sup>3</sup>. Du fait des faibles caractéristiques hydrodynamiques de la craie, située ici en profondeur, il a été admis que l'essentiel du panache de fluide géothermique avait dû s'épancher au sein des calcaires de Champigny. Il s'agissait d'une eau chaude (50 à 85 °C), moyennement acide (pH 6,1 à 6,5) mais surtout chargée en sels (6 à 35 g/L), en gaz dissous (H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>), en sulfures et en bactéries sulfato-réductrices. Cependant, le suivi des captages d'eau potable de la ville, implantés dans ce même aquifère, n'a finalement montré aucun indice significatif d'arrivée de fluide géothermique. Des détails complémentaires sur cet événement sont fournis dans la fiche en 0.

### 3.3.3.2 Belcova (Turquie)

Sur ce site géothermique, situé à Belcova en Turquie, le fluide extrait n'est pas réinjecté dans le réservoir géothermique situé à 1 km de profondeur mais dans un aquifère superficiel sus-jacent, à seulement 150 m de profondeur (Aksoy et al., 2009) : il s'agit d'un aquifère alluvial, utilisé pour l'eau potable et l'irrigation (Figure 19).

Le forage de production a été implanté au sein d'une faille drainant naturellement un mélange d'eaux thermales et d'eaux froides, en provenance de différentes profondeurs. La mise en exploitation de ce doublet de forages géothermiques a perturbé l'équilibre hydrodynamique existant en accélérant la circulation du fluide géothermique entre le réservoir profond et l'aquifère alluvial superficiel. Il s'en est suivi une pollution de cet aquifère par de l'eau chaude (la température de l'eau y a atteint 22 °C à 42°C par endroits) et par divers éléments chimiques d'origine géothermale dont l'arsenic, l'antimoine et le bore.

Notons que ce cas est cité pour mémoire mais il n'est pas transposable à la France, où il n'existe pas de contexte d'exploitation similaire.

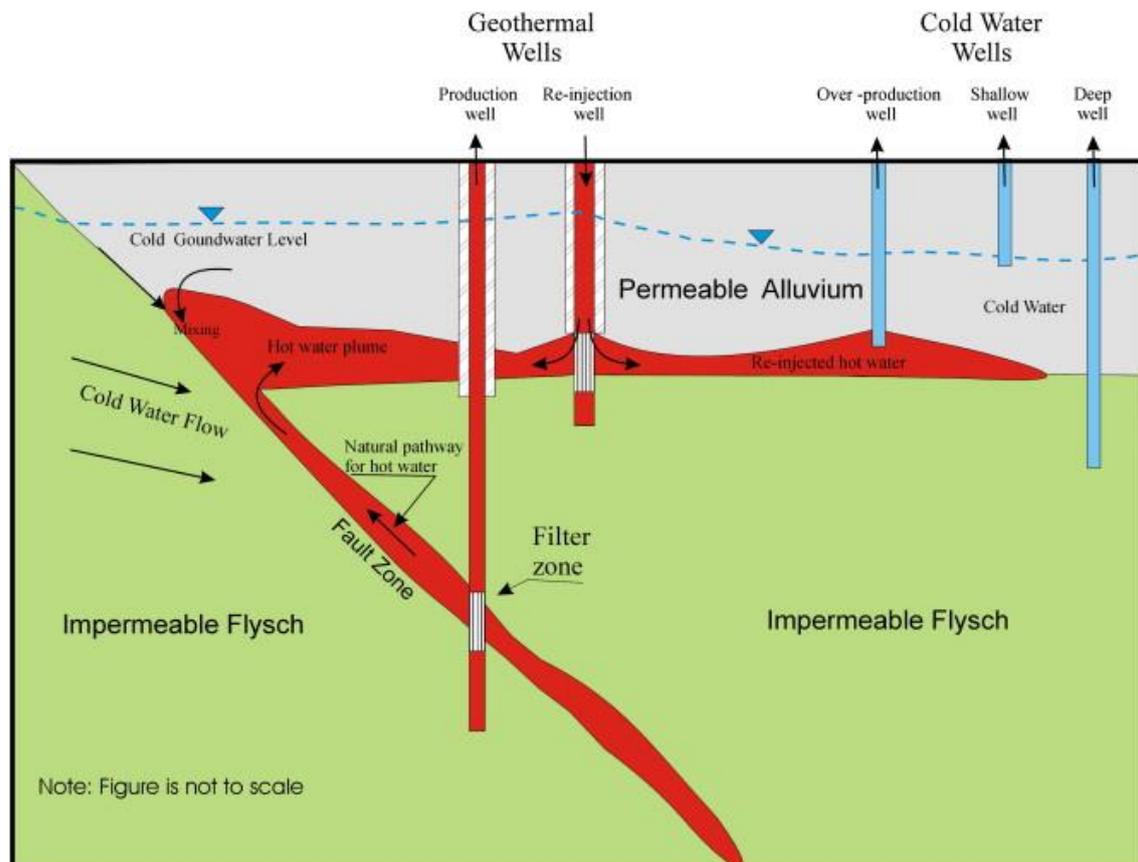


Figure 19. Représentation schématique du cheminement du fluide géothermique depuis le réservoir profond (Flysch) vers l'aquifère superficiel alluvial à Balcova, Turquie (Aksoy et al., 2009)

## **4. IMPACTS CHRONIQUES ET NUISANCES POTENTIELS LIÉS À LA GÉOTHERMIE PROFONDE**

### **4.1 GÉNÉRALITÉS**

Les phases de vie pendant lesquelles un site de géothermie profonde occasionne le plus de nuisances et d'impacts chroniques potentiels sont les phases de foration et d'essais. En pratique, ces phases sont limitées dans le temps : elles représentent une durée cumulée de quelques mois à un an environ, alors que la durée de vie d'une installation géothermique est de plusieurs décennies.

La plupart de ces impacts et nuisances potentiels ne sont pas spécifiques à la géothermie et sont propres à tout chantier de forage, que ce soit pour le captage d'eau potable ou la recherche d'hydrocarbures. Nous les passons néanmoins en revue ci-après, en mettant en exergue les aspects les plus en lien avec la géothermie profonde.

On rappelle que ces impacts et nuisances doivent, avant le démarrage du chantier, avoir été évalués dans l'étude d'impact (définie à l'article R. 122-3 du code de l'environnement). Cette étude doit également présenter les mesures envisagées par l'exploitant pour les limiter au mieux.

Notons que dans les villages de Sultz-sous-Forêts et de Kutzenhausen (Bas-Rhin), situés près de la centrale géothermique de Sultz-sous-Forêts, une enquête a été réalisée au cours de l'été 2012, portant sur 203 personnes (Cuenot & Genter, 2013). Les impacts perçus comme les plus importants liés à la centrale sont le bruit et la sismicité induite, suivis par la pollution et l'impact paysager (Figure 20).

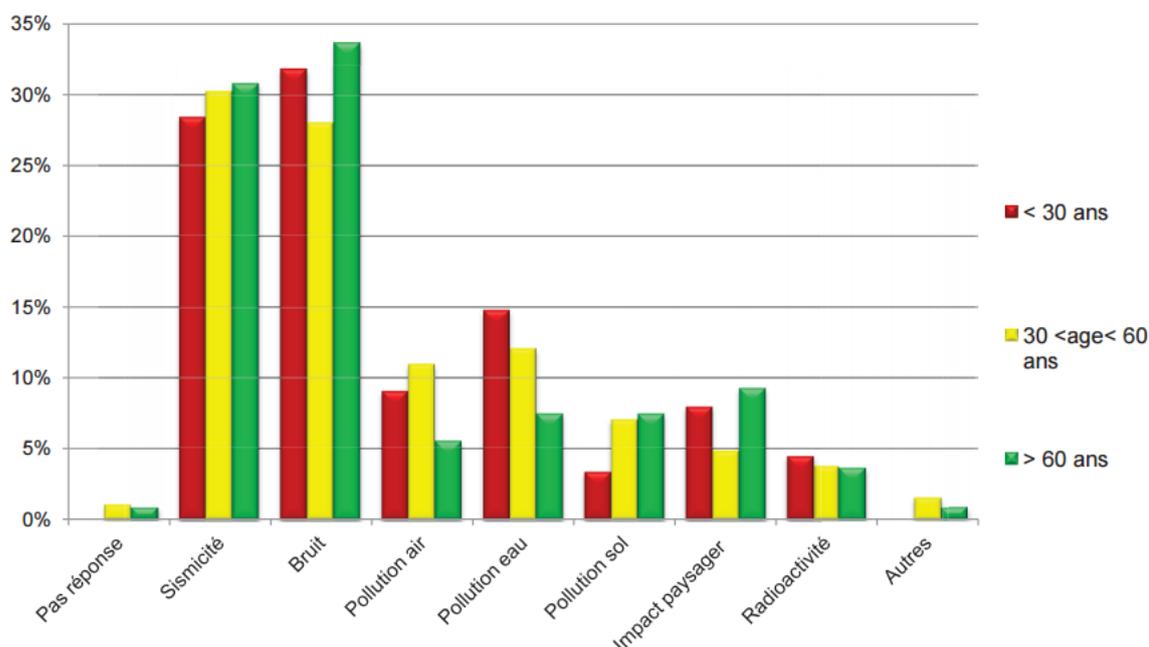


Figure 20. Résultats de l'enquête de voisinage réalisée en 2012 sur le site de la centrale géothermique de Sultz-sous-Forêts (Cuenot & Genter, 2013)

## 4.2 IMPACT PAYSAGER ET OCCUPATION DU SOL

### 4.2.1 EN PHASE DE FORATION ET D'ESSAIS

En phase de foration et d'essais, l'impact paysager d'un chantier de géothermie profonde se limite à une gêne temporaire occasionnée par la présence d'une machine de forage (dotée d'un mât imposant) et d'un terrain clôturé (Figure 21). L'ordre de grandeur de leurs dimensions est de 30 à 50 m pour la hauteur du mât et 4000 à 8000 m<sup>2</sup> pour la superficie du chantier. La durée globale d'un chantier de réalisation d'un doublet géothermique est de l'ordre de 6 mois à 1 an.



a) en Allemagne (Meier & Zingg, 2014)



b) en Afrique du Sud (DRET, 2011)

Figure 21. Exemples de chantiers de géothermie profonde

### 4.2.2 EN PHASE D'EXPLOITATION

Une fois la ressource géothermique prouvée, débute la phase d'exploitation qui va induire un impact paysager définitif et un gel du sol pendant la durée de vie de la centrale, soit entre 20 et 40 ans. On rappelle cependant que les impacts paysagers doivent avoir été pris en compte dès la phase de faisabilité du projet. Ces impacts sont principalement dus aux bâtiments qui vont abriter les équipements de production énergétique et, dans le cas d'une production d'électricité, aux installations de refroidissement (condenseurs). Les dimensions classiques d'un bâtiment de centrale géothermique sont de l'ordre d'une trentaine de mètres de côté et d'une dizaine de mètres de hauteur. Quelques exemples en sont donnés en Figure 22. L'emprise finale au sol va donc dépendre du type d'installation géothermique : une installation de chauffage urbain nécessite beaucoup moins d'espace qu'une unité de production conjointe de chaleur et d'électricité combinée avec des condenseurs refroidis par air (Agemar et al., 2014).



a)



b)



c)



d)

Figure 22. Exemples d'intégration paysagère de quelques centrales géothermiques

Légende :

a) Centrale de Rittershoffen, Bas-Rhin, 24 MW<sub>th</sub> (Leibel, 2016)

b) Centrale géothermique de Chevilly-Larue, 20 MW<sub>th</sub>, Val-de-Marne (<http://reseaux-chaaleur.cerema.fr/centrale-geothermique-chevilly-larue-94>)

c) Centrale de Bouillante, Guadeloupe, 15 MW<sub>e</sub> ([www.geothermie-perspectives.fr/](http://www.geothermie-perspectives.fr/))

d) Centrale de Soultz-sous-Forêts, Bas-Rhin, 2 MW<sub>e</sub> ([www.geothermie-perspectives.fr/](http://www.geothermie-perspectives.fr/))

### 4.3 BRUIT ET VIBRATIONS

#### 4.3.1 EN PHASE DE FORATION ET D'ESSAIS

Le bruit fait partie des nuisances considérées par les populations comme les plus importantes liées à la géothermie. Nuisances sonores et vibrations associées sont essentiellement produites pendant les phases de foration, d'essais et de construction des installations (Webb et al., 1984).

Ces nuisances sont susceptibles de se produire sur toute la durée d'un chantier de géothermie profonde qui est de l'ordre de 2 ans, soit environ 6 mois à 1 an pour réaliser les forages et les tests, et environ 1 an pour construire la centrale en surface. Pendant la phase de foration, le chantier fonctionne en permanence, c'est-à-dire 24H/24 et 7J/7 : même s'il reste généralement moyen et acceptable, le niveau de bruit peut donc finir par apparaître lancinant, surtout en période sensible (nuit, jours de repos).

Ce bruit est principalement dû au fonctionnement de la machine de forage, à la circulation des engins (notamment des camions d'approvisionnement) et à certaines opérations (cimentation, stimulation hydraulique, venting...).

Une spécificité des forages de géothermie, par rapport aux forages d'hydrocarbures par exemple, est qu'ils sont généralement implantés en zone urbaine. Pour en atténuer les effets sur les riverains, des murs anti-bruits sont généralement installés (voir Figure 21). Les entreprises de forage utilisent également de plus en plus des appareils spécialement conçus pour travailler en environnement urbain : le treuil de forage est remplacé par des vérins hydrauliques silencieux, les tiges de forage sont manipulées par un bras automatique, les moteurs thermiques sont remplacés par des moteurs électriques, etc. De plus, les opérations les plus bruyantes peuvent être planifiées pour éviter les périodes sensibles et faire l'objet d'une information des riverains.

Les nuisances sonores émises par les équipements de forage se situent principalement dans les basses fréquences (Meier & Zingg, 2014) et débordent donc sur le domaine des vibrations. Lors du creusement du second forage géothermique de Rittershoffen (Bas-Rhin), Maurer et al. (2016) ont ainsi mesuré des vibrations dans la gamme 2-20 Hz, sans toutefois parvenir à distinguer les vibrations induites par ces opérations de celles générées par l'environnement.

#### 4.3.2 EN PHASE D'EXPLOITATION

Les nuisances sonores en phase d'exploitation d'une centrale géothermique sont moindres par rapport à la phase de foration et d'essais. En revanche, elles peuvent être produites en continu pendant 20 à 40 ans.

Les principales sources d'émission de bruit sont liées aux centrales géothermiques électrogènes et sont dues aux ventilateurs de l'installation de refroidissement, à la turbine, aux pompes d'alimentation et d'injection (Meier & Zingg, 2014). En choisissant des équipements appropriés sur le marché (aéroréfrigérateurs silencieux) et moyennant des mesures de protection (bâtiment insonorisé), ces émissions peuvent tout à fait être maintenues dans la limite des exigences réglementaires.

A l'occasion d'un projet de centrale géothermique de type EGS à Avenches (Suisse), la municipalité de la ville s'est rendue sur les sites allemands de Landau et d'Insheim, implantés dans des zones urbaines ou industrielles (Buache, 2013) : ils ont constaté que, compte tenu du bruit de fond ambiant, ces deux centrales ne généraient pas de nuisances sonores perceptibles ou gênantes.

Ce n'est pas le cas, en revanche, sur le site de Milos (Grèce), où le bruit est perçu par la population comme le troisième facteur d'inconfort (Mendrinou & Karytsas, 2006). De même, sur le site de Bouillante (Guadeloupe), certains riverains se plaignent de nuisances sonores et de vibrations (UVED, 2011). Dans ces deux cas, des solutions d'atténuation ont été proposées : isolation des installations, diminution du régime des turbines, ajustement des horaires de fonctionnement, barrières antibruit, etc.

En ce qui concerne les vibrations, des mesures ont été réalisées sur le site de la centrale ECOGI à Rittershoffen (Richard et al, 2016). Les auteurs ont constaté que les vitesses particulières induites par la mise en fonctionnement de la centrale n'étaient pas suffisamment importantes pour être perceptibles par l'Homme dans le milieu ambiant de la centrale.

#### 4.4 NUISANCES LIÉES À L'AUGMENTATION DU TRAFIC ROUTIER

L'augmentation du trafic routier lié à un site géothermique concerne principalement la phase de foration et d'essais et en particulier, la phase d'installation ou de désinstallation du chantier. Pour illustration, sur le site de Ritterschoffen, 70 camions se sont succédés pendant 9 jours lors de l'installation (ECOIGI, 2012).

Les nuisances qui en résultent sont du bruit, des vibrations, des poussières et une augmentation du risque d'accidents de la circulation au voisinage du site. Toutefois, ces nuisances sont classiques sur un chantier de génie civil et n'ont rien de spécifique à la géothermie.

Une fois le chantier installé, le trafic tombe à 5 à 10 camions par jour en moyenne. La circulation peut se faire de jour comme de nuit mais elle est réduite à son strict minimum pendant la nuit.

#### 4.5 IMPACT POTENTIEL SUR LES ÉCOSYSTÈMES

Comme tout projet industriel, un site géothermique, notamment en phase de construction initiale, peut avoir des incidences sur la faune et la flore : perturbation des animaux (notamment en période de reproduction), dommages sur les espèces floristiques sensibles, etc. Il faut noter que les centrales géothermiques sont souvent installées dans des zones déjà urbanisées, ce qui limite les impacts additionnels liés à la centrale.

Les impacts mentionnés dans la littérature sont peu nombreux. Sur le site de Milos, en Grèce, Mendrinou & Karytsas (2006) mentionnent une incidence des lâchers de vapeurs (*venting*) sur la flore locale (plusieurs cèdres brûlés).

Sur certains sites, le fluide géothermique n'est pas réinjecté dans le sous-sol mais est rejeté en mer (c'est le cas par exemple sur le site de Bouillante en Guadeloupe), ce qui peut poser la question de l'incidence de ce rejet sur les écosystèmes marins (Maréchal et al., 2008). Dans le cas de Bouillante, des études ont montré que cet impact était négligeable, notamment du fait qu'il existe déjà de nombreuses sources géothermales sous-marines émanant du même réservoir (ADEME-BRGM, 2004).

En France, en dehors du cas de Bouillante, le fluide géothermique est toujours réinjecté dans le sous-sol, en général dans son aquifère d'origine (principe du doublet), ce qui évite tout impact de celui-ci sur les écosystèmes.

#### 4.6 IMPACT POTENTIEL SUR LES RESSOURCES EN EAU

##### 4.6.1 IMPACT QUANTITATIF

En phase de foration, les besoins en eau douce sont les mêmes que pour tout autre forage et interviennent essentiellement dans la constitution de la boue (fluide de forage). On estime qu'il faut environ 1 m<sup>3</sup> d'eau par m<sup>3</sup> de boue et environ 5 fois plus de boue que le volume total foré (Clark et al., 2011). Cela représente quelques dizaines de mètres-cubes d'eau par kilomètre linéaire foré.

En phase de stimulation, il faut en revanche beaucoup plus d'eau. Le volume nécessaire peut aller de quelques milliers de m<sup>3</sup> à plusieurs dizaines de milliers de m<sup>3</sup> pour un site EGS, par exemple (Clark et al., 2011). Notons qu'une partie de ce volume est théoriquement récupéré par pompage après la phase de stimulation.

En phase d'exploitation, le principal besoin en eau concerne le circuit de refroidissement secondaire, dans le cas d'un échangeur de chaleur à eau, qui fonctionne en boucle fermée.

L'eau douce nécessaire à l'ensemble de ces opérations est généralement prélevée dans des nappes peu profondes, des cours d'eau ou des plans d'eau. L'impact de ces prélèvements dépend du contexte local et est à évaluer au cas par cas, dans le cadre de l'étude d'impact.

Notons que les aquifères exploités pour leur ressource géothermale ne renferment pas, en général, d'eaux potables ou potabilisables. D'autre part, l'eau géothermale qui y est prélevée est généralement réinjectée dans le même aquifère. Par conséquent, même si ces aquifères devaient constituer une ressource d'eau potable ou potabilisable, l'exploitation géothermique n'aurait pas d'impact quantitatif sur cette ressource.

#### 4.6.2 IMPACT QUALITATIF

En phase de foration, le seul impact qualitatif d'un chantier géothermique sur la ressource en eau, en dehors d'un rejet accidentel (voir chapitres 5 et 6), pourrait provenir de l'utilisation de boues de forage non adaptés.

En effet, dans les terrains peu consolidés et très perméables, le fluide de forage peut s'infiltrer dans les terrains lors de l'avancement. Ce phénomène, appelé « perte de circulation », est facilement détectable et généralement traité rapidement par le foreur. Néanmoins, il est parfois inévitable qu'un certain volume de boue se répande dans l'environnement du forage.

C'est pourquoi il est requis, lors de la foration des formations superficielles et des éventuels aquifères sensibles plus profonds, que cette foration soit effectuée avec un fluide de forage dont la composition est sans impact possible sur ces aquifères. C'est d'ailleurs une obligation figurant dans les arrêtés préfectoraux encadrant les travaux, non seulement en géothermie mais pour tous travaux de forage en France. Généralement il s'agit d'une simple boue à l'eau additivée de bentonite (boue bentonitique).

En phase d'essais, les opérations de stimulation chimique utilisent différents types d'acides (acide chlorhydrique, acide fluorhydrique, chlorure de potassium, chlorure d'ammonium) ainsi que, parfois, des additifs anticorrosion et des inhibiteurs de précipitation (Hirschberg et al., 2015). Toutefois, ces substances ne migrent généralement pas loin du forage car elles réagissent rapidement avec les minéraux en présence. Ainsi, sur le site de Soultz-sous-Forêts, 15 tonnes d'acide chlorhydrique dilué ont été injectées entre 2003 et 2005, lors d'opérations de stimulation chimique : selon Maréchal et al. (2008), cela n'aurait dissous les remplissages carbonatés que sur quelques mètres autour des forages, (de l'ordre de 0,5 à 3,5 m). Rappelons que ces opérations d'acidification, qui visent à établir une bonne connexion hydraulique entre le forage et la formation réservoir, ne sont pas spécifiques à la géothermie et sont courantes quelle que soit l'application du forage ; y compris pour les forages de captage d'eau (AEP).

#### 4.7 ÉMISSIONS DE GAZ, D'AÉROSOLS ET ODEURS

On traite ici des émissions chroniques de gaz et aérosols et non des émissions accidentelles qui seront étudiées dans le chapitre 5.1. De telles émissions peuvent se produire lors des phases de foration (émissions des moteurs des divers engins présents sur le chantier), d'essais (dégazage du fluide géothermal extrait avant sa réinjection) et d'exploitation (principalement dans les cas où le fluide géothermal n'est pas réinjecté en sous-sol).

En effet, le fluide géothermal est soit une eau potentiellement chargée en gaz d'origine profonde, soit de la vapeur d'eau susceptible de véhiculer ce même type de gaz. Plusieurs auteurs ont analysé les gaz émis avec la vapeur d'eau géothermale (Mendrinou & Karytsas, 2006 ; Marchand et al., 2015). Il s'agit de gaz non condensables dont les plus fréquemment cités sont CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S, CO, N<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> et H<sub>2</sub>, ainsi que des traces de Ar, He, HF, SO<sub>2</sub> et des aérosols (Tableau 4). La concentration de ces émissions peut toutefois être réduite en envoyant ces gaz vers des tours de refroidissement où ils sont dilués dans un grand flux d'air.

Il n'est généralement pas fait mention de la nécessité de traiter ces émissions, sauf dans le cas du H<sub>2</sub>S. Outre sa toxicité, ce gaz possède en effet une odeur nauséabonde, déjà signalée à l'état naturel sur plusieurs sites géothermiques : Milos en Grèce (Mendrinou et Karytsas, 2006), Bouillante en Guadeloupe (UVED, 2011), Larderello en Italie (Bottai & Cigni, 1985), Olkaria au Kenya (Chauvet, 2014), etc. Aux Etats-Unis, Kagel et al. (2007) signalent que 99,9% du H<sub>2</sub>S est maintenant capté sur les installations géothermiques et transformé en soufre : les émissions de H<sub>2</sub>S liées à la géothermie sont ainsi passées en quelques années de 860 kg/h à 90 kg/h alors que dans la même période, la production a été multipliée par quatre.

*Tableau 4. Principaux gaz non condensables présents dans les vapeurs géothermales des gîtes à haute température*

Référence	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> S	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	NH <sub>3</sub>
Fedeli et al. (2016)			+				+
UCS (2016)	+	+	+				+
Webb et al. (1984)	+	+	+		+	+	+
Marchand et al. (2015)	+	+					
Mendrinou & Karytsas (2006)	++		+				
Clark et al. (2011)	++	+		+	++		
Kagel et al. (2007)		++	+				
Bottai & Cigni (1985)	78 à 94%	1 à 12%	2 à 7%	0 à 2%	1%		
Herzberger et al. (2010)	30 à 90%	5 à 10%			5 à 30%		

*Légende* : + gaz présent, ++ gaz abondant

Notons que Webb et al. (1984) mentionnent également la présence de SO<sub>2</sub>, lequel n'existe pas dans les vapeurs géothermales mais résulte de l'oxydation du H<sub>2</sub>S lors de son émission dans l'atmosphère.

Concernant les aérosols, on peut en trouver dans les panaches émis par certains sites de captage de vapeur géothermale, à raison d'environ 1 kg/MWh produit (Kagel et al., 2007) ou dans les émissions de certaines tours de refroidissement, sous forme de sels de bore, de mercure et d'arsenic (Webb et al., 1984).

#### 4.8 EMISSIONS DE GAZ À EFFETS DE SERRE

L'impact carbone de la géothermie profonde est nettement plus faible que celui des énergies fossiles (Mendrinou & Karytsas, 2006 ; Berrizbeitia, 2014). En compilant les données de huit projets de géothermie en Suisse, aux Etats-Unis et en Allemagne, Hirschberg et al. (2015) ont estimé que les émissions totales de gaz à effet de serre pendant toute la vie d'un projet, calculées par une Analyse du Cycle de Vie (ACV), varient de 17 à 60 g/kWh pour le CO<sub>2</sub>. Cette valeur est un peu plus élevée que d'autres sources d'énergie renouvelable mais elle est nettement inférieure à celle due aux combustibles fossiles, voire même au nucléaire (Tableau 5).

*Tableau 5. Emissions de carbone liées aux principales sources d'énergie d'après leurs ACV (d'après ADEME, 2010 excepté \* Hirschberg et al., 2015)*

Source d'énergie	Emissions (gCO <sub>2</sub> /kWh)
Eolien	9-10
Hydroélectrique	10-13
Solaire thermal	13
Biomasse	14-41
Géothermal*	17-60*
Nucléaire	66
Gaz naturel	443
Pétrole	664-778
Charbon	960-1050

Les principales émissions de gaz à effet de serre sont liées à la phase de foration car il est généralement nécessaire de faire appel à des moteurs thermiques pour réaliser les forages, l'acheminement du matériel, le montage des installations, etc.

Il a été vu précédemment que l'exploitation des ressources géothermales peut également faire remonter en surface des gaz profonds dont certains ont un effet de serre (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>) : cela est principalement le cas des centrales à haute température exploitant de la vapeur géothermale. Ainsi, sur le site de Bouillante (Guadeloupe), une ACV montre qu'environ 90% des émissions de gaz à effet de serre se produisent pendant la phase d'exploitation (Marchand et al., 2015). Leur ordre de grandeur varie de 38 à 47 gCO<sub>2eq</sub>/kWh selon le scénario considéré.

## 4.9 RADIOACTIVITÉ

Les opérations de géothermie profonde ne génèrent pas en elles-mêmes de radioactivité mais elles conduisent à faire remonter en surface deux types de matériaux radioactifs d'origine profonde :

- des déblais de forage : il s'agit de volumes de matériaux limités (de l'ordre de 20 m<sup>3</sup> par kilomètre foré), produits pendant une phase relativement courte. Il est préconisé que la radioactivité de ces déblais soit mesurée systématiquement lors de leur remontée et qu'ils soient traités si nécessaire (Hirschberg et al., 2015) ;
- le fluide géothermal, produit en plus grande quantité et pendant une plus longue période ; ce fluide peut transporter du radon et du radium, susceptibles d'engendrer un rayonnement radioactif à travers la canalisation au sein de laquelle il circule (circuit primaire) (Kreuter, 2011 ; Berrizbeitia, 2014 ; Hirschberg et al., 2015).

Le radium peut également être incorporé par précipitation dans des dépôts au sein des canalisations de surface (Eggeling et al., 2013) : il s'agit surtout de dépôts de sulfates (baryum, strontium) mais généralement pas de carbonates. A Bruchsal (Allemagne), où ce type de dépôts est majoritairement carbonaté, l'activité spécifique<sup>22</sup> est de l'ordre de 100 Bq/kg. A Soultz-sous-Forêts (Bas-Rhin), on observe la précipitation conjointe d'autres éléments comme des sulfures polymétalliques dans la partie froide de la centrale, au niveau des filtres et des échangeurs (Cuenot & Genter, 2013), ainsi que le transport de particules granitiques en suspension. Le fluide géothermal y possède une activité spécifique totale de l'ordre de 170 à 180 Bq/kg (Laroche Lambert, 2013). Sur ce site, la radioactivité induite sur l'homme fait l'objet d'un suivi par l'ASN<sup>23</sup> qui mentionne un débit de dose radioactive<sup>24</sup> de 11 µSv/h. Bien que faible, cette valeur pourrait engendrer une irradiation externe sur le long terme : des mesures de radioprotection ont donc été mises en place pour les employés et les travailleurs.

## 4.10 CONCLUSION

Les nuisances ou impacts de nature chronique générés par une installation de géothermie profonde ne sont pas, pour la plupart, spécifiques à la géothermie.

En ce qui concerne l'impact paysager, celui-ci est le plus important au moment de la foration des ouvrages et de la réalisation des essais, phase pendant laquelle un

---

<sup>22</sup> L'activité spécifique (ou massique) est le nombre de désintégrations par unité de temps et de masse, exprimé en Becquerel par kilogramme (Bq/kg) ou par litre (Bq/L). En France, la plupart des sols ont une activité en uranium 238 comprise entre quelques Bq/kg et quelques centaines de Bq/kg, avec une moyenne autour de 40 Bq/kg (de sol sec). Dans certains sols granitiques, on peut toutefois atteindre le millier de Bq/kg de sol sec. En ce qui concerne les eaux, les activités en uranium 238 s'établissent entre 0,01 et 0,1 Bq/L pour les eaux de surface et jusqu'à 1,5 Bq/L pour les eaux souterraines. (<http://www.irsn.fr/FR/Larecherche/publications-documentation/fiches-radio-nucleides/environnement/Pages/Uranium-naturel-environnement.aspx#.WCsVbrLhBhE>)

<sup>23</sup> Autorité de Sûreté Nucléaire, organisme assurant, au nom de l'État, le contrôle de la sûreté nucléaire et de la radioprotection en France ([www.asn.fr](http://www.asn.fr)).

<sup>24</sup> le Sievert (Sv) permet de rendre compte de l'effet biologique produit par une dose absorbée sur un organisme vivant. La radioactivité naturelle moyenne en France est de l'ordre de 2,4 mSv/an, soit l'équivalent de 0,27 µSv/h. A titre indicatif, un seul examen scanner émet de l'ordre de 10 µSv.

chantier est installé sur une superficie d'environ 4000 à 8000 m<sup>2</sup>, avec un mât de forage généralement visible d'assez loin. Cette phase est toutefois relativement courte (6 mois à 1 an). En phase d'exploitation, une centrale géothermique prend la forme d'un site industriel de taille assez modeste, comprenant un à quelques bâtiments, qui peuvent s'intégrer relativement facilement dans un paysage, notamment urbain.

Comme tout chantier de génie civil, la réalisation de forages géothermiques génère du bruit et une circulation additionnelle de camions, qui peuvent être ressentis comme une source de nuisances par la population, notamment en milieu résidentiel. Ces nuisances restent toutefois limitées à une période de quelques mois à un an maximum. D'autre part, il faut signaler qu'il existe aujourd'hui de nombreux moyens de limiter au mieux ces nuisances (murs anti-bruit, appareils de forage peu sonores, planification des opérations les plus bruyantes en dehors des périodes sensibles, etc.). 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 peuvent demeurer.

Comme tout projet industriel, la réalisation de forages et la construction d'une centrale géothermique peut également avoir un 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<sup>3</sup> 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, qui sera abordé dans les chapitres suivants, les principales émissions de gaz liées à une exploitation géothermique sont dues 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<sub>2</sub> 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.



## **5. EMANATIONS OU EPANCHEMENTS ACCIDENTELS DE FLUIDES EN SURFACE**

### **5.1 ERUPTIONS DE FLUIDES SOUTERRAINS EN SURFACE**

#### 5.1.1 EVÉNEMENT REDOUTÉ

Une éruption (*blowout*) est une sortie incontrôlée de fluide hors d'un forage. Ce fluide peut être gazeux ou liquide. Si le point de sortie de l'effluent se situe en tête du forage, on parle « d'éruption de surface ». S'il se situe le long du forage, on parle « d'éruption souterraine » ou « d'intrusion » dans une formation souterraine vulnérable. On ne traite ici que le premier cas, le second étant abordé dans le chapitre 6.2.

De manière générale, le risque d'éruption est plus faible en géothermie que dans d'autres domaines des forages profonds, comme par exemple dans le cas des forages pétroliers ou gaziers. Une des raisons à cela est qu'il est moins fréquent, lors d'un forage de géothermie profonde, de traverser des horizons contenant des hydrocarbures gazeux ou d'autres gaz sous pression, que dans le cas d'un forage pétrolier (dont l'objectif est précisément d'atteindre des horizons producteurs d'huile ou de gaz). Dans la plupart des contextes en France, que ce soit dans le bassin parisien ou dans le fossé d'effondrement alsacien, les réservoirs géothermiques sont peu pressurisés, ce qui limite le risque d'éruption.

Ce risque n'est toutefois pas à exclure, comme nous l'avons vu dans le chapitre sur l'accidentologie (§ 3), à travers le cas de Saint-Gall (Suisse) ou d'éruptions de gaz survenues dans des contextes volcaniques, menant pour certaines à des accidents graves : Agua Shuca (El Salvador) en 1990, Zunil 1 (Guatemala) en 1991, Puna 2 (Hawaii) en 1991. Notons cependant, que ces éruptions se sont produites à une époque où un dispositif d'obturation d'urgence (bloc d'obturation de puits ou BOP) n'était pas obligatoire pour les sondages d'exploration géothermique peu profonds (par exemple, moins de 2500 m pour les Etats-Unis : Webb et al., 1984). De nos jours, ces dispositifs sont utilisés systématiquement, notamment en France.

#### 5.1.2 MÉCANISMES ET SCÉNARIOS INITIATEURS

##### 5.1.2.1 En phase de foration

En phase de foration, une éruption ne peut résulter que de la succession de deux événements indésirables :

- d'une part une venue de fluide sous pression à l'intérieur du forage, malgré la contre-pression exercée par la colonne de boue ; une telle venue peut être liée, par exemple, à une densité de boue insuffisante, à une manoeuvre de garniture trop rapide, à la traversée non anticipée d'une formation en surpression, à une perte de circulation de boue ou à une cimentation défectueuse (Lahaie, 2015b ; Galin, 2000 ; Hervé, 2009 ; Faessler, 2014 ; Bauer et al., 2015) ;
- d'autre part, une perte d'étanchéité de l'enveloppe du forage (constituée sur les côtés par les tubages cimentés et en tête par le BOP), empêchant ainsi de contrôler la venue et de l'évacuer du forage de manière sécurisée.

On peut rappeler ici le cas du forage géothermique de St-Gall (Suisse) où du gaz constitué à 95% de méthane a subitement envahi le forage (Moeck et al., 2015). L'injection de boue lourde effectuée pour contrôler la venue a conduit à l'évènement sismique ressenti par la population (voir fiche en 0).

#### 5.1.2.2 En phase d'essais

En phase d'essais, la notion d'éruption est moins évidente puisque le forage est volontairement mis en état de production, c'est-à-dire de venue contrôlée. Dans cette phase, on pourrait considérer comme « éruption » une sortie de fluide avec un débit anormalement élevé ou empruntant un chemin non souhaité. Ce type d'évènement pourrait résulter d'une pression anormalement élevée du fluide géothermique et/ou d'une perte d'étanchéité de l'enveloppe du puits (Kagel et al., 2007 ; Hervé, 2009 ; Rouquet, 2010 ; Ecorem, 2011 ; Cuenot, 2012 ; Reith et al., 2013).

#### 5.1.2.3 En phase d'exploitation

En phase d'exploitation, une éruption pourrait théoriquement résulter d'une perte de confinement des équipements en tête de forage, qui mènerait à une sortie incontrôlée de fluide géothermique. Aucun accident de ce type n'a été signalé dans l'accidentologie.

### 5.1.3 EFFETS ET CONSÉQUENCES POTENTIELS

Les effets potentiels d'une éruption en surface dépendent fortement de la pression, de la température et de la nature du fluide émis (Bottai & Cigni, 1985 ; Mendrinis & Karytsas, 2006 ; Marchand et al., 2015) :

- inflammation<sup>25</sup> ou explosion de gaz (CH<sub>4</sub>, CO, H<sub>2</sub>S, H<sub>2</sub>) ;
- projection de fluide géothermique, roche ou boue (hydrocarbures, tous les gaz y compris la vapeur d'eau) ;
- intoxication (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, CO) ou asphyxie (tous les gaz sauf O<sub>2</sub>) ;
- brûlure (hydrocarbures, tous les gaz y compris la vapeur d'eau) ;
- émission de gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub>).

## 5.2 FUITE OU DÉBORDEMENT D'UN RÉSERVOIR EN SURFACE

### 5.2.1 ÉVÈNEMENT REDOUTÉ

Il s'agit ici de fuites susceptibles de survenir sur des bassins de stockage de fluide géothermique, de fluide de forage, d'hydrocarbures (carburants, huiles) ou de divers additifs présents sur le chantier de forage, ou à l'occasion des transferts de tels produits en vue de leur élimination ou de l'approvisionnement du site.

Notons qu'un tel risque est inhérent à tout chantier de forage, quelle que soit sa finalité.

---

<sup>25</sup> dans les années 1980, à l'occasion de la réalisation des forages profonds de plus de 3000 m sur le site de Larderello (Italie), la température élevée et la présence concomitante de gaz inflammables et d'oxygène en profondeur ont fait craindre un risque d'inflammation spontanée qui ne s'est cependant jamais concrétisé (Bottai & Cigni, 1985).

### 5.2.2 MÉCANISMES ET SCÉNARIOS INITIATEURS

Le mécanisme initiateur d'une fuite ou d'un débordement peut être de deux types :

- interne, comme le défaut d'étanchéité d'un réservoir de stockage (bac, cuve, bache, citerne) ;
- externe, comme une inondation ou des précipitations exceptionnelles qui entraîneraient, par exemple, le débordement de réservoirs semi-enterrés destinés à stocker temporairement le fluide géothermal extrait en cours d'essais.

### 5.2.3 EFFETS ET CONSÉQUENCES POTENTIELS

Les conséquences d'un tel événement peuvent être une pollution du sol, du sous-sol, des aquifères et/ou du réseau hydrographique (Hervé, 2009 ; Bézèlgues-Courtade et al., 2012 ; Cuenot, 2012).

Notons que si ce type d'événement est fréquemment reporté dans les domaines du génie civil ou des Installations Classées, nous n'en avons pas trouvé dans la littérature liée à la géothermie.

## 5.3 FUITE SUR LE CIRCUIT PRIMAIRE OU SECONDAIRE

### 5.3.1 ÉVÉNEMENT REDOUTÉ

Une fuite sur le circuit primaire ou secondaire est de nature à répandre à l'extérieur le fluide qui y circule.

Dans les phases de foration et d'essai, il peut s'agir de fluide de forage, de fluide géothermal ou d'un fluide de stimulation (eau éventuellement chargée d'additifs, dont des acides).

En phase d'exploitation, le problème concernera le fluide géothermal, dans le circuit primaire, ou le fluide caloporteur, dans le circuit secondaire. Il existe une variété de fluides caloporteurs, qui dépendent du type de procédé utilisé par la centrale géothermique (Hirschberg et al., 2015).

### 5.3.2 MÉCANISMES ET SCÉNARIOS INITIATEURS

En ce qui concerne le circuit primaire, les mécanismes qui pourraient mener à une fuite de fluide géothermal en surface sont la corrosion ou des défauts d'étanchéité affectant la canalisation de transport de ce fluide en surface. Ce risque est cité par plusieurs auteurs mais, à notre connaissance, il n'y a pas eu d'accident de ce type rapporté dans la littérature (Galín, 2000 ; Kagel et al., 2007 ; Hervé, 2009 ; Rouquet, 2010 ; UCUSA, 2012 ; Holm, 2012 ; Ecogi, 2012 ; Cuenot, 2012 ; Reith et al., 2013 ; Bauer et al., 2015 ; Hirschberg et al., 2015).

En ce qui concerne le circuit secondaire, bien qu'un risque de fuite ne puisse être totalement exclu, par exemple suite à une corrosion ou une rupture de canalisation, il est *a priori* moindre que pour le circuit primaire car le fluide qui y circule est moins chaud et moins agressif. Le risque principal de déversement accidentel de ce fluide se situe surtout dans les phases de transport, de transbordement et de stockage de celui-ci.

### 5.3.3 EFFETS ET CONSÉQUENCES POTENTIELS

En cas de fuite du circuit primaire ou secondaire, les principaux risques sont :

- le déversement de fluide en surface avec contamination ou pollution du milieu environnant : épanchement à la surface du sol, ruissellement vers les eaux de surface, infiltration vers la nappe phréatique, émission gazeuse dans l'atmosphère ;
- l'intrusion directe dans un aquifère si la fuite est souterraine<sup>26</sup> ;
- parfois l'incendie (dans le cas de certains fluides caloporteurs).

Les conséquences d'une telle fuite peuvent être :

- sur l'homme, des brûlures (voir l'accident Ahuachapan 2 au Salvador au chapitre 3.2), l'émission d'odeurs, un risque d'intoxication voire d'irradiation dans certains cas spécifiques de présence de substances radioactives (fluide géothermal) ;
- sur l'environnement, la contamination ou la pollution du sol (voir l'accident Ahuachapan 1 au Salvador au chapitre 3.2), d'un cours d'eau, de la mer, de l'atmosphère ou encore l'irradiation de la faune et de la flore.

Dans le cas du circuit primaire, il s'agit de fluide géothermal chaud et minéralisé dont la composition chimique présente le plus souvent (Hirschberg et al., 2015) :

- une forte minéralisation (saumure), notamment en chlorures, bicarbonates et sulfates de sodium, calcium et potassium, ainsi qu'en silice ;
- des éléments traces dissous, notamment des métaux lourds ; Hirschberg et al. (2015) citent par exemple la présence d'arsenic, de baryum, d'antimoine, de bore, de lithium, de rubidium et de substances radioactives d'origine naturelle comme <sup>238</sup>U, <sup>232</sup>Th, <sup>40</sup>K et <sup>226</sup>Ra ;
- des gaz dissous (voir chapitre 0).

Dans le cas du circuit secondaire, il s'agit de fluides caloporteurs dont les plus fréquents sont le n-pentane, l'iso-butane, l'iso-pentane, le benzène, le toluène, le n-butane, l'ammoniac, le dioxyde de carbone et le 1,1,1,2-Tétrafluoroéthane<sup>27</sup>. Certaines de ces substances sont potentiellement inflammables ou explosibles, d'autres toxiques ou écotoxiques.

## 5.4 ÉMISSION D'UN VOLUME EXCESSIF DE GAZ DISSOUS

### 5.4.1 ÉVÉNEMENT REDOUTÉ

Il s'agit ici du risque induit par un dégazage important (non attendu) du fluide géothermal, avec surtout des conséquences en milieu confiné (intoxication, asphyxie). Cela peut se produire en phase d'essais, alors que le fluide géothermal est remonté directement à la surface, ou en phase d'exploitation, s'il y a une fuite sur le circuit primaire (cas déjà traité au chapitre 5.3).

---

<sup>26</sup> Pour Hirschberg et al. (2015), l'impact le plus fréquent des installations géothermiques serait la contamination des aquifères d'eau douce par des intrusions accidentelles de fluide géothermal.

<sup>27</sup> fluide généralement connu sous sa dénomination industrielle de « R134a ».

Un tel évènement peut également se produire après l'abandon du site (phase « post-abandon »), en cas de mauvais bouchage du puits, soit du fait d'une conception défailante, d'une malfaçon dans la réalisation des bouchons, ou d'une dégradation des bouchons avec le temps. Ce type d'évènement a été reporté de nombreuses fois dans le cas d'anciens forages d'hydrocarbures (Bachu & Watson, 2009) ou dans le domaine du stockage géologique de CO<sub>2</sub> (Gombert & Thoraval, 2010 ; Farret, 2013).

#### 5.4.2 MÉCANISMES ET SCÉNARIOS INITIATEURS

Les mécanismes initiateurs de cet évènement sont la remontée d'un fluide géothermal anormalement riche en gaz dissous et/ou l'existence d'une fuite ou d'une dépression brutale, aggravée par la présence d'un milieu confiné (Kage et al., 1998 ; Kagel et al., 2007 ; Hervé, 2009 ; Rouquet, 2010 ; UCSUSA, 2012 ; Holm, 2012 ; Ecogi, 2012 ; Cuenot, 2012 ; Reith et al., 2013).

En phases de foration, d'essais et d'exploitation, les principales mesures de maîtrise des risques consistent à disposer de détecteurs de gaz afin de prévenir le personnel d'une arrivée anormale de gaz ou d'une teneur anormalement faible en oxygène.

En phase post-abandon, il s'agira plutôt de disposer de procédures rigoureuses pour la mise en place des bouchons, de combler les forages avec une cimentation de qualité (ciment résistant au fluide géothermal) et éventuellement, pendant une période définie, de surveiller l'absence de fuites de gaz en surface.

#### 5.4.3 EFFETS ET CONSÉQUENCES POTENTIELS

Malgré la richesse de certains fluides géothermaux en gaz dissous, la littérature ne mentionne pas d'incidents ou d'accidents engendrés par un dégazage important en phases de foration ou d'essais. Cela peut s'expliquer par le fait qu'au cours de ces phases, le dégazage se fait à l'air libre. Les conséquences sont donc négligeables, à l'exception d'une éventuelle contamination locale et temporaire de l'atmosphère en certains gaz (CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>S, NO<sub>x</sub>...).

En revanche, en phase d'exploitation, un dégazage suite à une fuite sur le circuit primaire, par exemple, peut se produire en milieu confiné et induire de ce fait des risques plus importants pour le personnel (intoxication, asphyxie) voire des dommages matériels (incendie, explosion). Le chapitre sur l'accidentologie mentionne ainsi un accident au Japon, dû à l'intoxication par H<sub>2</sub>S d'un travailleur entré dans la salle de séparation d'huile d'une installation géothermique afin d'en retirer l'huile usagée (Kage et al., 1998).

### 5.5 CONCLUSION

La construction ou l'exploitation d'un site de géothermie profonde comporte un certain nombre de 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, même s'il est moins prégnant en géothermie que dans le domaine des hydrocarbures, est néanmoins à prendre en considération. En effet, un forage, quelle que soit sa nature, peut traverser des formations en surpression, contenant éventuellement du gaz. L'exemple de l'incident de Saint-Gall, en 2013, montre qu'une venue de gaz doit toujours être envisagée et est toujours difficile à maîtriser. Plusieurs cas d'éruptions dans des contextes de

géothermie en zones volcaniques ont d'ailleurs été reportés, menant pour certaines à des accidents graves : Agua Shuca (El Salvador) en 1990, Zunil 1 (Guatemala) en 1991, Puna 2 (Hawaii) en 1991. Ce constat appelle à ce que les forages de géothermie profonde soient réalisés dans les mêmes conditions de sécurité, pour ce qui concerne le risque de venues de gaz, que les forages d'hydrocarbures (BOP en tête de puits, présence de détecteurs de gaz, formation du personnel au contrôle des venues, etc.). Notons que c'est déjà le cas aujourd'hui en France.

Comme tout chantier de forage, un chantier de géothermie comporte également des risques de fuites ou de débordement de réservoirs en surface. La gestion de ces risques, qui concerne toutes les activités industrielles impliquant des stockages de fluides en surface, est classique et ne présente pas de difficultés propres à la géothermie.

Des fuites peuvent également se produire sur les équipements et canalisations qui composent le circuit primaire (celui qui transporte le fluide géothermal) ou le circuit secondaire. Là encore, la géothermie ne présente pas de spécificités par rapport à d'autres domaines industriels impliquant des transports de fluides en surface. Il convient seulement de noter que le circuit primaire est plus exposé à ce type de fuites (du fait que le fluide géothermal qu'il transporte est plus agressif) et que celui-ci nécessite donc une surveillance accrue.

Enfin, le risque d'une émission gazeuse liée à un dégazage accidentel du fluide géothermal (par exemple suite à une fuite de celui-ci) est un risque à considérer, notamment lorsque ce dégazage se produit en milieu confiné. Des risques pour le personnel (intoxication, asphyxie) peuvent en découler, comme cela s'est produit au Japon en 1998, lors d'une intervention d'un travailleur dans la salle de séparation d'huile d'une installation géothermique.

## **6. CONTAMINATIONS POTENTIELLES DU MILIEU SOUTERRAIN**

### **6.1 MISE EN COMMUNICATION D'AQUIFÈRES**

#### **6.1.1 ÉVÈNEMENT REDOUTÉ**

Lors du creusement d'un forage profond, qu'il soit ou non réalisé dans un objectif de géothermie, il est fréquent de recouper les aquifères suivants :

- un ou plusieurs aquifère(s) superficiels d'eau douce, généralement exploité(s) pour l'alimentation en eau potable : on peut citer comme exemple les calcaires lutétiens d'Ile-de-France, la craie du Bassin parisien, les sables plio-quaternaires du fossé rhénan, les nombreuses formations alluviales, etc. ;
- un ou plusieurs aquifère(s) profonds d'eau douce, parfois reconnu(s) comme réserve patrimoniale et, de ce fait, à protéger de toute contamination : c'est notamment le cas des aquifères de l'Albien et du Néocomien du Bassin parisien<sup>28</sup>, les aquifères profonds du Bassin aquitain<sup>29</sup>, les karsts profonds de la Drôme<sup>30</sup> ;
- un ou plusieurs aquifère(s) profonds d'eau plus ou moins fortement minéralisée et chaude, dont l'un au moins représente la ressource géothermique ciblée : les plus connus sont le Dogger et le Trias du Bassin parisien, ainsi que les aquifères de socle profond du Massif Central ou du fossé rhénan.

Ces divers aquifères sont séparés entre eux par des niveaux imperméables ou semi-perméables et peuvent ainsi renfermer des masses d'eau de qualité et de pression différentes. L'évènement redouté consiste ici en la mise en communication accidentelle de plusieurs de ces niveaux aquifères par le biais du forage, ce qui est susceptible de contaminer les aquifères d'eau douce : on notera que le cas de mise en communication du réservoir géothermal avec un aquifère sus-jacent fait l'objet d'un évènement spécifique, dénommé « intrusion de fluide (géothermal) dans un aquifère », qui sera traité par la suite (chapitre 6.2).

En ce qui concerne les aquifères renfermant des eaux potables, la législation interdit toute mise en communication avec d'autres aquifères<sup>31</sup>. Quoiqu'il en soit, même lorsqu'une ressource aquifère potable ou patrimoniale n'est pas menacée, il est déconseillé de mettre en communication plusieurs niveaux aquifères distincts : ils sont en effet soumis le plus souvent à des pressions différentes, ce qui risque d'induire naturellement un écoulement entre eux et de mélanger des eaux de qualité différente.

Ce type d'évènement concerne en théorie toutes les phases de vie du forage mais c'est principalement au cours des phases d'exploitation et de post-abandon, du fait de leur durée, que les mises en communications éventuelles entre aquifères peuvent avoir le plus d'impact.

---

<sup>28</sup> <http://www.driee.ile-de-france.developpement-durable.gouv.fr/l-aquifere-multicouche-de-l-albien-neocomien-a2009.html>

<sup>29</sup> <http://www.gesteau.eaufrance.fr/sites/default/files/SAGE05003-EtatLieux.pdf>

<sup>30</sup> <http://sierm.eaurmc.fr/sdage/documents/guide-tech-3.pdf>

<sup>31</sup> cf. article 10 de l'arrêté du 11 septembre 2003 modifié (NOR: DEVE0320170A)

### 6.1.2 MÉCANISMES ET SCÉNARIOS INITIATEURS

La mise en communication de niveaux aquifères différents est le résultat d'un défaut d'étanchéité longitudinale du forage. Celui-ci peut être lié principalement (Galin, 2000 ; Vernoux et al., 2002 ; Kaya et al., 2011 ; Ecorem, 2011 ; Bezelgues-Courtade et al., 2012 ; Reith et al., 2013 ; Bauer et al., 2015) :

- en phase d'exploitation, à une cimentation annulaire défectueuse (micro-annulaire important entre tubage et ciment ou chenal sans ciment sur une hauteur importante), qui peut être lié à un programme de cimentation inadapté, une malfaçon lors de la mise en place du ciment ou un vieillissement de la cimentation au cours du temps ;
- en phase de post-abandon, à une cimentation annulaire défectueuse (voir point précédent) et/ou à un défaut d'étanchéité d'un ou plusieurs bouchons, lié à une mauvaise conception ou mise en place de ceux-ci, ou une dégradation de ceux-ci au cours du temps.

### 6.1.3 EFFETS ET CONSÉQUENCES POTENTIELS

Une conséquence potentielle de la mise en communication d'aquifères est la contamination ou la pollution de la nappe réceptrice.

Cet écoulement peut également induire des phénomènes au niveau des formations géologiques intermédiaires, comme la dissolution (calcaires, sel, gypse) ou le gonflement (anhydrite), du fait de l'introduction d'un fluide en déséquilibre physicochimique avec certaines roches. Des accidents illustrant ces types de phénomènes ont été décrits au § 3.3.2.

Dans le Bassin parisien, les forages profonds réalisés pour la géothermie recoupent parfois les aquifères superficiels du Tertiaire mais systématiquement les aquifères de la craie sénonienne puis ceux de l'Albien et du Néocomien. Il existe de ce fait un risque de mise en communication de ces différents aquifères car le principal facteur favorisant la migration de fluides est la différence de pression entre eux, qu'elle soit d'origine naturelle ou provoquée (pompage ou injection dans l'un des aquifères).

La maîtrise de ce risque passe, lors de la réalisation du forage, par une bonne conception et mise en place des cuvelages et de leur cimentation et au moment de l'abandon, par une bonne conception et mise en place des bouchons.

## 6.2 INTRUSION DE FLUIDE DANS UN AQUIFÈRE

### 6.2.1 ÉVÈNEMENT REDOUTÉ

Il a été vu précédemment que le recoupement d'un ou de plusieurs aquifère(s) distincts lors du creusement d'un forage profond, réalisé ou pas dans le cadre de la géothermie, est fréquent. L'évènement accidentel traité ici concerne l'intrusion de fluide (fluide d'essai, fluide géothermal ou exceptionnellement, gaz remonté suite à une venue) dans l'un de ces aquifères, utilisé ou potentiellement utilisable pour la production d'eau potable, l'irrigation, les besoins industriels, la géothermie superficielle, le stockage de gaz naturel ou de CO<sub>2</sub> en aquifères, etc. Ces aquifères sensibles sont le plus souvent des aquifères superficiels (communément situés dans la première centaine de mètres de profondeur) mais ils peuvent également être relativement profonds, jusqu'à 500 m voire localement 1000 m, notamment dans les bassins parisien et aquitain.

## 6.2.2 MÉCANISMES ET SCÉNARIOS INITIATEURS

L'intrusion de fluide dans un aquifère sensible peut se produire lors de toutes les phases de vie d'une installation géothermique et résulter des différents mécanismes suivants :

- en phase de foration<sup>32</sup>, une éruption souterraine de gaz, provenant d'une formation sous-jacente, suite à une venue mal contrôlée ; notons que ce scénario, qui relève de circonstances très exceptionnelles, est bien connu dans le domaine des hydrocarbures mais n'a jamais été reporté en géothermie profonde même si plusieurs événements accidentels ont montré la possibilité de remontées de gaz en cours de foration dans de tels contextes (voir § 5.1) ;
- en phase d'essai ou d'exploitation, une intrusion de fluide géothermal ou de fluide de stimulation suite à un défaut d'étanchéité latéral du forage, c'est-à-dire la rupture ou la perforation d'un ou plusieurs tubages, liées par exemple :
  - à la corrosion (interne ou externe),
  - aux contraintes mécaniques dues à l'ancrage de certains équipements (par exemple la pompe dans la chambre de pompage),
  - à l'érosion et aux passages d'outils (lors d'interventions),
  - aux contraintes thermomécaniques (pour les forages haute température),
  - à des défauts matériels ou de mise en place des tubages,
  - à des contraintes de cisaillement liées à des mouvements sur des plans de fractures préexistants (Jung et al., 2010 ; Dorbath et al., 2009).
- en phase de post-abandon, une intrusion de fluide géothermal suite à la combinaison d'un défaut d'étanchéité longitudinal (cimentation annulaire ou un ou plusieurs bouchons) et latéral (un ou plusieurs tubages) du forage.

Il est à noter que les tubages des forages géothermiques sont particulièrement exposés au risque de corrosion, notamment en cours d'exploitation, du fait du caractère généralement agressif du fluide géothermal qu'ils véhiculent (Galín, 2000). En Ile-de-France, de nombreux cas de percement de tubages dus à la corrosion (interne et parfois externe) ont été observés, notamment au cours des premières années d'exploitation des doublets géothermiques. Ils n'ont pas systématiquement conduit à des intrusions de fluide géothermal dans les formations environnantes car le pompage de production induit une dépression au sein des terrains<sup>33</sup>. Néanmoins, sur certains forages, notamment injecteurs, des fuites ont été constatées, comme cela a été le cas à Coulommiers en 1996 (voir § 3.3.3.1 et fiche en 0).

La corrosion se développe plus particulièrement à certains endroits des tubages, notamment dans la partie superficielle du forage injecteur ou au niveau de la chambre de pompage dans le forage producteur. Elle se développe parfois sous dépôts, ce qui rend sa détection délicate par des outils de diamétrie. Depuis les

---

<sup>32</sup> L'intrusion dans un aquifère de fluide de forage, encore appelée perte de circulation, a été traitée au chapitre des risques chroniques (§ 4.6.2)

<sup>33</sup> dans ce contexte, c'est d'ailleurs le fluide de formation qui aura tendance à pénétrer dans le forage en cas de percement, comme cela s'est produit à Bulalo (Philippines) : grâce au suivi du tritium dans l'eau, on a pu mettre en évidence sur ce site une entrée d'eau superficielle dans deux forages d'injection (Abrigo et al., 2004).

premières constatations de ce phénomène sur les puits de géothermie à la fin des années 1980 en France, un ensemble de mesures ont été prises pour prévenir et suivre au mieux les effets de la corrosion : surépaisseur des tubages, adjonction d'un inhibiteur de corrosion au fluide géothermal, passage régulier d'outils pour vérifier le diamètre interne des tubages (diamètreur) ou l'épaisseur des dépôts (scanner électromagnétiques), rechemisage du puits si nécessaire. Dans le bassin parisien, des contrôles de corrosion des tubages sont exigés tous les 3 ans sur les puits injecteurs et tous les 5 ans sur les puits producteurs. Néanmoins, la maîtrise de la corrosion reste aujourd'hui un des enjeux clés de la sécurité des forages de géothermie profonde.

Une autre spécificité des tubages de géothermie profonde, du fait qu'ils sont directement en contact avec le fluide géothermal, est qu'ils sont particulièrement exposés aux effets thermomécaniques, notamment dans les contextes de géothermie haute température. Les tubages peuvent dans ce cas subir des variations de température importantes, notamment lors des phases d'arrêts et de reprises du pompage. Ces variations entraînent des effets de dilatation et de contraction thermique des aciers des tubages qui peuvent, à termes, mettre en cause l'intégrité des tubages et de la gaine de ciment qui les relie aux terrains (Galín, 2000 ; Cuenot, 2012 ; Reith et al., 2013 ; Bauer et al., 2015). Les tubages les plus concernés par ces variations de température sont les tubages de surface des puits de production. Il convient par conséquent, lors de la conception du forage, de veiller à ce que les caractéristiques des tubages et du ciment choisis leur permettent de résister aux contraintes mécaniques engendrées par ces variations de température.

### 6.2.3 EFFETS ET CONSÉQUENCES POTENTIELS

Les effets d'une intrusion de fluide dans un aquifère dépendent du débit, du volume, de la température et de la qualité physicochimique de ce fluide, ainsi que de la qualité et de la température de l'eau renfermée dans l'aquifère impacté. La nature du fluide circulant dans le forage géothermique étant différente suivant la phase de vie considérée et pour le fluide géothermal, selon les régions, les effets induits seront donc sensiblement distincts.

Il est hors du cadre de ce rapport d'analyser l'ensemble des situations possibles. Cette analyse doit être effectuée dans l'étude d'impact, en fonction du contexte spécifique de chaque site. Notons que dans le cas de la fuite associée au forage de Coulommiers (1996), 660 000 m<sup>3</sup> de fluide géothermal chaud et fortement minéralisé, provenant de l'aquifère du Dogger, se sont répandus sur plusieurs mois dans l'aquifère d'eau douce du calcaire de Champigny, capté pour l'alimentation en eau de la ville (Vernoux et al., 2012). En dépit de ce volume important, le suivi physico-chimique des captages d'eau potable de la ville n'a pas mis en évidence de pollution.

## 6.3 CONCLUSION

Au-delà d'un déversement accidentel de produits en surface (déjà vu au chapitre précédent), la contamination d'un aquifère sensible au droit d'une exploitation géothermique profonde peut survenir suite à deux types d'événements.

Tout d'abord, la mise en communication d'aquifères de pression et de qualité différentes, suite à une perte d'étanchéité longitudinale d'un forage. Une telle perte d'étanchéité peut résulter d'une cimentation défectueuse ou, en phase post-

abandon, de défauts affectant les bouchons d'obturation du forage. Ce risque n'est pas spécifique à la géothermie mais c'est un enjeu majeur de la sécurité des forages profonds. 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, appliqué ou non à la géothermie.

La contamination d'un aquifère sensible peut également survenir suite à une fuite latérale d'un forage, liée au percement ou à la rupture d'un ou plusieurs cuvelages. Ce scénario est particulièrement à suivre dans le cas des forages de géothermie profonde, où le cuvelage est en contact direct avec le fluide géothermal et où par conséquent, celui-ci est d'avantage exposé à la corrosion et dans le cas de la géothermie haute température, aux effets thermomécaniques liées aux variations de température. La corrosion, notamment, a affecté beaucoup de puits de géothermie en Ile de France et a conduit à certains incidents, notamment celui de Coulommiers en 1996.

Pour pallier ce problème, un ensemble de mesures ont été prises, qui permettent aujourd'hui une meilleure gestion des effets de la corrosion : surépaisseur des tubages, inhibiteur de corrosion, contrôle régulier du diamètre interne des tubages ou de l'épaisseur des dépôts, rechemisage du puits si nécessaire. Dans le bassin parisien, des contrôles de corrosion des tubages sont exigés sur les puits injecteurs tous les 3 ans et sur les puits producteurs tous les 5 ans.



## **7. DÉSORDRES POTENTIELS EN SURFACE OU SECOUSSES SISMIQUES RESENTIES**

### **7.1 SISMICITÉ INDUITE**

#### **7.1.1 ÉVÈNEMENT REDOUTÉ**

Comme beaucoup d'activités anthropiques induisant des changements de contraintes dans le sous-sol (production d'hydrocarbures, stockages souterrains, mines souterraines, barrages hydrauliques, etc.), la géothermie profonde peut occasionner des relâchements dynamiques de contraintes (« séismes »), dont les ondes peuvent parfois être ressenties en surface.

On distingue généralement les « séismes » (dont les ondes sont ressenties en surface) et les « microséismes » (dont les ondes sont mesurables par des capteurs mais non ressenties par l'homme). La limite entre les deux se situe généralement autour d'une magnitude de 2.

L'événement redouté traité dans ce chapitre n'est pas l'apparition de microséismes, qui sont inhérents aux activités de géothermie profonde, mais le fait que des événements soient ressentis en surface (séismes), ce qui peut occasionner une gêne voire des craintes de la population locale, ou encore des dommages aux bâtiments.

Il est courant de faire la distinction entre les séismes « induits », c'est-à-dire directement liés aux activités anthropiques concernées (en l'occurrence les opérations de géothermie) et les séismes « déclenchés », c'est-à-dire qui auraient éventuellement eu lieu de façon naturelle mais dont l'apparition a été favorisée par ces activités. Pour faciliter la rédaction et sauf mention explicite, on utilisera par la suite le terme « sismicité induite » pour désigner ces deux situations.

#### **7.1.2 MÉCANISMES ET SCÉNARIOS INITIATEURS**

Dans le contexte de la géothermie profonde, un séisme peut être induit par trois types de mécanismes :

- une augmentation excessive de la pression de pore, qui peut soit fracturer la roche, soit réduire la résistance au cisaillement de fractures préexistantes et déclencher des glissements le long de ces fractures ;
- un refroidissement excessif de la roche, qui peut générer des contraintes thermomécaniques et fracturer la roche ;
- une dépression excessive du réservoir (dans cas d'une réinjection incomplète du fluide géothermal), pouvant générer des contraintes de cisaillement au toit ou au mur du réservoir.

##### **7.1.2.1 Augmentation excessive de la pression de pore**

Une augmentation excessive de la pression de fond peut être générée à diverses occasions de la vie d'un forage :

- en phase de foration, dans le cas d'un contrôle de venues ; la pression de boue au fond du forage est alors volontairement augmentée, ce qui peut amener, si celle-ci est excessive, à dépasser la résistance de la roche et à fracturer les terrains ou à déclencher un séisme sur une faille préexistante ;

c'est semble t-il le mécanisme qui a été à l'origine du séisme de Saint Gall en 2013 (voir fiche en 0) ;

- en phase d'essais :
  - lors d'opérations de stimulation hydraulique : il s'agit de rouvrir des fractures ou de les reconnecter afin d'améliorer la productivité du massif dans le champ proche d'un forage (Lopez & Millot, 2008 ; Ecorem, 2011 ; Kaya et al., 2011 ; BRGM, 2012 ; Cuenot, 2012 ; Reith et al., 2013) (Figure 23) ; une injection d'eau à trop forte pression est susceptible d'abaisser de manière trop importante la résistance effective de friction le long de plans de faille préexistants et de générer des séismes (Agemar et al., 2014) ; une opération de stimulation hydraulique peut engendrer plusieurs milliers d'évènements sismiques dont la très grande majorité sont des microséismes. Néanmoins, les exemples présentés au chapitre sur l'accidentologie (Soultz-sous-Forêts, Bâle, Landau, Insheim, Cooper Basin, Wairakei) montrent que des séismes ressentis ne peuvent pas être exclus.
  - lors d'opérations de stimulation chimique : elles consistent à injecter une plus faible quantité d'eau que la stimulation hydraulique mais additionnée d'agents chimiques qui vont agir en dissolvant les minéraux qui colmatent les fractures. A l'exception des périodes de « chasse » où l'on utilise des débits d'injection élevés pour pousser le produit dans la formation, les surpressions appliquées sont généralement plus faibles que pour une stimulation hydraulique et l'activité microsismique induite reste généralement modérée, tant du point de vue du nombre de séismes que des magnitudes atteintes (ESG, 2015).
- en phase d'exploitation, en cas de pression excessive de réinjection du fluide géothermal. La relation entre pression/débit d'injection et déclenchement d'évènements sismiques a été constatée depuis des décennies (Webb et al., 1984). Même si la phase d'exploitation tend à générer une activité microsismique moindre par rapport à la phase de stimulation, elle peut également générer des séismes ressentis, comme cela a été montré à Soultz-sous-Forêts (Bas-Rhin) lors d'essais de production menés en 2005 et 2010 (Cuenot, 2012, ESG, 2015) ou à Landau (Allemagne) en 2009, où des évènements sismiques magnitudes de 2,4 et 2,7 se sont produits deux ans après le début de l'exploitation (Agemar et al., 2014) ; notons que suite à ces derniers évènements, il a été décidé de réduire le débit de circulation de fluide géothermal.

Une difficulté est que la notion de pression de pore « excessive » ou autrement dit de « surpression maximale à ne pas dépasser » pour ne pas induire de séisme ressenti, n'est pas identique selon les sites. Evans et al. (2012) ont étudié 41 sites en Europe où se sont produits des séismes induits par des activités de géothermie profonde et ont conclu que les sites qui avaient donné lieu à la sismicité la plus importante étaient situés dans des régions où l'état de contraintes naturelles était critique (« critically stressed ») du fait du contexte tectonique ambiant. Il pourrait donc y avoir une relation entre séisme induit et sismicité naturelle liée au contexte tectonique. Cette hypothèse reste néanmoins débattue au sein de la communauté

scientifique<sup>34</sup> (Majer et al., 2007 ; Giordani, 2009 ; Ungemach, 2002 ; Rivas et al., 2005).

Notons que l'on observe parfois un décalage important entre la stimulation et l'apparition des séismes. Ainsi, à Bâle (Suisse), les séismes ressentis sont apparus entre 0,2 et 56 jours après la fin des opérations de stimulation hydraulique (voir § 3.3.1.2 et fiche en 0). Une des hypothèses qui pourrait expliquer ce décalage est le temps de diffusion des pressions de pore depuis le forage jusqu'aux failles préexistantes plus lointaines potentiellement mobilisables (Bachman et al., 2011). Cette inertie peut compliquer la tâche qui consiste à trier entre les séismes induits et les séismes naturels et à mettre en évidence des liens de cause à effet entre les modifications des paramètres d'exploitation (notamment le débit et la pression d'injection) et l'activité sismique générée.

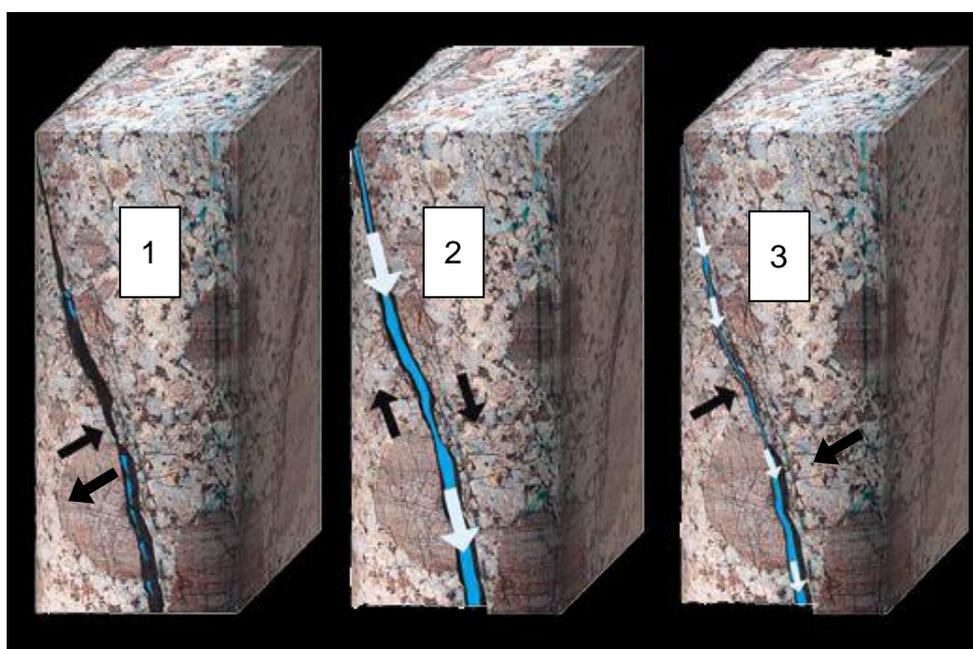


Figure 23. Principe de la stimulation hydraulique (ESG, 2015)

Légende :

1) Avant la stimulation, le plan de faille, correspondant à une surface formée d'épentes irrégulières, est plus ou moins colmaté par des dépôts hydrothermaux (remplissage noir). D'autre part, la contrainte normale (flèches noires), perpendiculaire au plan de faille, et la contrainte tangentielle ou cisailante (contenue dans le plan de faille) s'équilibrent : la faille ne joue pas.

2) Pendant la stimulation, les injections d'eau sous pression (en bleu) augmentent la pression de pore au niveau du plan de faille. Cette pression tend à s'opposer à la contrainte normale qui se réduit : la contrainte cisailante devient alors prépondérante, générant le glissement de la faille et un (micro)séisme. Ce glissement broie les dépôts colmatant et crée des chenaux perméables dans le plan de faille, favorisant la circulation de fluide géothermique (flèches blanches).

3) Après l'arrêt de la stimulation, les contraintes reviennent progressivement à leur état initial et la faille a tendance à se refermer mais il a été observé que, généralement, les zones perméables créées lors de la stimulation se conservent même après l'arrêt des injections : ceci serait dû à la présence d'aspérités sur les plans de faille car, le mécanisme de cisaillement étant irréversible, les épentes de la faille offrent davantage d'espaces après la stimulation hydraulique.

<sup>34</sup> <https://isterre.fr/recherche/equipes/mecanique-des-failles/theses/theses-en-cours/Julie-Richard>

#### 7.1.2.2 Refroidissement excessif de la formation

Un refroidissement excessif de la roche réservoir peut également être à l'origine de séismes induits. Un tel refroidissement peut se produire :

- en phase d'essais, lors d'opérations de stimulation thermique ; dans le cas d'un réservoir à haute température, il s'agit de créer un choc thermique en injectant un fluide froid au sein d'une roche très chaude afin de créer ou de réactiver des fractures par effet thermomécanique. Ce mode de stimulation implique des volumes d'eau nettement moindres que la stimulation hydraulique, ce qui engendre moins d'événements sismiques. Ainsi, à Bouillante (Guadeloupe), la stimulation thermique du forage BO-4 a mobilisé 8000 m<sup>3</sup> d'eau de mer : le débit d'extraction de vapeur est alors passé de 80 à 140 t/h sans générer d'activité sismique particulière au cours des deux mois qui ont suivi de l'opération (Maréchal et al., 2008) ;
- en phase d'exploitation, du fait de la réinjection de fluide géothermal refroidi ; on sait que la perméabilité des terrains au niveau du forage d'injection diminue au cours du temps du fait que la viscosité du fluide géothermal refroidi est supérieure à celle du fluide chaud en place : l'injectivité devrait donc théoriquement décroître avec le temps. Ceci est compensé par la fracturation thermique induite par l'injection de fluide géothermal refroidi<sup>35</sup> (Lopez & Millot, 2008 ; Agemar et al., 2014). Il peut en résulter des séismes induits.

Le site de The Geysers (Californie, USA) est un cas d'étude en la matière puisque la réinjection se fait par simple écoulement gravitaire de la vapeur condensée, sans imposer de surpression grâce à la très faible pression du réservoir profond (NAS, 2013) : la principale cause de sismicité induite résulte donc ici des contraintes thermomécaniques (Martinez-Garzon et al., 2015 ; Convertito et al., 2015). Ces contraintes engendrent une douzaine de séismes par an, l'un d'eux ayant déjà atteint une magnitude de l'ordre de 3.

#### 7.1.2.3 Dépression excessive du réservoir

Un tel scénario peut se produire lorsque le fluide géothermal n'est pas réinjecté dans le sous-sol ou qu'il est réinjecté dans un autre aquifère que celui dans lequel il est prélevé. Une dépression excessive du réservoir peut alors engendrer un effet de contraction poroélastique, qui peut conduire à l'apparition de contraintes de cisaillement dans les formations sus-jacentes ou sous-jacente au réservoir.

Ce phénomène a été très bien documenté sur de nombreux réservoirs de gaz (Lacq en France par exemple) ou dans le domaine de la géothermie, sur le site de Salton Sea en Californie (voir § 3.3.1.6), où il a été observé que l'évolution de l'activité sismique se corrélait bien avec le volume de fluide perdu au sein du réservoir.

#### 7.1.3 EFFETS ET CONSÉQUENCES POTENTIELS

Comme nous l'avons vu dans le chapitre consacré à l'accidentologie (§ 3.2.3), les séismes induits par les activités de géothermie profonde n'ont jamais eu de conséquences sur les vies humaines et n'ont que très rarement occasionné des

---

<sup>35</sup> il peut également s'agir également de l'augmentation de la dissolution due au caractère plus agressif de l'eau froide sur les minéralisations carbonatées.

dommages matériels en surface. Pour illustration, le séisme de Bâle, de magnitude 3,4, n'a eu pour conséquence que des dommages légers aux bâtiments (fissuration ou chute de crépi).

Pour autant, l'impact psychologique sur les habitants peut être important, ce qui peut avoir de fortes répercussions sur l'acceptabilité des projets, comme on a pu le voir récemment lors des débats qui ont entouré les projets de géothermie EGS en Alsace ou en Allemagne et comme l'illustrent les retours d'expérience suivants.

#### Cas de Soultz-sous-Forêts (Bas-Rhin)

A Soultz-sous-Forêts, les quelques séismes ayant atteint ou dépassé la magnitude 2 (maximum 2,9) ont déclenché de nombreux appels téléphoniques pour demande d'information et plusieurs dizaines de plaintes pour dommages présumés sur les habitations, plaintes qui n'ont pas abouti (Cuenot, 2012). Néanmoins, cette expérience a conduit à plusieurs décisions :

- au niveau scientifique, les données sismologiques ont été transmises aux structures de recherche afin de mieux comprendre les séismes induits et dégager des pistes pour pouvoir mieux les maîtriser à l'avenir ;
- sur le plan technique :
  - les stimulations chimiques (moins génératrices d'évènements sismiques) ont été préférées aux stimulations hydrauliques,
  - la pression d'injection a été réduite en dessous d'un certain seuil,
  - la réinjection de l'eau a été répartie sur plusieurs puits (ce qui a permis de passer de 400 microséismes en 2010 à seulement 5 en 2011) ;
- des mesures d'information ont été mises en place (conférences publiques, distribution de bulletins d'information annonçant les opérations en cours et le risque éventuel de perception de séisme, etc.).

L'enquête d'opinion réalisée en 2012 sur les communes concernées (voir Figure 20) et a montré que 83% des personnes interrogées déclaraient ne pas percevoir l'exploration géothermique comme une activité à risques (Reith et al., 2013).

#### Cas de Landau (Allemagne)

A Landau, c'est surtout le manque d'information préalable qui a été critiqué lors de la survenue de deux séismes de magnitude 2,4 et 2,7 (RETS, 2011). En outre, le séisme a été accompagné d'un bruit dont l'intensité a pu localement atteindre celle d'un bang supersonique, ce qui a particulièrement inquiété les riverains (Kulish et Glanz, 2009). La population aurait souhaité être prévenue à l'avance du risque de séisme. Malgré les 200 appels enregistrés par les services de police, il n'y a pas eu de dégâts signalés sur les bâtiments de la ville. Toutefois, le projet a dû finalement être arrêté en 2013 du fait que ce problème a limité le rendement de la centrale et que sa résolution aurait nécessité la réalisation d'un nouveau forage trop coûteux (Slavova, 2013).

#### Cas de Bâle (Suisse)

A Bâle, le séisme de magnitude de 3,4 a créé un fort impact sur la population, d'autant que le site était implanté en ville. Le projet a dû être abandonné et la totalité des plaignants a été indemnisée sans recourir à une expertise technique, soit un coût total de 9 M€ (RETS, 2011). On notera que des microséismes sporadiques ont été détectés 3 ans après (Giordani, 2009) et que la durée de retour à

un bruit de fond sismique normal a été estimé entre 20 et 60 ans (Bachman et al., 2011).

### Cas de The Geysers (Californie, USA).

A The Geysers, des dommages mineurs ont occasionnellement été signalés, prenant la forme de fissures sur des vitres, des murs ou des planchers. Un bureau de réception des plaintes a alors été mis en place : après analyse et validation, il rembourse les habitants des frais de réparation des dégâts. Ce système apparaît satisfaisant pour toutes les parties bien que, en 6 ans, la somme dépensée pour ces remboursements n'ait été que d'environ 73 000 €.

Ces retours d'expérience ont donc permis non seulement de mieux comprendre les mécanismes physiques qui rentrent en jeu dans le déclenchement de la sismicité induite, mais également d'identifier les facteurs humains qui sont à l'origine de la perception négative des séismes et des craintes qu'ils suscitent.

Il en ressort un ensemble de mesures qui, à défaut d'éliminer le risque, permettent de mieux le maîtriser et de prendre en compte les préoccupations des riverains, notamment :

- maintenir la pression d'injection en dessous d'un certain seuil (à adapter à chaque site). Pour cela, si nécessaire répartir la réinjection sur plusieurs forages ;
- mettre en place un réseau efficace de surveillance microsismique permettant d'analyser les données en quasi-temps réel et de modifier en conséquence les paramètres d'injection ;
- informer la population et les autorités locales sur les opérations en cours et les éventuels risques de séismes ressentis (Giordani, 2009).

## **7.2 SURRECTION OU SOULÈVEMENT DE LA SURFACE DU SOL**

### 7.2.1 ÉVÈNEMENT REDOUTÉ

On parle ici d'un risque de surrection de la surface du sol, susceptible de créer des désordres en surface.

Le principal risque de surrection important est lié au gonflement d'une formation sensible suite à une intrusion d'eau. Ce type d'évènement, déjà décrit à plusieurs reprises dans le cadre de ce rapport (§ 3.3.2.1, § 6, fiche Staufen en 0) n'est pas spécifique à la géothermie et rejoint le problème général de l'isolation entre elles des formations traversées par un forage.

Un autre risque de surrection est celui lié aux effets poroélastiques, en cas de débit ou de pression d'injection trop importants.

### 7.2.2 MÉCANISMES ET SCÉNARIOS INITIATEURS

Une intrusion d'eau dans une formation sensible peut être induite par :

- en phase de foration, la méconnaissance de la géologie du sous-sol et l'utilisation de boues de forage non adaptées ;
- à toutes les phases, une perte d'étanchéité longitudinale du forage ; une telle perte d'étanchéité peut résulter d'une cimentation défectueuse ou, en phase

post-abandon, de défauts affectant les bouchons d'obturation du forage (voir détails au § 6.1.2) ;

- en phase d'exploitation, une fuite latérale du forage liée au percement ou à la rupture d'un ou plusieurs cuvelages (voir détails au § 6.2.2).

En ce qui concerne le risque de surrection lié aux effets poroélastiques, il peut être induit, en phase d'exploitation, par une pression d'injection trop forte, qui crée un dôme piézométrique et un soulèvement temporaire de la surface du sol autour du forage d'injection (Sanyal et al., 1995 ; Lopez & Millot, 2008 ; Kaya et al., 2011 ; UCSUSA, 2012 ; Bezelgues-Courtade et al., 2012 ; Bauer et al., 2015). Cela s'est notamment produit dans le champ géothermique de l'Imperial Valley (Californie, USA) (Sanyal et al., 1995). Le sol revient généralement à son niveau d'origine peu après que le débit et/ou la pression d'injection ai(en)t été réduit(s).

### 7.2.3 EFFETS ET CONSÉQUENCES POTENTIELS

L'importance du soulèvement lié au gonflement d'une formation sensible dépend principalement de la profondeur, de l'épaisseur et de la nature de la formation concernée.

Dans les exemples de Lochwiller ou de Staufen (cf. fiche en 0), le banc d'anhydrite impacté se trouve à une profondeur relativement faible : l'effet de surrection a donc été important (quelques dizaines de centimètres par endroits) et les désordres en surface conséquents (fissures sur les bâtiments, déformation de la chaussée, ruptures de réseaux enterrés, etc.).

Dans le cas des surrections survenues à partir de 2014 à Landau (Allemagne), où une intrusion d'eau dans une formation sensible (argile) est également soupçonnée (ADIR, 2014, Heimlich et al., 2015), une zone circulaire de surrection d'amplitude pluri-centimétrique, centrée sur la centrale géothermique, a été mesurée par interférométrie radar.

Dans le cas de l'Imperial Valley (Californie), l'amplitude du soulèvement a atteint quelques pouces, soit de l'ordre d'une dizaine de centimètres (Sanyal et al., 1995). Cela a posé un problème dans cette vaste plaine alluviale cultivée qui est très plate et sous le niveau de la mer. Pour le résoudre, il a fallu redistribuer l'injection sur plusieurs forages espacés.

## 7.3 SUBSIDENCE OU ABAISSEMENT DE LA SURFACE DU SOL

### 7.3.1 ÉVÉNEMENT REDOUTÉ

Il s'agit ici du risque d'affaissement (subsidence) de la surface du sol induit par l'exploitation géothermique. Ce type d'évènement peut intervenir essentiellement en phase d'exploitation et résulter de plusieurs mécanismes : rabattement excessif de l'aquifère, perte de matière par entraînement de particules fines, dissolution d'une formation évaporitique, réinjection incomplète ou absente du fluide géothermal dans le réservoir. Ces mécanismes ne sont pas spécifiques à la géothermie mais concernent l'ensemble des activités d'exploitation par forages, notamment l'exploitation des hydrocarbures.

## 7.3.2 MÉCANISMES ET SCÉNARIOS INITIATEURS

### 7.3.2.1 Dissolution incontrôlée d'une formation évaporitique

La réalisation d'un forage profond, quelle que soit sa finalité, peut intercepter des couches évaporitiques solubles (sel, potasse, gypse) sur une épaisseur parfois importante : c'est par exemple le cas de la série salifère du Tertiaire du bassin de Mulhouse, dans le fossé rhénan, qui est épaisse de 1500 à 1800 m.

En cas d'intrusion d'un fluide en déséquilibre chimique avec la formation, on peut craindre une dissolution locale de ces évaporites. Une telle intrusion peut se produire suite aux mêmes mécanismes que ceux déjà exposés au § 7.2.2 pour le risque de gonflement d'une formation sensible.

C'est d'ailleurs ce qui s'est produit à Hilsprich (Moselle) où deux sondages de géothermie superficielle ont été réalisés à moins de 100 m de profondeur en 2005. Une mauvaise cimentation a permis la mise en contact de la nappe phréatique d'eau douce avec un horizon profond de sel, épais de 20 m, qui a subi une dissolution (voir 3.3.2.2).

### 7.3.2.2 Rabattement de nappe excessif

Ce mécanisme est connu en hydrogéologie, hors contexte géothermique, où il a déjà engendré des affaissements au droit de forages mis en pompage à fort débit au sein de formations sédimentaires. Il résulte du tassement des particules formant le réservoir aquifère suite à un fort rabattement induit par une baisse de pression hydrostatique.

Dans le contexte géothermique, il n'est susceptible de se produire qu'en phase d'exploitation, au droit du forage de production (Lopez & Millot, 2008 ; Kaya et al., 2011 ; UCSUSA, 2012 ; Bezelgues-Courtade et al., 2012 ; Bauer et al., 2015). Des phénomènes de ce type peuvent également apparaître suite à un soutirage excessif, lorsque le débit de pompage du fluide géothermal excède le débit de recharge (Webb et al., 1984).

Cet effet tend à s'estomper dans le cas de pompages profonds mais, en cas de connexion du réservoir géothermique profond avec un aquifère plus superficiel, l'impact pourrait être partiellement transféré à ce dernier : il peut alors apparaître un abaissement piézométrique des aquifères superficiels et une diminution de débit des sources avoisinantes (Mendrinós & Karytsas, 2006).

Ce phénomène s'est produit sur le champ géothermique de Brady Hot Springs (Nevada, USA) qui possède 6 forages de production profonds de 500 à 2000 m, avec un débit d'extraction net de fluide géothermal de l'ordre de 0,1 m<sup>3</sup>/s. Un suivi réalisé de 1997 à 2013 par interférométrie InSAR a mis en évidence une subsidence à un taux de quelques centimètres par an sur une surface elliptique d'environ 2 x 5 km, dont l'axe principal correspond à l'orientation du réseau de failles normales (Oppliger et al., 2006). L'origine de cette subsidence proviendrait d'un drainage des aquifères superficiels vers le réservoir géothermal profond par le biais de zones perméables associées aux failles (Ali et al., 2014).

En revanche, sur le site de Desert Peak, distant de seulement 7 km, aucune déformation de ce type n'a été mise en évidence malgré un fonctionnement comparable : or, ce site ne présente pas de failles récentes en surface ni de sources thermales et son système de failles semble plus profond et mieux isolé de la surface, ce qui renforce l'hypothèse d'interactions avec le contexte tectonique local.

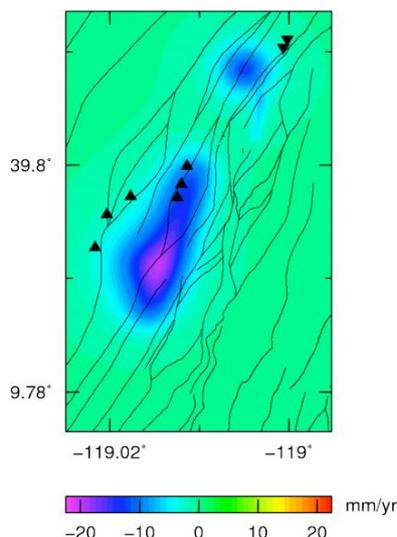


Figure 24. Tracé de la cuvette de subsidence, du réseau de failles et des forages de production (▲) et d'injection (▼) sur le site de Brady (Ali et al., 2014)

Légende : le taux de subsidence est représenté en couleurs (échelle en mm/an)

### 7.3.2.3 Entraînement de particules excessif par suffosion

Lorsque le réservoir géothermique renferme des particules fines, il peut se produire un phénomène de suffosion (Figure 25) : il s'agit de l'entraînement de particules fines (argiles, limons) au travers d'un squelette plus grossier (sables, graviers). Ceci est plus fréquent dans des formations sédimentaires sujettes à une hétérogénéité granulométrique mais il peut également apparaître en roche dure, lorsqu'il y a colmatage de fissures par des minéraux argileux.

Ce risque est rarement cité dans le contexte géothermique contrairement à son corollaire, à savoir le colmatage du forage d'injection par des particules fines, qui est l'un des mécanismes à l'origine d'une perte d'injectivité. Il semblerait donc que, lorsqu'il se produit, ce risque soit occulté par les problèmes de perte de rendement.

Néanmoins, la mise en place d'une suffosion a été plusieurs fois suspectée en domaine géothermique, notamment par Lopez & Millot (2008) dans le Dogger du Bassin parisien, par Seibt & Wolfgramm (2008) sur le site de Kalipeida (Lituanie) ou par Sanyal et al. (2015) sur les sites d'Heber ou d'East Mesa (Californie, USA).

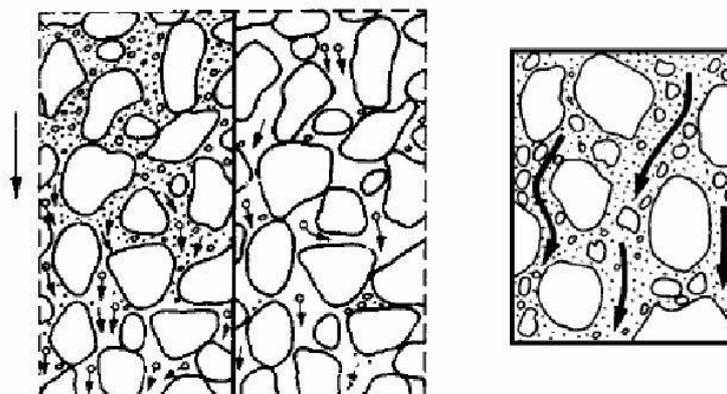


Figure 25. Schématisation du mécanisme de suffosion ([www.uni-weimar.de/](http://www.uni-weimar.de/))

Légende : à gauche, la formation avant déclenchement de la suffosion ; à droite, le résultat final

#### 7.3.2.4 Réinjection incomplète ou absente

La diminution de pression induite par la production d'un réservoir géothermique peut induire un phénomène de subsidence. Ce dernier prendra une ampleur d'autant plus importante que le fluide géothermique n'est pas réinjecté en totalité ou est réinjecté dans un autre aquifère. Il peut s'agir d'un mode de gestion intentionnelle de l'exploitation (avec par exemple, rejet du fluide géothermique refroidi en mer ou en rivière) ou de l'impossibilité de réinjecter la totalité du fluide extrait au sein de la formation (Hervé, 2009 ; Kaya et al., 2011 ; Cuenot, 2012).

Dans le cas extrême d'une exploitation sans réinjection de fluide géothermique, fréquent dans les gîtes géothermiques à haute température, plusieurs années d'exploitation peuvent conduire à une subsidence d'un à plusieurs mètres au centre de la zone de production (Mendrinou & Karytsas, 2006). C'est par exemple le cas des champs géothermiques de Wairakei, en Nouvelle-Zélande (Allis, 2000), de The Geysers en Californie (Mossop et al., 1997) ou de Hatchobaru 2 au Japon (Nishijima et al., 2005).

Le cas d'une subsidence liée à une réinjection incomplète s'est produit en Indonésie, sur un site où l'extraction de vapeur se fait au rythme de 8 à 13 Mt/an alors que la réinjection, après condensation, ne concerne que 2 à 2,7 Mt/an (Sofian et al., 2015). Cette réinjection incomplète peut également provenir du fait qu'une faible quantité de fluide géothermique peut s'évaporer et ainsi ne pas être renvoyée dans le sous-sol, conduisant à des affaissements à long terme (Berrizbeitia, 2014).

#### 7.3.2.5 Modification des flux souterrains

On doit signaler également que l'extraction de fluides géothermiques peut entraîner une modification des flux entre un réservoir profond et superficiel, au détriment de ce dernier (ECOREM, 2011). Ce mécanisme peut par exemple se produire à proximité d'une faille qui joue le rôle de drain entre les différents aquifères renfermés dans ces deux réservoirs : c'est ce qui expliquerait la subsidence du site géothermique de Brady (Nevada, USA) (Ali et al., 2014).

### 7.3.3 EFFETS ET CONSÉQUENCES POTENTIELS

Les principaux effets consistent en un abaissement (tassement, affaissement, exceptionnellement effondrement) de la surface du sol et donc des structures qui y sont implantées. Cela est susceptible de créer des désordres sur des bâtiments ou des réseaux enterrés, mais également de déstructurer localement le réseau hydrographique (création de mares, de contre-pentes...). Notons que la nature et l'ampleur des effets en surface dépendent de la profondeur des mécanismes sources.

Dans le cas du site de géothermie superficielle d'Hilsprich (Moselle), une cuvette d'affaissement de 1,1 km sur 0,3 km a été mise en évidence par interférométrie radar<sup>36</sup> avec une vitesse moyenne de déformation de 9 cm/an pendant 3 ans (Baras, 2015). Ces mesures ainsi que des nivellements montrent un affaissement d'une amplitude verticale comprise entre 0,6 m et 0,9 m sur une période de 6 ans. Des désordres sont apparus dès 2006 au niveau d'une quinzaine de maisons et

---

<sup>36</sup> <http://www.brgm.fr/projet/mesure-deformation-sol-sur-commune-hilsprich-interferometrie-radar>

sur le réseau routier, sur environ 450 m autour des forages. Cette commune a été déclarée en état de catastrophe naturelle « mouvements de terrain » en 2009 (Carton, 2015).

Dans le cas des sites géothermiques à haute température de type volcanique, cette subsidence peut atteindre un à plusieurs mètres au centre de la zone de production (Mendrinós & Karytsas, 2006) : cela est notamment le cas après plusieurs années d'exploitation basée sur l'extraction de grandes quantités de fluide géothermal sans réinjection. Pour y remédier, il est proposé de prévoir en phase de conception de ne pas implanter de bâtiments, de pipelines ou d'autres constructions dans une telle zone, ainsi que de réinjecter la totalité de la vapeur une fois condensée. Il est également nécessaire de réaliser régulièrement un suivi topographique et/ou des mesures d'interférométrie radar (cf. Heimlich et al., 2015), avec des investigations géophysiques d'appui (par exemple, de la microgravimétrie) afin de suivre l'évolution de la zone éventuelle de subsidence.

A Wairakei, en Nouvelle-Zélande, l'exploitation sans réinjection du champ géothermique de 1950 à 1997 a ainsi créé (Allis, 2000) :

- une petite zone de subsidence intense (480 mm/an) sur environ 1 km<sup>2</sup> ;
- une vaste zone de subsidence moyenne à forte (10 à 100 mm/an) sur 30 km<sup>2</sup>.

La subsidence maximale a atteint 14 m au centre de la cuvette, ce qui a fissuré le sol et les infrastructures linéaires (pipelines, routes, drains...). Ce phénomène a été attribué à la compaction lente des sédiments argileux lacustres, présents vers 100 à 200 m de profondeur.

D'autres exemples de subsidence survenue sur des sites géothermiques à haute température sont également cités dans la littérature (Maréchal et al., 2008) :

- 0,15 m à Svartsengi (Islande) de 1982 à 1987 ;
- 0,25 m à Kawerau (Nouvelle-Zélande) de 1970 à 1982 ;
- 0,30 m à Ohaki (Nouvelle-Zélande) de 1968 à 1974 ;
- 1,70 m à Larderello (Italie), etc.

Sur le site de The Geysers (Californie, USA), plus grand complexe géothermique au monde, l'exploitation de la chaleur à haute température sans réinjection a peu à peu fait chuter la pression de vapeur dans le réservoir. Cela a induit une subsidence de l'ordre de 5 cm/an entre 1973 et 1996, centrée sur la zone d'extraction la plus active durant cette période (Mossop et al., 1997). Pour maintenir cette pression, il faut depuis lors réinjecter dans le réservoir environ 76 000 m<sup>3</sup> d'eau par jour, dont la plus grande partie est de l'eau résiduaire.

Au Japon, des mouvements de la surface du sol joints à une anomalie gravimétrique<sup>37</sup> ont été mis en évidence à proximité des forages géothermiques de la centrale Hatchobaru 2 en 1990 (Nishijima et al., 2005). Ils concernent la zone d'injection et une partie de la zone de production et se sont produits dès la mise en fonctionnement de la centrale. Des balises GPS ont permis de mesurer des

---

<sup>37</sup> En Indonésie, des mesures gravimétriques ont été réalisées de 2009 à 2011 sur un réservoir géothermal en exploitation (Sofian et al., 2015). Alors que 8 à 13 Mt de vapeur sont extraits chaque année sur ce site, seuls 2 et 2,7 Mt sont réinjectés après condensation. Des anomalies négatives et positives sont apparues, respectivement interprétées en termes de perte de masse au niveau des forages de production et de gain de masse au niveau des forages d'injection.

affaissements atteignant jusqu'à 64 mm d'amplitude. Par modélisation, l'origine de ces mouvements a été localisée à 750 m de profondeur, au niveau d'une faille.

## **7.4 GLISSEMENT DE TERRAIN**

### **7.4.1 ÉVÈNEMENT REDOUTÉ**

Il s'agit ici du risque de déclenchement d'un glissement de terrain susceptible d'atteindre un forage géothermique ou d'avoir été engendré par une opération géothermique. Le chapitre concernant l'accidentologie cite trois accidents dans lesquels un glissement de terrain a provoqué une rupture de cuvelage ayant entraîné une fuite en surface.

Notons toutefois que ce risque n'est pas spécifique à la géothermie. Il relève du choix général de la zone d'implantation d'un forage par rapport aux risques naturels, en l'occurrence le risque de mouvements de terrain.

### **7.4.2 MÉCANISMES ET SCÉNARIOS INITIATEURS**

Hirschberg et al. (2015) signalent que, dans le passé, des glissements de terrains sont survenus à proximité de sites de géothermie superficielle mais sans que leur cause ait été clairement établie. Ces auteurs font également remarquer que de nombreux sites géothermiques se trouvent en zone montagneuse, propice à ce type de mouvement de terrain.

Notons qu'il est envisageable que certains forages géothermiques peu profonds aient pu interagir avec des discontinuités superficielles (failles, surfaces de glissement) et provoquer un mouvement de terrain.

### **7.4.3 EFFETS ET CONSÉQUENCES POTENTIELS**

L'accident survenu en 1991 sur le forage Zunil 1 (Guatemala) a été très meurtrier (voir chapitre 0) : il résulte d'un grand glissement de terrain qui a provoqué la rupture du cuvelage d'un forage géothermique, entraînant une projection massive de fluide géothermal chaud aux alentours. On a dénombré un total de 23 morts, la majorité d'entre eux ayant été ensevelie par le glissement de terrain et non directement impactée par ce *blowout* massif.

Notons que, dans le cas où la probabilité de survenue d'un glissement de terrain serait liée à la géomorphologie du site et non à l'utilisation qui en est faite, ce risque ne disparaît pas à l'abandon du forage géothermique.

La zone d'implantation d'un forage est donc un paramètre important car l'environnement extérieur peut faire augmenter le risque d'accident. L'existence de reliefs doit être prise en compte lors de la conception d'un projet géothermique.

## **7.5 CONCLUSION**

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

Même cela n'a jamais occasionné que des dégâts légers sur des bâtiments, la sismicité induite est un des risques perçus comme les plus importants liés à la géothermie profonde. Ce risque apparaît principalement lors des opérations de stimulation (en particulier hydraulique) mais il perdure au cours de la phase d'exploitation. Le lien entre la probabilité d'occurrence de séismes induits ressen-

tis et la sismicité naturelle d'une région a été beaucoup étudié mais n'a pas fait l'objet d'un consensus à ce jour.

Sur le plan scientifique, les retours d'expérience des événements ressentis à Soultz-sous-Forêts, Bâle ou encore Saint-Gall permettent aujourd'hui de mieux comprendre les mécanismes qui rentrent en jeu dans le déclenchement de la sismicité induite, mais également les facteurs qui sont à l'origine des craintes qu'elle suscite auprès des habitants. Il en ressort un ensemble de mesures opérationnelles qui, à défaut d'éliminer le risque, permettent de mieux le maîtriser et de prendre en compte les préoccupations des riverains, notamment :

- maintenir la pression d'injection en dessous d'un certain seuil (à adapter pour chaque site). Pour cela, si nécessaire répartir la réinjection sur plusieurs forages ;
- mettre en place un réseau efficace de surveillance microsismique permettant d'analyser les données en quasi-temps réel et de modifier en conséquence les paramètres d'injection ;
- informer la population et les autorités locales sur les opérations en cours et les éventuels risques de séismes ressentis (Giordani, 2009).

Une autre source de désordres de nature géomécanique peut provenir de la mise en contact d'une formation évaporitique (sel, gypse, anhydrite) avec un fluide en déséquilibre chimique avec celle-ci (eau douce, eau géothermale, etc.). Ce scénario peut se produire, en phase d'exploitation comme en phase d'abandon, dans le cas d'une perte d'étanchéité du forage. Il peut en résulter un soulèvement de la surface du sol, en cas d'hydratation et de gonflement de cette formation, ou bien un abaissement de la surface du sol, en cas de dissolution de celle-ci. Dans les deux cas, des dommages importants peuvent être occasionnés aux bâtiments, aux réseaux ou aux infrastructures en surface. Des incidents de ce type se sont produits récemment dans le domaine de la géothermie superficielle (Lochwiller, Staufen, Kirchheim). Néanmoins, ce risque n'est pas spécifique à la géothermie, mais relève plus généralement 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 liés à la surpression (ou la dépression) induite au niveau du réservoir géothermique. Ce deuxième risque (subsidence liée à une dépression importante du réservoir) est particulièrement présent lorsque le fluide géothermal n'est que partiellement (ou pas du tout) réinjecté dans son aquifère d'origine. Cette situation n'est pas spécifique à la géothermie mais elle se rencontre plus particulièrement sur les sites géothermiques de types volcaniques, où une réinjection partielle (voire absente) est fréquente et où des cas de subsidence importante (jusqu'à plusieurs mètres) ont été observés 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. Néanmoins, il doit être pris en compte, y compris dans le cas de forages de géothermie profonde.



## **8. SYNTHÈSE**

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 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.

Ce rapport se veut une contribution scientifique et objective à ce débat. Il vise à présenter de manière factuelle et documentée l'état des connaissances sur les risques, impacts et nuisances potentiels liés à la géothermie profonde. Outre la littérature scientifique, il s'appuie sur le retour d'expérience des incidents ou accidents survenus dans ce domaine. Il met également à profit l'expertise de l'INERIS dans le domaine des risques liés à d'autres secteurs d'activités, notamment celui des forages pétroliers, pour porter un regard distancié sur les technologies de la géothermie profonde.

Les principaux enseignements tirés de ce travail sont les suivants.

### **8.1 ENSEIGNEMENTS SUR L'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. Sur ces 32 événements, on dénombre un mort et neuf 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 (bâties ou infrastructures), des pollutions locales ou des impacts psychologiques sur les habitants.

L'impression globale qui ressort de ce bilan est que la géothermie profonde bénéficie d'une accidentologie assez faible. Il faut toutefois noter que ce recensement n'est que partiel, dans la mesure où il n'utilise que les informations issues du domaine public et provenant essentiellement de sources occidentales. Pour pouvoir tirer des enseignements quantitatifs plus définitifs sur l'accidentologie liée à la géothermie profonde, nous encourageons la profession, au travers de ses structures représentatives à l'échelle nationale et internationale, à mettre en place un recensement systématique des incidents et accidents survenant dans ce secteur. Au-delà d'un suivi des indicateurs de sécurité, une telle base de données permettrait un meilleur partage du retour d'expérience des accidents, ce qui serait bénéfique à la fois pour la sécurité, ainsi que pour le développement et l'image de cette industrie.

Sur un plan plus qualitatif, on constate que plus de la moitié des événements recensés sont des séismes ressentis (34%) ou des mouvements de la surface du sol (gonflement ou subsidence) lié à des désordres géomécaniques en sous-sol (23%). Les autres types d'événements sont essentiellement des rejets toxiques en surface ou des contaminations d'aquifères souterrains. On notera que la plupart de ces types d'accidents ne sont pas spécifiques à la géothermie profonde et sont propres à toute activité d'exploitation de ressources du sous-sol par forages (hydrocarbures, captage d'eau potable, stockage souterrain de gaz en aquifères, etc.). En revanche, le contexte de la géothermie offre des conditions plus propices à certains types d'accidents (ou de nuisances) et moins propices à d'autres, que nous détaillons ci-après.

## **8.2 NUISANCES ET IMPACTS CHRONIQUES POTENTIELS LIÉS À LA GÉOTHERMIE PROFONDE**

Les nuisances ou impacts de nature chronique potentiellement générés par une installation de géothermie profonde ne sont pas, pour la plupart, spécifiques à la géothermie.

En ce qui concerne l'impact paysager, celui-ci est le plus important au moment de la foration des ouvrages et de la réalisation des essais, phase pendant laquelle un chantier est installé sur une superficie d'environ 4000 à 8000 m<sup>2</sup>, avec un mât de forage généralement visible d'assez loin. Cette phase est toutefois relativement courte (6 mois à 1 an). En phase d'exploitation, une centrale géothermique prend la forme d'un site industriel de taille assez modeste, comprenant un à quelques bâtiments, qui peuvent s'intégrer relativement facilement dans un paysage, notamment urbain.

Comme tout chantier de génie civil, la réalisation de forages géothermiques génère du bruit et une circulation additionnelle de camions, qui peuvent être ressentis comme une source de nuisances par la population, notamment en milieu résidentiel. Ces nuisances restent toutefois limitées à une période de quelques mois à un an maximum. D'autre part, il faut signaler qu'il existe aujourd'hui de nombreux moyens de limiter au mieux ces nuisances (murs anti-bruit, appareils de forage peu sonores, planification des opérations les plus bruyantes en dehors des périodes sensibles, etc.). 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 peuvent demeurer.

Comme tout projet industriel, la réalisation de forages et la construction d'une centrale géothermique peut également avoir un 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<sup>3</sup> 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<sub>2</sub> 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.

### **8.3 PRINCIPAUX RISQUES ACCIDENTELS**

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

La construction ou l'exploitation d'un site de géothermie profonde comporte un certain nombre de 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, même s'il est moins prégnant en géothermie que dans le domaine des hydrocarbures, est néanmoins à prendre en considération. En effet, un forage, quelle que soit sa nature, peut traverser des formations en surpression, contenant éventuellement du gaz. L'exemple de l'incident de Saint-Gall, en 2013, montre qu'une venue de gaz doit toujours être envisagée et est toujours difficile à maîtriser. Plusieurs cas d'éruptions dans des contextes de géothermie en zones volcaniques ont d'ailleurs été reportés, menant pour certaines à des accidents graves : Agua Shuca (El Salvador) en 1990, Zunil 1 (Guatemala) en 1991, Puna 2 (Hawaii) en 1991. Ce constat appelle à ce que les forages de géothermie profonde soient réalisés dans les mêmes conditions de sécurité, pour ce qui concerne le risque de venues de gaz, que les forages d'hydrocarbures (BOP en tête de puits, présence de détecteurs de gaz, formation du personnel au contrôle des venues, etc.). Notons que c'est déjà le cas aujourd'hui en France.

Comme tout chantier de forage, un chantier de géothermie comporte également des risques de fuites ou de débordement de réservoirs en surface. La gestion de ces risques, qui concerne toutes les activités industrielles impliquant des stockages de fluides en surface, est classique et ne présente pas de difficultés propres à la géothermie.

Des fuites peuvent également se produire sur les équipements et canalisations qui composent le circuit primaire (celui qui transporte le fluide géothermal) ou le circuit secondaire. Là encore, la géothermie ne présente pas de spécificités par rapport à d'autres domaines industriels impliquant des transports de fluides en surface. Il convient seulement de noter que le circuit primaire est plus exposé à ce type de fuites (du fait que le fluide géothermal qu'il transporte est plus agressif) et que celui-ci nécessite donc une surveillance accrue.

Enfin, le risque d'une émission gazeuse liée à un dégazage accidentel du fluide géothermal (par exemple suite à une fuite de celui-ci) est un risque à considérer, notamment lorsque ce dégazage se produit en milieu confiné. Des risques pour le personnel (intoxication, asphyxie) peuvent en découler, comme cela s'est produit au Japon en 1998, lors d'une intervention d'un travailleur dans la salle de séparation d'huile d'une installation géothermique.

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

Au-delà d'un déversement accidentel de produits en surface (déjà vu précédemment), la contamination d'un aquifère sensible au droit d'une exploitation géothermique profonde peut survenir suite à deux types d'événements.

Tout d'abord, la mise en communication d'aquifères de pression et de qualité différentes, suite à une perte d'étanchéité longitudinale d'un forage. Une telle perte d'étanchéité peut résulter d'une cimentation défectueuse ou, en phase post-abandon, de défauts affectant les bouchons d'obturation du forage. Ce risque n'est pas spécifique à la géothermie mais c'est un enjeu majeur de la sécurité des forages profonds. 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, appliqué ou non à la géothermie.

La contamination d'un aquifère sensible peut également survenir suite à une fuite latérale d'un forage, liée au percement ou à la rupture d'un ou plusieurs cuvelages. Ce scénario est particulièrement à suivre dans le cas des forages de géothermie profonde, où le cuvelage est en contact direct avec le fluide géothermal et où par conséquent, celui-ci est d'avantage exposé à la corrosion et dans le cas de la géothermie haute température, aux effets thermomécaniques liées aux variations de température. La corrosion, notamment, a affecté beaucoup de puits de géothermie en Ile de France et a conduit à certains incidents, notamment celui de Coulommiers en 1996.

Pour pallier ce problème, un ensemble de mesures ont été prises, qui permettent aujourd'hui une meilleure gestion des effets de la corrosion : surépaisseur des tubages, inhibiteur de corrosion, contrôle régulier du diamètre interne des tubages ou de l'épaisseur des dépôts, rechemisage du puits si nécessaire. Dans le bassin parisien, des contrôles de corrosion des tubages sont exigés sur les puits injecteurs tous les 3 ans et sur les puits producteurs tous les 5 ans.

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

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

Même si cela n'a jamais occasionné que des dégâts légers sur des bâtiments, la sismicité induite est un des risques perçus comme les plus importants liés à la géothermie profonde. Ce risque apparaît principalement lors des opérations de stimulation (en particulier hydraulique) mais il perdure au cours de la phase d'exploitation. Le lien entre la probabilité d'occurrence de séismes induits ressentis et la sismicité naturelle d'une région a été beaucoup étudié mais n'a pas fait l'objet d'un consensus à ce jour.

Sur le plan scientifique, les retours d'expérience des événements ressentis à Soultz-sous-Forêts, Bâle ou encore Saint-Gall permettent aujourd'hui de mieux comprendre les mécanismes qui rentrent en jeu dans le déclenchement de la sismicité induite, mais également les facteurs qui sont à l'origine des craintes qu'elle suscite auprès des habitants. Il en ressort un ensemble de mesures opérationnelles qui, à défaut d'éliminer le risque, permettent de mieux le maîtriser et de prendre en compte les préoccupations des riverains, notamment :

- maintenir la pression d'injection en dessous d'un certain seuil (à adapter pour chaque site). Pour cela, si nécessaire répartir la réinjection sur plusieurs forages ;
- mettre en place un réseau efficace de surveillance microsismique permettant d'analyser les données en quasi-temps réel et de modifier en conséquence les paramètres d'injection ;
- informer la population et les autorités locales sur les opérations en cours et les éventuels risques de séismes ressentis.

Une autre source de désordres de nature géomécanique peut provenir de la mise en contact d'une formation évaporitique (sel, gypse, anhydrite) avec un fluide en déséquilibre chimique avec celle-ci (eau douce, eau géothermale, etc.). Ce scénario peut se produire, en phase d'exploitation comme en phase d'abandon, dans le cas d'une perte d'étanchéité du forage. Il peut en résulter un soulèvement de la surface du sol, en cas d'hydratation et de gonflement de cette formation, ou bien un abaissement de la surface du sol, en cas de dissolution de celle-ci. Dans les deux cas, des dommages importants peuvent être occasionnés aux bâtiments, aux réseaux ou aux infrastructures en surface. Des incidents de ce type se sont produits récemment dans le domaine de la géothermie superficielle (Lochwiller, Staufen, Kirchheim). Néanmoins, ce risque n'est pas spécifique à la géothermie, mais relève plus généralement 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 liés à la surpression (ou la dépression) induite au niveau du réservoir géothermique. Ce deuxième risque (subsidence liée à une dépression importante du réservoir) est particulièrement présent lorsque le fluide géothermal n'est que partiellement (ou pas du tout) réinjecté dans son aquifère d'origine. Cette situation n'est pas spécifique à la géothermie mais elle se rencontre plus particulièrement sur les sites géothermiques de types volcaniques, où une réinjection partielle (voire absente) est fréquente et où des cas de subsidence importante (jusqu'à plusieurs mètres) ont été observés au droit de certains sites de produc-

tion. 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. Néanmoins, il doit être pris en compte, y compris dans le cas de forages de géothermie profonde.

#### 8.4 ANALYSE COMPARATIVE DES RISQUES, IMPACTS ET NUISANCES LIÉES À LA GÉOTHERMIE PROFONDE

L'ensemble des risques, impacts et nuisances abordés ci-avant ont été synthétisés (voir Tableau 7 et Tableau 8) avec une échelle d'appréciation qualitative permettant de les comparer, sur le double plan de leur probabilité de survenue et de la gravité des conséquences qu'ils pourraient avoir.

Cette appréciation est donnée selon les phases de vie d'un site géothermique (foration, essais, exploitation, post-abandon) et repose sur une échelle de 4 valeurs, fournie dans le Tableau 6.

Notons qu'il s'agit là d'une appréciation générique, qui n'a pas vocation à se substituer à l'analyse spécifique qui doit être réalisée dans le contexte de chaque site.

Tableau 6. Critères d'appréciation des risques-impacts-nuisances liés à la géothermie profonde

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 <sup>a</sup>
	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 <sup>b</sup> aux biens, impact environnemental d'intensité et d'étendue significatives <sup>c</sup>
	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 <sup>d</sup>

<sup>a</sup> limité à l'emprise du site ou de l'ordre de la dizaine de mètres alentour

<sup>b</sup> qui ne portent pas atteinte à l'intégrité globale des bâtiments ou infrastructures

<sup>c</sup> de l'ordre de quelques dizaines à centaines de mètres autour du site

<sup>d</sup> au-delà de plusieurs centaines de mètres autour du site

Tableau 7. Nuisances et impacts chroniques potentiels liés à la géothermie profonde

Légende : ■ Gravité<sup>38</sup> 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	■	■	■ <sup>b</sup>	■ <sup>a</sup>
Impact sur la ressource en eau	■	■	■	■
Emissions de gaz et d'odeurs	■	■	■	■ <sup>a</sup>
Impact carbone	■	■	■	s. o.
Radioactivité pour les travailleurs	■	■	■	s. o.

<sup>a</sup> sauf en cas de fuite chronique de fluide géothermal liée à un mauvais bouchage ou à une dégradation du bouchage (vieillessement).

<sup>b</sup> sauf en cas de réinjection incomplète ou de non réinjection du fluide géothermal.

Tableau 8. Risques et impacts accidentels potentiels liés à la géothermie profonde

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

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

<sup>a</sup> Dans une approche majorante, les classes de probabilité attribuées à ces risques prennent en compte le retour d'expérience de la géothermie superficielle, tel que mentionné aux sections 7.2 et 7.3.

<sup>38</sup> La notion de probabilité n'est pas pertinente pour ce tableau puisqu'on est ici dans le domaine chronique.



## 9. **BIBLIOGRAPHIE**

Abrigo MFV, Molling PA, Acu JA, 2004. Determination of recharge and cooling rates using geochemical constraints at the Mak-Ban (Bulalo) geothermal reservoir, Philippines. *Geothermics* 33 : 11-36.

ADEME, 2010. Guide des facteurs d'émissions - Version 6.1 Chapitre 2 – Facteurs associés à la consommation directe d'énergie.

ADEME-BRGM, 2004. La géothermie. Collection « Les enjeux des géosciences », BRGM, décembre 2004.

ADEME, 2015. La géothermie en Ile-de-France. Juin 2015, 8 p., <https://ile-de-france.ademe.fr/sites/default/files/files/Mediatheque/Publications/plaquette-geothermie-juin-2015.pdf>

ADIR, 2014. Séismes à Robertsau ? <http://www.adirobertsau.fr/?p=668>

AFPG, 2013. Etude de marché de la géothermie en France. Rapport de l'Association Française des Professionnels de la Géothermie, Mise à jour 2013.

AFPG, 2016. La géothermie en France, étude de marché en 2015, synthèse. [http://www.afpg.asso.fr/wp-content/uploads/2016/12/Depliant\\_afpg\\_marche2015\\_BAT2.pdf](http://www.afpg.asso.fr/wp-content/uploads/2016/12/Depliant_afpg_marche2015_BAT2.pdf)

AFPG-SFEG, 2013. Incident de forage à Lochwiller (Bas-Rhin). Communiqué de presse, 22/07/2013.

AFNOR, 2014. Forage d'eau et de géothermie – Réalisation, suivi et abandon d'ouvrage de captage ou de surveillance des eaux souterraines réalisés par forages. Norme française NF X 10-999 du 30 août 2014, version de 2014-08-F.

Agemar T, Weber J, Schulz R, 2014. Deep Geothermal Energy Production in Germany. *Energies* 2014, 7, 4397-4416; doi:10.3390/en7074397.

Aksoy N, Şimşek C, Gunduz O, 2009. Groundwater contamination mechanism in a geothermal field: A case study of Balçova Turkey. *Journal of Contaminant Hydrology* 103: 13-28.

Ali ST, Davatzes NC, Drakos PS, Feigl KL, Foxall W, Kreemer CW, Mellors RJ, Wang HF, Zemach E, 2014. InSAR measurements and numerical models of deformation at Brady Hot Springs geothermal field (Nevada), 1997-2013. Proc. 39<sup>th</sup> Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, February 24-26, 2014, SGP-TR-202.

Allis RG, 2000. Review of subsidence at Wairakei field, New Zealand. *Geothermics*, Volume 29, Issues 4–5, 1 August 2000: 455–478.

Allis R, Bromley C, Currie S, 2009. Update on subsidence at the Wairakei – Tauhara geothermal system, New Zealand. *Geothermics* 38 (2009): 169–180.

Antoine M, 2013. Le village dont le sol gonfle. Aujourd'hui en France, 20/11/2013.

Arevalo AS, 1998. Environmental aspects of the Berlin geothermal power station in El Salvador. Geothermal training programme, Iceland.

ARTE, 2009. Staufen : une ville qui s'effrite. <http://www.arte.tv/fr/staufen-une-ville-s-effrite/1755842,CmC=2786544.htm>

- Bachmann CE, 2011. New approaches towards understanding and forecasting induced seismicity.
- Bachmann CE, Wiemer S, Wössner J, Hainzl S, 2011. Statistical analysis of the induced Basel 2006 earthquake sequence: introducing a probability-based monitoring approach for Enhanced Geothermal Systems. *Geophysical Journal International*, 186, 2, 793-807, DOI: 10.1111/j.1365-246X.2011.05068.x.
- Bachu, S. & Watson, T.L.. Review of failures for wells used for CO<sub>2</sub> and acid gas injection in Alberta, Canada. *Energy Proc.*, pp. 2531-3537, 2009.
- Baisch S, Carbon D, Dannwolf U, Delacou B, Devaux M, Dunand F, Jung R, Koller M, Martin C, Sartori M, Secanell R, Voros R, 2009. Deep Heat Mining Basel - Seismic Risk Analysis. SERIANEX Group, November 30<sup>th</sup>, 2009.
- Baisch S, Vörös R, 2010. Reservoir induced seismicity: where, when, why and how strong? *Proceedings of the World Geothermal Congress. 2010 Bali, Indonesia*, 25-29 April 2010.
- Bauer et al., 2015
- Baumgardner R.W. Jr., A.D. Hoadley, and A.G. Goldstein, 1982 : « Formation of the Wink Sink, a salt dissolution and collapse feature, Winkler County, Texas », Technical Report 114, Report of investigations, Bureau of Economic Geology, Austin, Texas, 1982.
- Baumgärtner J, Lerch C, 2013. Geothermal 2.0: The Insheim Geothermal Power Plant. The second generation of geothermal power plants in the Upper Rhine Graben. 3rd European Geothermal Review – Geothermal Energy for Power Production, June 24 – 26, 2013, Mainz, Germany: 9-10.
- Barras AV, 2015. Sinistres liés aux sondes géothermiques investigations géologiques. Journée CFGI « La géothermie de minime importance », BRGM, 21 mai 2015, [http://www.cfgi-geologie.fr/sites/default/files/seances/20150521/2-CFGI\\_g-thermie\\_BRGM\\_AVBarras\\_21mai2015.pdf](http://www.cfgi-geologie.fr/sites/default/files/seances/20150521/2-CFGI_g-thermie_BRGM_AVBarras_21mai2015.pdf)
- Berrizbeitia LD, 2014. Environmental impacts of geothermal energy generation and utilization. [geothermalcommunities.eu/assets/elearning/8.21.Berrizbeitia.pdf](http://geothermalcommunities.eu/assets/elearning/8.21.Berrizbeitia.pdf)
- Bertani R, 2015. Geothermal Power Generation in the World 2010-2014 Update Report, Proc. World Geothermal Congress, Melbourne, Australia, 2015.
- Bézèlgues-Courtade S, Durst P et al., 2012. Impacts potentiels de la géothermie très basse énergie sur le sol, le sous-sol et les aquifères – Synthèse bibliographique. Rapport final BRGM/RP-59837-FR. Février 2012.
- Bigot A, Lassoued M, 2011. La diversité des sources vibratoires : les vibrations liées aux engins de chantier. Colloque : Vibrations dans les bâtiments : sources, modes de propagation et techniques de réduction, Paris, 22-23 mars 2011.
- Bierlein L, 2013. Suisse: un forage géothermique provoque un séisme. <http://lci.tf1.fr/science/environnement/suisse-un-forage-geothermique-provoque-un-seisme-8153345.html>
- Boissavy C, Garroustet E, 2013. Incident de forage à Lochwiller (Bas-Rhin). Communiqué de presse, AFP-G-SFEG, Paris, 22 juillet 2013.
- Bonijoly D, Rigollet C, Serrano O, 2010. Caractérisation des réservoirs carbonatés du bassin de Paris pour l'exploitation des hydrocarbures, le stockage de CO<sub>2</sub> et la géothermie. Journées Annuelles des Hydrocarbures 2010, Pétrole & Gaz dans le bouquet énergétique futur, Atelier 6 : Réservoirs carbonatés - Caractérisation et production - grands enjeux (Brésil, Middle East), Paris, 13-14 octobre 2010.

- Bottai A, Cigni U, 1985. Completion techniques in deep geothermal drilling. *Geothermics*, Vol. 14, No. 2/3 : 309-314.
- Boxall B, 2013. Geothermal plants trigger small quakes near San Andreas fault. [articles.latimes.com/2013/jul/11/local/la-me-geothermal-earthquakes-20130712](http://articles.latimes.com/2013/jul/11/local/la-me-geothermal-earthquakes-20130712)
- Brace G, Moureau M, Sevadjan G, 2011. Dictionnaire Du forage et des puits. Anglais-Français, Français-Anglais. Editions Technip, 2011.
- Breede K, Dzebisashvili K, Liu X, Falcone G, 2013. A systematic review of enhanced (or engineered) geothermal systems: past, present and future. *Geothermal Energy*, 2013, doi 10.1186/2195-9706-1-4
- Brodsky EE, Lajoie LJ, 2013. Anthropogenic Seismicity Rates and Operational Parameters at the Salton Sea Geothermal Field. *Science Mag.*, 29/07/2013.
- Bromley CJ, 2009. Groundwater changes in the Wairakei-Tauhara geothermal system. *Geothermics* 38: 134-144.
- Brown DW, Duchane DV, Heiken G, Hrisco VT, 2012. Mining the Earth's Heat: Hot Dry Rock Geothermal Energy. Springer-Verlag, 658 p., doi 10.1007/978-3-540-68910-2.
- BRGM, 2005. Géothermie très basse et basse énergie : Une énergie du développement durable. Les enjeux des Géosciences, Fiche de synthèse scientifique, n°10, avril 2005, 5 p.
- BRGM, 2013. La terre, source d'énergies durables. *Géosciences*, n°16, mars 2013, 116 p.
- Brüstle A, Vasterling M, Richter T, Schmidt B, Wegler U, 2015. Detection and location of induced earthquakes at the Landau and Insheim geothermal reservoirs, SW Germany. 1<sup>st</sup> Schatzalp Workshop on Induced Seismicity, Davos, Switzerland, 10-13 March 2015.
- Buache P, 2013. Avenches. Géothermie de Landau et de Insheim en Allemagne. [http://www.geo-energie.ch/fr/projekte/Landau-Insheim\\_Buache\\_130225.pdf](http://www.geo-energie.ch/fr/projekte/Landau-Insheim_Buache_130225.pdf)
- 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.
- Carton A, 2015. Plan de prévention du risque naturel de « mouvements de terrain », commune de Hilsprich. Note de présentation, 41 p. [http://mc.moselle.gouv.fr/data/doc-273/20150505/218187\\_1.pdf](http://mc.moselle.gouv.fr/data/doc-273/20150505/218187_1.pdf)
- Charléty J, Cuenot N, Dorbath L, Dorbath C, Haessler H, Frogneux M, 2007. Large earthquakes during hydraulic stimulations at the geothermal site of Soultz-sous-Forêts. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 44 (2007) : 1091–1105.
- Chauvet A, 2014. Kenya : sous les sabots des girafes, de l'énergie à exploiter. *Planète*, <http://www.20minutes.fr/planete/1493179-20141202-kenya-sous-sabots-girafes-energie-exploiter>
- Chavot, P. 2016. Des projets de haute énergie en milieu urbain ? Journées de la Géothermie 2016, Strasbourg.

Chevallier B, 2015. La transition énergétique pour la croissance verte : les énergies renouvelables dans le mix énergétique français. Pétrole & Gaz Informations, 1836, mai/juin 2015, 55-58.

Chillou A, Riou M, 2011. Best Practice Case Study: "Geothermal pilot at Soultz-sous-forêt", Alsace, France". Projet RETS (Renewable Energies Transfer System). [http://www.rets-project.eu/UserFiles/File/pdf/Best%20practices/ADEC/BP\\_SOULTZ\\_EN\\_v2.pdf](http://www.rets-project.eu/UserFiles/File/pdf/Best%20practices/ADEC/BP_SOULTZ_EN_v2.pdf)

Clark CE, Harto CB, Sullivan JL, Wang MQ (2011). Water use in the development and operation of geothermal power plants. Argonne National Laboratory, Report ANL/EVS/R-10/05, September 2010.

Convertito V, Zollo A, Sharma N, Orefice A, Emolo A, 2015. Earthquake source parameters and scaling relationships at The Geysers geothermal field, California 1<sup>st</sup> Schatzalp Workshop on Induced Seismicity, Davos, Switzerland, 10-13 March 2015 (poster).

Cordon E, Driscoll JP, 2008. Full life-cycle water requirements for deep geothermal energy developments in South Australia.

Cuenot N, 2012. Impacts environnementaux et géothermie profonde sur le site de Soultz-sous-Forêts. In : Séminaire transrhénan « la géothermie profonde ». Strasbourg - Kehl, 24 mai 2012, SPPPI, Note de synthèse : 4-5.

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

Cuenot N, Genter A, 2013. Le projet franco-allemand de géothermie profonde de Soultz-sous-Forêts. Colloque « Sobriété et efficacité énergétiques. Conditions nécessaires à la transition énergétique, 10<sup>e</sup> édition, Belfort, 28 novembre 2013.

De Simone S, Carrera J, Vilarrasa V, 2015. On the role of processes interaction in the triggering of post-injection seismicity in Enhanced Geothermal Systems. 1<sup>st</sup> Schatzalp Workshop on Induced Seismicity, Davos, Switzerland, 10-13 March 2015.

DGEC, 2015. Panorama Energies-Climat. Direction générale de l'énergie et du climat - Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie, édition 2015.

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.

Doherr D, 2012. Structure géologique et sismicité de la région du Rhin Supérieur. In : Séminaire transrhénan « la géothermie profonde ». Strasbourg - Kehl, 24 mai 2012, SPPPI, Note de synthèse : 6.

Dorbath L, Cuenot N, Genter A, Frogneux M, 2009. Seismic response of the fractured and faulted granite of Soultz-sous-Forêts (France) to 5 km deep massive water injections. Geophys J Int (2009) 177 (2): 653-675, DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04030.x>

Dorbath L, Charléty J, 2006. Microseismicity developments during hydraulic stimulations at Soultz-sous-Forêts. ENGINE – ENhanced Geothermal Innovative Network for Europe, Launching Conf., Orléans 12-15 February 2006, France: 57.

DRET, 2011. A guide to leading practice sustainable development in mining. Department of Resources, Energy and Tourism, Australian Government, <http://www.industry.gov.au/resource/Documents/LPSDP/guideLPSD.pdf>

Durand-Delga M, Pandeli E, Bertini G, 2001. Le champ géothermique de Larderello (Toscane, Italie) : situation géologique, utilisations industrielles, rôle de la famille de Larderel. *Géologie Alpine*, 2001, t. 77 : 9-21.

Durst P, 2014. Risques liés à la présence d'ouvrage souterrains non soumis à déclaration – Apport d'expérience de la géothermie de minime importance. Présentation orale du 20 mai 2014.

Durst P, Ayache B, Saltel M, Abou Akar A, 2011. Outil d'aide à la décision en matière de géothermie très basse et basse énergie en région Aquitaine. Atlas du potentiel géothermique de aquifères. Rapport final. Rapport BRGM/RP-59761-FR, mars 2011, 175 p.

Eberhart-Phillips D, Oppenheimer DH, 1984. Induced Seismicity in The Geysers Geothermal Area, California. *Journal of Geophysical Research*, 89/B2: 1191-1207.

ECOGI, 2012. Inauguration du 1<sup>er</sup> forage de la centrale géothermique de Rittershoffen. Dossier de presse, projet ECOGI.

ECOREM, 2011. Etude des obstacles à la géothermie profonde (basse et haute énergie). Rapport B01/2165.01.001, Direction Générale Opérationnelle de l'Aménagement du territoire, du Logement, du Patrimoine et de l'Energie (DGATLP), Département de l'Energie, Belgique, août 2011.

EGEC (2015). Market report 2015. Preview. European Geothermal Energy Council, 5th Edition, April 2016.

Eggeling L, Genter A, Kölbl T, Münch W, 2013. Impact of natural radionuclides on geothermal exploitation in the Upper Rhine Graben. *Geothermics* 47 (2013) 80–88.

ENERGIE MEAUX, 2013. La géothermie à Meaux : une nouvelle phase de développement. Forum de l'énergie, 26-27 avril 2013, Meaux.

ENS-Lyon, 2016. La géothermie : chaleur de la Terre. [http://accs.ens-lyon.fr/eedd/climat/dossiers/energie\\_demain/geothermie/geothermie.pdf](http://accs.ens-lyon.fr/eedd/climat/dossiers/energie_demain/geothermie/geothermie.pdf)

Ercket G, 2015. Lochwiller- Affaire des maisons fissurées : Agir, et vite. Dernières nouvelles d'Alsace, 2/07/2015.

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](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](http://articles.latimes.com/1991-06-15/news/mn-503_1_puna-geothermal-venture)

Evans KF, Zappone A, Kraft T, Deichmann N, Moia F, 2012. A survey of the induced seismic responses to fluid injection in geothermal and CO2 reservoirs in Europe. *Geothermics* 41 (2012): 30-54.

Eysteinnsson H, 2000. Elevation and gravity changes at geothermal fields on the Reykjanes peninsula, SW Iceland. Proceedings World Geothermal Congress 2000, Kyushu - Tohoku, Japan, May 28 - June 10, 2000.

Fabre J, 2010. Arrêté portant prescriptions techniques et suspension des activités de production d'électricité à partir de fluide géothermique sur le territoire de la commune de bouillante par la société géothermie bouillante. AP du 22 février 2010.

Faessler J, 2014. Les réalisations de géothermie profonde peinent à émerger. <http://www.letemps.ch/economie/2014/03/13/realisations-geothermie-profonde-peinent-emerger>

Fedeli M, Mannari M, Sansone F, 2016. BAGNORE 4 : a benchmark for geothermal power plant environmental compliance. European Geothermal Congress, Strasbourg, 19-24 Sept. 2016.

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

Fonroche, 2014. F.A.Q. Géothermie profonde. Brochure, 32 pages.

Gadis N, 2014. Hydrogen Sulfide Release at Puna Geothermal.

<http://bigislandnow.com/2014/08/07/uncontrolled-hydrogen-sulfide-release-at-puna-geothermal/>

Galín R, 2000. Les forages profonds : un autre après-mine ? Annales des Mines, Mai 2000, 41-46.

Gáspár E, Ördögh J, Mácsai I, 2016. Effects of the long-term thermal water utilizations on the aquifer in SE-Hungary. European Geothermal Congress, Strasbourg, 19-24 Sept. 2016.

Gayraud M, 2008. Le thermalisme antique dans la Gaule du centre. Académie des Sciences et Lettres de Montpellier, Conférence n°4037, Bull. 2008 : 491-497.

Genter A, Guillou-Frottier L, Breton JP, Denis L, Dezayes C, Egal E, Feybesse JL, Goyeneche O, Nicol N, Quesnel F, Quinquis JP, Roig JY, Schwartz S, 2004. Typologie des systèmes géothermiques HDR/HFR en Europe. Rapport final. BRGM/RP-53452-FR, 165 p.

Genter A, Guillou-Frottier L, Feybesse JL, Nicol N, Dezayes C, Schwartz S, 2003. Typology of potential Hot Fractured Rock resources in Europe. Geothermics 32 (2003) : 701–710.

Gentier S, 2013. Les EGS : une méthode d'exploitation géothermique généralisée pour les températures de 130 à 180 °C. Geosciences, 2013 : 54-63.

Geo-Energie Suisse, 2014. Synthèse des études relatives à la sismicité induite. Projet pilote de géothermie profonde Haute-Sorne. Rapport Géo-Energie Suisse, 25 avril 2014.

Giardini D, 2009. Geothermal quake risk must be faced. nature 462, 848-849 (17 December 2009), doi : 10.1038/462848a ; published online 16 december 2009.

Gniese C, Bombach P, Rakoczy J, Hoth N, Schlömann M, Richnow HH, Krüger M, 2014. Relevance of deep-subsurface microbiology for underground gas storage

and geothermal energy production. *Adv Biochem Eng Biotechnol* (2014) 142: 95-121, DOI: 10.1007/10\_2013\_257

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, Thoraval A, 2010. Etat des connaissances sur les risques liés au stockage géologique du CO<sub>2</sub>. Rapport n°1 : les risques en phase d'injection. Rapport INERIS DRS-08-95145-11842B, 19/03/2010.

Goyénèche, O., Bugarel, F., Guttierrez, A., Hervé, J.Y. 2015. Retour d'expérience sur les forages géothermiques profonds. Phase 1. Rapport BRGM/RP-65443-FR, décembre 2015.

Groos J, Zeiß J, Grund M, Ritter J, 2013. Microseismicity at two geothermal power plants at Landau and Insheim in the Upper Rhine Graben, Germany. *EGU General Assembly 2013*, 7-12 April, 2013, Vienna, Austria.

Halldorsson B, Ólafsson S, Snæbjörnsson JT, Sigurðsson SU, Rupakhety R, Sigbjörnsson R, 2012. On the Effects of Induced Earthquakes due to Fluid Injection at Hellisheidi Geothermal Power Plant, Iceland. *15<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, September 24 to September 28, 2012.

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

Heimlich C, Gourmelen N, Masson F, Schmittbuhl J, Kim S, Azzola J, 2015. Uplift around the geothermal power plant of Landau (Germany) as observed by InSAR monitoring. *Springler Journal. Geothermal Energy* 2015, 3: 2, DOI: 10.1186/s40517-014-0024-y.

Heimlich C, Masson F, Schmittbuhl J, Ferhat G, 2016. Geodetic measurements for geothermal site monitoring at Soultz-sous-Forêts and Rittershoffen deep geothermal sites. *European Geothermal Congress*, Strasbourg, 19-24 Sept. 2016.

Hervé JY, 2009. Etat de l'art relatif à la conception et à la mise en œuvre des forages géothermiques au Dogger. rapport final. BRGM/RP-57245-FR, octobre 2009.

Herzberger P, Münch W, Kölbl T, Bruchmann U, Schlagermann P, Hötzl H, Wolf L, Rettenmaier D, Steger H, Zorn R, Seibt P, Möllmann GU, Sauter M, Ghergut J, Ptak T, 2010. The Geothermal Power Plant Bruchsal. *Proceedings World Geothermal Congress 2010 Bali, Indonesia*, 25-29 April 2010.

Hirschberg S, Wiemer S, Burgherr P et al., 2015. *Energy from the Earth. Deep Geothermal as a Resource for the Future?* Hirschberg S, Wiemer S and Burgherr P eds., vdf Hochschulverlag 2015.

Holm A, Jennejohn D, Blodgett L, 2012. *Geothermal Energy and Greenhouse Gas Emissions*. Geothermal Energy Association (GEA), November 2012.

Humphreys B, 2014. *Habanero Geothermal Project Field Development Plan*. Geodynamics Ltd., Document COM-FN-OT-PLN-01166, 9 October 2014.

Jaud P, Lamethe D, 1985. Les installations géothermiques de Bouillante. *La Houille Blanche*, n°3/4 : 347-352.

Jazé-Charvolin MR, 2014. Les stations thermales : de l'abandon à la renaissance. Une brève histoire du thermalisme en France depuis l'Antiquité. In *Situ* [En ligne], 24 | 2014, <http://insitu.revues.org/11123>, DOI : 10.4000/insitu.11123.

Johnson K.S., 1987 : « Development of the Wink Sink in west Texas due to salt dissolution and collapse », In Beck and Wilson, editors, Proc. 2nd Multidisciplinary Conference on Sinkholes, pages 81-92, 1987.

Johnson K.S., 2001 : « Sinkholes associated with petroleum boreholes drilled through salt deposits in the USA », In Proc. S.M.R.I. Fall Meeting , Albuquerque, pages 8-17, 2001.

Johnson KS, Collins EW, Seni SJ, 2003. Sinkholes and land subsidence owing to salt dissolution near Wink, West Texas, and other sites in western Texas and New Mexico: in Johnson KS and Neal JT, editors, Evaporite karst and engineering/environmental problems in the United States: Oklahoma Geological Survey Circular 109: 183-195.

Jung R, Schindler M, Nami P, Tischner T, 201. et al, 2010. Determination of flow exits in the Soultz borehole GPK2 by using the brine displacement method. C. R. Geoscience 342 (2010) : 636–643.

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.

Kagel et al. (2007) A guide to geothermal energy and the environment, Geothermal Energy Association, Washington, DC.

Khon, 2014. Alert issued after uncontrolled emissions reported at Puna Geothermal. <http://khon2.com/2014/08/07/alert-issued-after-uncontrolled-emissions-reported-at-puna-geothermal/>

Kreuter H, Deep Geothermal Projects in Germany. Status and Future Development. GeoThermal Engineering, Paris, 04.05.2011.

Kulish N, Glanz J, 2009. German geothermal project leads to second thoughts after the earth rumbles. The New York Times Company, Sep. 10, 2009.

Kuperkoch L, 2014. Working towards Highly Accurate Microseismic Event Locations at Insheim Geothermal Site (Pfalz/Germany).1<sup>st</sup> Bochum Workshop on Geothermal Reservoir Monitoring and Characterization, September 3rd 2014.

Lahaie F, 2015a. Les enseignements de l'accidentologie liée à l'exploration et l'exploitation des hydrocarbures. Rapport INERIS DRS-15-149641-02735A, 07/05/2015.

Lahaie F, 2015b. Contexte et aspects fondamentaux du forage et de l'exploitation des puits d'hydrocarbures. Rapport INERIS DRS-15-149641-01420A, 06/05/2015.

Lafortune S, 2016. Analyse des risques liés à la reconversion des ouvrages profonds en puits géothermiques. Rapport INERIS DRS-16-141899-07943A, 11/10/2016.

Larochelambert (De) T, 2013. Géothermie profonde versus gaz de schiste. <http://tdelarochelambert.blog.lemonde.fr/2013/08/07/geothermie-profonde-versus-gaz-de-schiste/>

Leibel D, 2016, Les clés de succès du projet de la Centrale de Géothermie de Ritterschoffen, Journées de la Géothermie, 20-22 septembre 2016, Strasbourg.

Libération, 2013. Un village alsacien craint de devenir inhabitable à cause d'un forage géothermique. Article paru dans Libération le 5 juillet 2013,

- Lund J W, Boyd T, 2015. Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review, Proc. World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, 19-25 april 2015.
- Lopez S, Millot R, 2008. Problématique de réinjection des fluides géothermiques dans un réservoir argilo-gréseux : retour d'expériences et apport de l'étude des fluides du Trias du bassin de Paris. rapport BRGM/RP-56630-FR.
- Majer E, Baria R, Stark M, Smith B, Oates S, Bommer J, Asanuma H, 2007. Induced seismicity associated with Enhanced Geothermal Systems. *Geothermics* 36 (2007): 185-222.
- Marchand M, Blanc I, Marquand A, Beylot A, Bezelgues-Courtade S, Traineau H, 2015. Life Cycle Assessment of High Temperature Geothermal Energy Systems. Edited by Roland Horne and Toni Boyd. World Geothermal Congress 2015, Apr 2015, Melbourne, Australia. Proc. World Geothermal Congress 2015: 11.
- Maréchal JC, Lopez S, Petit V, 2008. Etude bibliographique sur la réinjection de fluide géothermal dans un champ à haute enthalpie – Application à Bouillante. Rapport BRGM/RP-54861-FR, mai 2008.
- Martínez-Garzón P, Kwiatek G, Sone H, Bohnhoff M, Dresen G, Hartline C, 2015. Short-term seismicity changes at The Geysers geothermal field with different injection volumes. 1<sup>st</sup> Schatzalp Workshop on Induced Seismicity, Davos, Switzerland, 10-13 March 2015 (poster).
- Mauguit Q, 2013. La géothermie fait trembler la terre près de la mer de Salton. *Futura Planète*, 15/07/2013.
- Maurer V, Lehujeur M, Richard A, Vergne J, 2016. Ground vibrations caused by geothermal drilling operations : a case study from the Rittershoffen EGS project (Alsace, France). European Geothermal Congress, Strasbourg, 19-24 Sept. 2016.
- Mazoyer A, 1999. L'homme et le volcanisme en Toscane : la géothermie. In: Bull. Assoc. Géogr. Franç., 76<sup>e</sup> année, 1999-4 : 341-347; doi : 10.3406/bagf.1999.2126.
- McMahon A, Baisch S, 2013. Case study of the seismicity associated with the stimulation of the enhanced geothermal system at Habanero, Australia. Proc. Australian Geothermal Energy Conf. 2013 Brisbane, Australia, 14-15 Nov. 2013.
- McGuire JJ, Lohman RB, Catchings RD, Rymer MJ, Goldman MR, 2015. Relationships among seismic velocity, metamorphism, and seismic and aseismic fault slip in the Salton Sea Geothermal Field region. *Journal of geophysical research*, Volume 120, Issue 4, April 2015: 2600–2615.
- MEDDE, 2015. Guide d'élaboration de la carte des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance. Juillet 2015, 83 p., [http://www.geothermie-perspectives.fr/sites/default/files/guideelaboration\\_v4.pdf](http://www.geothermie-perspectives.fr/sites/default/files/guideelaboration_v4.pdf)
- Mendrinós D, Karytsas C, 2006. The environmental impact of the geothermal industry. From Ledru P. & Genter A. (eds.) 2006, in Actes/Proceedings of the Engine Launching Conference, 12-15 February 2006, Orléans, France. ISBN 978-2-7159-0978-6. Orleans, BRGM Editions. Collection Actes/Proceedings. ISSN 1773-6161.
- Meier P, Zingg O, 2014. Rapport technique. Projet pilote de géothermie profonde Haute-Sorne. Geo-Energie Suisse, Version 4, 15 octobre 2014.

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

Milsch H, Seibt A, Spangenberg E, 2009. Long-term Petrophysical Investigations on Geothermal Reservoir Rocks at Simulated InSitu Conditions. *Transp Porous Med* (2009) 77:59-78, DOI 10.1007/s11242-008-9261-5.

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.

Moran MS, 1979. The Impacts of deep geothermal fluid production on shallow ground-water systems. Oak Ridge Nat. Lab., U.S. Dep. of Energy, Nov. 1979.

Morisseau J.M., 2000 : « Uncontrolled leaching of salt layer in an oil field in Algeria », In Proc. S.M.R.I. Fall Meeting Technical Session, San Antonio, pages 330-333, 2000.

Mossop A, Murray M, Owen S, Segall P, 1997. Subsidence at The Geysers geothermal field: results and simple models. *Proc. 22<sup>nd</sup> Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford Univ., California, January 27-29, 1997: 377-382.*

NAS, 2013. *Induced Seismicity Potential in Energy Technologies*. National Academy of Sciences, Washington, USA, ISBN 13: 978-0-309-25367-3.

Nishijima J, Fujimitsu Y, Ehara S, Kouno E, Yamauchi M, 2005. Micro-Gravity Monitoring and Repeated GPS Survey at Hatchobaru Geothermal Field, Central Kyushu, Japan. *Proceedings World Geothermal Congress 2005 Antalya, Turkey, 24-29 April 2005.*

Norbeck JH, Horne RN, 2015. Earthquake rupture behavior in EGS settings. 1<sup>st</sup> Schatzalp Workshop on Induced Seismicity, Davos, Switzerland, 10-13 March 2015 (poster).

Oppliger G, Coolbaugh M, Shevenell L, 2006. Improved Visualization of Satellite Radar InSAR Observed Structural Controls at Producing Geothermal Fields Using Modeled Horizontal Surface Displacements. *GRC Transactions* 30: 927-930.

PIPAME, 2016. Enjeux et perspectives des filières industrielles de la valorisation énergétique du sous-sol profond. Rapport final. Pôle Interministériel de Prospective et d'Anticipation des Mutations économiques, ISSN : 2491-0058.

PPE, 2016. Programmation Pluriannuelle de l'Energie, Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer, <http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/PPE-complet-1.pdf>.

Radeckas B, Lukosevicius V, 2000. Klaipeda geothermal demonstration project. *Proceedings World Geothermal Congress 2000, Kyushu - Tohoku, Japan, May 28 - June 10, 2000: 3547-3550.*

Reith S, Kölbel T, Schlagermann P, Pellizzone A, Allansdottir A, 2013. Public acceptance of geothermal electricity production. *GEOELEC*, deliverable n°4.4, April 2013.

RETS, 2011. Best Practice Case Study: "Geothermal pilot at Soultz-sous-Forêt, Alsace, France". Information compiled in March 2011 by Marion Désissaire, ADEC, [www.adec.fr](http://www.adec.fr)

Richard A, Maurer V, Lejujeur M, 2016. Induced vibrations during a geothermal project and acceptability, how to avoid divorce? European Geothermal Congress, Strasbourg, 19-24 Sept. 2016.

Richter A, 2015. Tragedy hits geothermal site in Indonesia. Think geoenergy, 15/05/2015. <http://www.thinkgeoenergy.com/update-tragedy-hits-geothermal-site-in-indonesia/>

Rivas JA, Castellón JA, Maravilla JN, 2005. Seven Years of Reservoir Seismic Monitoring at Berlín Geothermal Field, Usulután, El Salvador. Proceedings World Geothermal Congress 2005 Antalya, Turkey, 24-29 April 2005.

Robert Z, 2014. Two Icelanders suffer hypoxia at Philippines Geothermal Sites. <http://icelandreview.com/news/2014/06/23/two-icelanders-suffer-hypoxia-philippines-geothermal-site>

ROMANDIE, 2013. CH/Géothermie: St-Gall poursuit son forage malgré le séisme de juillet. [http://www.romandie.com/news/n/CHGeothermie\\_St\\_Gall\\_poursuit\\_son\\_forage\\_malgre\\_le\\_seisme\\_de\\_juillet88270820131846.asp](http://www.romandie.com/news/n/CHGeothermie_St_Gall_poursuit_son_forage_malgre_le_seisme_de_juillet88270820131846.asp)

Rouquet, R. 2010. L'énergie géothermique, une réponse locale à un problème brûlant, rapport présenté au Conseil de l'Europe, mars 2010.

Sailhac P, Larnier H, Matthey PD, Schill E, Chambodut A, 2013. Testing geothermal monitoring using MT and SP at Rittershoffen 2nd European Geothermal Workshop, 24-25 oct. 2013, Strasbourg, 4 p.

Sanyal SK, Granados EE, Menzies AJ, 1995. Injection – related problems encountered in geothermal projects and their mitigation: the United States experience. In: Proceedings world geothermal congress, 1995, 2019-2022.

Seibt P, Kabus F, Hoth P, 2005. The Neustadt-Glewe Geothermal Power Plant – Practical experience in the reinjection of cooled thermal waters into sandstone aquifers. Proceedings of the World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, 24-29 April 2005.

Seibt P, Wolfgramm M, 2008. Practical experience in the reinjection of thermal waters into sandstone. Workshop for Decision Makers on Direct Heating Use of Geothermal Resources in Asia, organized by UNU-GTP, TBLRREM and TBGMED, in Tianjin, China, 11-18 May, 2008, 18 p.

Sewell SM, Cumming W, Bardsley CJ, Winick J, Quinao J, Wallis IC, Sherburn S, Bourguignon S, Bannister S, 2015. Interpretation of Microseismicity at the Rotokawa Geothermal Field, 2008 to 2012. Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, 19-25 April 2015.

Slavova I, 2013. Geothermal plant in germany's landau may be closed – report. Jun 19, 2013. <http://renewables.seenews.com/news/>

Sofyan Y, Daud Y, Nishijima J, Fujimitsu Y, Kamah Y, Yani A, Fukuda Y, Taniguchi M, 2015. The first repeated absolute gravity measurement for geothermal monitoring in The Kamojang Geothermal Field, Indonesia, Geothermics, 53, January 2015: 114-124.

SPPPI, 2012. La géothermie profonde. Note de synthèse du séminaire transrhénan, Strasbourg, 24 mai 2012.

Starkey N, 2014. Pumping water underground could trigger major earthquake, say scientists. The Guardian.

<https://www.theguardian.com/science/2013/jul/11/fracking-water-injection-major-earthquakes>

Stauffacher M, Muggli N, Scolobig A, Moser C, 2015. Framing deep geothermal energy in mass media: the case of Switzerland. *Technological Forecasting & Social Change* 98 (2015) 60-70.

Stephen T, 2013. Geothermal power facility induces earthquakes, study finds. Université de Californie, Santa Cruz. <http://news.ucsc.edu/2013/07/geothermal-earthquakes.html>

Strickland E, 2009. Geothermal explosion highlights a downside of a leading alt-energy source.

[http://blogs.discovermagazine.com/80beats/2009/04/28/geothermal-explosion-highlights-a-downside-of-a-leading-alt-energy-source/#.V\\_O9kvmLS70](http://blogs.discovermagazine.com/80beats/2009/04/28/geothermal-explosion-highlights-a-downside-of-a-leading-alt-energy-source/#.V_O9kvmLS70)

Therin F, 2010. Vent de folie sur la géothermie allemande. *Les Echos*, 17 mai 2010. [http://www.lesechos.fr/17/05/2010/LesEchos/20678-042-ECH\\_vent-de-folie-sur-la-geothermie-allemande.htm](http://www.lesechos.fr/17/05/2010/LesEchos/20678-042-ECH_vent-de-folie-sur-la-geothermie-allemande.htm)

Tribune De Geneve, 2013. Un forage géothermique provoque un petit séisme. <http://www.tdg.ch/suisse/Un-forage-geothermique-provoque-un-petit-seisme/story/22040751>

UCS, 2016. Environmental impacts of geothermal energy. Union of Concerned Scientists, 25/02/2016, [www.ucsusa.org/](http://www.ucsusa.org/)

Ungemach P, 2002. Energy development problematics in the Mediterranean. The Aeolian and Aegean islands. The geothermal energy case. Int. Workshop on the possibilities of geothermal development of the Aegean islands region, Milos, 5-8 September 2002.

UVED, 2011. La centrale géothermique de Bouillante (Guadeloupe). <http://unt.unice.fr/uvved/bouillante/cours/ii.-etude-de-cas-la-centrale-geothermique-de-bouillante-en-guadeloupe/2.-contexte-economique/2.2.-impact-sur-lenvironnement.html>

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.

Webb JW, Eddlemon GK, Reed AW, 1984. Retrospective examination of geothermal environmental assessments. Oak Ridge National laboratory report ORNL/TM-9071.

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

White SP, Creighton AL, Bixley PF, Kissling WM, 2003. Modelling the dewatering and depressurisation of the Lihir open pit gold mine. Proc. TOUGH Symposium, Lawrence Berkeley, National Laboratory, Berkeley, California, May 12-14, 2003.

Zang A, Oye V, Jousset P, Deichmann N, Gritto R, McGarr A, Majer E, Bruhn D, 2014. Analysis of induced seismicity in geothermal reservoirs - an overview. *Geothermics*, Vol. 52, October 2014: 6–21.

## 10. LISTE DES ANNEXES

<b>Repère</b>	<b>Désignation</b>	<b>Nombre de pages</b>
ANNEXE 1	Terminologie utilisée dans ce rapport	4 A4
ANNEXE 2	Cadre réglementaire d'un site de géothermie profonde	4 A4
ANNEXE 3	Base de données d'accidents	3 A4 + 2 A3
ANNEXE 4	Fiches détaillées d'accidents	14 A4



## ANNEXE 1

### TERMINOLOGIE UTILISEE DANS CE RAPPORT



### **Remarque liminaire :**

La terminologie utilisée dans ce rapport est basée sur la norme française NF X 10-999 (AFNOR, 2014) relative aux « forages d'eau et de géothermie ». Ainsi, le terme « forage » représente l'ouvrage réalisé et le terme « foration » l'action de forer. Notons que cette terminologie est différente de celle utilisée dans la réglementation pétrolière (Décret n°2016-1303 du 4 octobre 2016) où l'ouvrage réalisé est un « puits » et où le forage désigne l'action de forer.

**Acidification** : injection dans la formation d'un acide dilué dans de l'eau, de façon à nettoyer la zone périphérique du forage.

**Anhydrite** : roche évaporitique formée de sulfate de calcium anhydre susceptible de s'hydrater et de se transformer en gypse au contact prolongé de l'eau ; cette hydratation peut s'accompagner d'un gonflement de l'ordre de 60% et créer ainsi des dégâts en surface (soulèvement du sol, fissuration de bâtiments...).

**BOP** (« Blow Out Preventer » ou « Bloc d'Obturation de Puits ») : ensemble d'obturateurs qui ont pour fonction de mettre le forage en sécurité en cas de venue.

**Cuvelage** : revêtement intérieur du forage, destiné à en consolider les parois et à isoler entre elles, après cimentation, les couches géologiques qui le nécessitent.

**EGS** (« Enhanced Geothermal System » ou « Système Géothermique Amélioré ») : système géothermique où le développement du site repose sur des techniques visant à augmenter la perméabilité du milieu ; ceci peut être atteint par diverses approches, comme la stimulation thermique, la stimulation hydraulique et ou chimique, voire la fracturation hydraulique (qui n'est pas pratiquée en France).

**Eruption** (ou « *blowout* » en anglais) : sortie brutale et incontrôlée d'effluents (liquides ou gazeux) à partir d'un forage. Une éruption peut être aérienne (si la sortie des effluents s'opère en tête de puits) ou souterraine (si la sortie des effluents s'effectue dans des formations souterraines perméables).

**Forage** : ouvrage réalisé par foration et son équipement (d'après AFNOR, 2014).

**Foration** : action de forer un trou (d'après AFNOR, 2014).

**Fracturation hydraulique** : création de fractures nouvelles dans un massif rocheux profond par injection de fluide sous pression (d'après <http://labex-geothermie.unistra.fr/article205.html>).

**Gîte géothermique** : gîte renfermé dans le sein de la terre dont on peut extraire de l'énergie sous forme thermique, notamment par l'intermédiaire des eaux chaudes et des vapeurs souterraines qu'ils contiennent (article L112.1 du Code Minier) ; ces gîtes relèvent du régime légal des mines.

**HDR** (« *Hot Dry Rock* » ou « Roche chaude et sèche » aussi appelé HFR (« *Hot Fractured Rock* » ou « Roche chaude fracturée ») : concept de géothermie profonde visant à créer artificiellement un réservoir fracturé fermé dans un milieu géologique initialement chaud, peu perméable et sec pour y faire circuler un fluide introduit depuis la surface (d'après <http://labex-geothermie.unistra.fr/article205.html>).

**Hypocentre (ou foyer)** : point de départ d'une rupture sismique en profondeur ; sa projection en surface est l'épicentre.

**Impacts** : atteintes avérées aux biens (habitations, infrastructures, etc.), aux activités humaines (transport, etc.) ou à l'environnement (faune, flore, ressources en eau, etc.) résultant des activités menées sur le site géothermique ;

**Impacts accidentels** : Impacts liés à un événement non prévu ;

**Impacts chroniques** : Impacts liés aux activités courantes du site ;

**Microséisme** : séisme de faible magnitude (généralement inférieure à 2 ou 3), non ressenti par l'Homme mais enregistré par les instruments (Kagel et al., 2007). Voir également « sismicité induite ».

**MW<sub>e</sub>, MW<sub>th</sub>** : voir Watt.

**Nuisances** : gênes occasionnées aux personnes résultant des activités courantes (non-accidentelles) menées sur le site géothermique.

**Perte de circulation** : perte du fluide de forage dans la formation en cours de foration.

**Risques** : menaces sur la santé ou la sécurité des personnes (internes ou externes au site) résultant des activités menées sur le site géothermique ;

**Risques accidentels** : risques liés à un événement non prévu ;

**Risques chroniques** : risques liés aux activités courantes du site ;

**Sismicité induite** : génération de séismes liée à une activité anthropique. Dans le cas d'un site géothermique, on parle de « sismicité induite » lorsque les séismes sont créés au niveau du réservoir et de « sismicité déclenchée » lorsqu'il s'agit de l'activation de failles en dehors des limites du réservoir (ECOREM, 2011). Dans le présent document, le terme « sismicité induite » recouvre ces deux acceptions. Le seuil de perception des séismes en surface se situe autour d'une magnitude de 2. En deçà de ce seuil, on parle de microséismes.

**Stimulation chimique** : technique de rétablissement ou d'amélioration de la perméabilité naturelle de la formation autour du forage par injection de produit chimique, généralement acide (voir « acidification ») ; la pression d'injection doit être suffisante pour permettre la pénétration de l'eau dans la roche et, le cas échéant, la réouverture de fractures naturelles existantes, sans toutefois dépasser la pression de fracturation de la formation.

**Stimulation hydraulique** : technique de rétablissement ou d'amélioration de la perméabilité d'une fracture ou d'un réseau de fractures existant par l'action d'un fluide sous pression (d'après <http://labex-geothermie.unistra.fr/article205.html>) ; la pression d'injection doit être suffisante pour permettre la pénétration de l'eau dans la roche et, le cas échéant, la réouverture de fractures naturelles existantes, sans toutefois dépasser la pression de fracturation de la formation (contrairement à la fracturation hydraulique).

**Suffosion** (ou « suffusion ») : entraînement de particules fines (sablon, limon, argiles) au sein d'une formation aquifère grossière (galets, graviers, sables), susceptible de conduire à la création de vides souterrains et au tassement de la surface du sol.

**Traitement** : rétablissement ou amélioration de la perméabilité naturelle de la formation autour du forage par stimulation chimique ou hydraulique.

**Tubage** : ensemble de tubes (pleins ou crépinés) mis en place dans un forage (d'après AFNOR, 2014). Voir aussi « Cuvelage ».

**Venue** (ou « *kick* » en anglais) : Afflux non souhaité de fluides de formation dans le forage. Une venue non (ou mal) contrôlée peut aboutir à une « éruption ».

**Watt** : unité de puissance (W) dont les principaux multiples sont le kW ( $10^3$  W), le MW ( $10^6$  W), le GW ( $10^9$  W) et le TW ( $10^{21}$  W). Le « Watt thermique » ( $W_{th}$ ) et le « Watt électrique » ( $W_e$ ) correspondent respectivement à la puissance produite sous forme thermique et sous forme électrique. La plupart des centrales électriques tirant leur énergie de sources thermiques (centrale nucléaire, centrale à combustible fossile, centrale géothermique), leur puissance thermique est nettement supérieure à leur puissance électrique du fait des pertes liées à la transformation d'énergie (rendement de l'ordre de 10 % pour une centrale géothermique).



## ANNEXE 2

### CADRE REGLEMENTAIRE D'UN SITE DE GEOTHERMIE PROFONDE



## Principaux codes et textes applicables :

En droit français, la chaleur souterraine est assimilée à une substance minière qualifiée de « gîte géothermique ». Les activités nécessaires à la recherche et à l'exploitation de cette substance sont donc régies essentiellement par le code minier (article 112-1)<sup>39</sup> et ses textes d'application. On mentionnera notamment :

- le décret n°78-498 du 28 mars 1978 relatif aux titres de recherches et d'exploitation de géothermie ;
- le décret 2006-648 du 2 juin 2006 relatif aux titres miniers et aux titres de stockages souterrains.
- le décret n°2006-649 du 2 juin 2006 relatif aux travaux miniers, aux travaux de stockage souterrain et à la police des mines et des stockages souterrains ;
- le décret 2011-2019 du 29 décembre 2011 relatif à l'étude d'impact environnemental

Il est à noter que certaines installations de surface d'un site géothermique peuvent également être soumises à la réglementation ICPE<sup>40</sup> du code de l'Environnement.

Par ailleurs, les installations de production d'électricité sont visées par le code de l'Energie.

Enfin, à l'échelle européenne, les activités de géothermie sont encadrées par la Directive 2009/28/CE du 23 avril 2009.

## Classification juridique des sites géothermiques

Le code minier distingue trois catégories de gîtes géothermiques (article L112-2 du code minier et article 3 du décret 78-498) :

- les gîtes géothermiques à haute température, c'est-à-dire pour lesquels la température du fluide caloporteur, mesurée en surface au cours des essais du forage d'exploration est supérieure à 150°C ;
- les gîtes géothermiques à basse température, c'est-à-dire pour lesquels la température du fluide caloporteur, mesurée en surface au cours des essais du forage d'exploration est inférieure à 150°C ;
- les gîtes géothermiques à basse température dits de minime importance, dont les critères de définition sont précisés à l'article 3 du décret 78-498 et synthétisés dans le Tableau 2.1 ci-après.

De par ces définitions, on voit que les sites géothermiques destinés à l'alimentation de réseaux de chaleur relèvent systématiquement du régime de la basse température.

En revanche, les sites géothermiques destinés à la production d'électricité relèvent soit du régime de la haute température (lorsque la température du fluide en

---

<sup>39</sup> En dehors de certaines installations spécifiques tels que les puits canadiens, les géostructures thermiques ou les échangeurs thermiques dont la profondeur ne dépasse pas 10 m (article L112-1 du code minier et article 3 du décret 78-498)

<sup>40</sup> Installations classées pour la protection de l'environnement

sortie du forage est  $> 150^{\circ}\text{C}$ ), soit du régime de la basse température (lorsque la température du fluide en sortie du forage est  $< 150^{\circ}\text{C}$ ).

En fait, ce seuil de  $150^{\circ}\text{C}$  avait été initialement défini comme la limite en deçà de laquelle il n'est pas techniquement possible de produire de l'électricité. Or, on sait aujourd'hui que ce seuil n'est plus adapté aux technologies actuelles, qui permettent de produire de l'électricité à partir de températures de fluides plus basses (de l'ordre de  $120^{\circ}\text{C}$  voire moins). Il est prévu que ce seuil soit revu dans les prochaines mises à jour de la réglementation.

Haute T°	Basse T°	Basse T° de minime importance	
		Echangeurs géothermiques fermés	Echangeurs géothermiques ouverts
T° du fluide $>150^{\circ}\text{C}$ en surface	T° du fluide $<150^{\circ}\text{C}$ en surface	Profondeur du forage $< 200$ m Puissance thermique maximale $< 500$ kW	Profondeur du forage $< 200$ m Puissance thermique maximale $< 500$ kW T° de l'eau prélevée $< 25^{\circ}\text{C}$ Eaux prélevées rejetées dans le même aquifère et différence entre volumes d'eaux prélevés et réinjectés = 0 Débits prélevés ou réinjectés $<$ au seuil d'autorisation fixé à la rubrique 5.1.1.0 de l'article R.214-1 du CE
		Situés en dehors des zones rouges, où les activités géothermiques présentent des dangers ou inconvénients graves, définies à l'article 22-6 du décret 2006-649	

Tableau 2.1 - Critères de définition des trois régimes juridiques des gîtes géothermiques

## **Etapes juridique de la vie d'un site de géothermie profonde**

Sur le plan juridique, un projet de géothermie profonde comporte principalement deux phases, qui donnent lieu chacune à la délivrance d'un titre minier :

- la phase de recherche, qui recouvre les travaux de prospection, d'exploration et d'essais. Ces travaux sont réalisés :
  - pour le cas d'un gîte à haute température : dans le cadre d'un permis exclusif de recherches ou PER (délivré par arrêté ministériel) ;
  - pour le cas d'un gîte à basse température : dans le cadre d'une autorisation de recherche (délivrée par arrêté préfectoral).
- la phase d'exploitation, qui recouvre les travaux d'exploitation et de fermeture du site. Ces travaux sont réalisés :
  - pour le cas d'un gîte à haute température : dans le cadre d'une concession (accordée par décret en Conseil d'Etat) ;
  - pour le cas d'un gîte à basse température : dans le cadre d'un permis d'exploitation (délivré par arrêté préfectoral).

Les procédures relatives à l'octroi de ces titres miniers sont décrites :

- pour le cas d'un gîte à haute température : dans le décret 2006-64841 ;
- pour le cas d'un gîte à basse température : dans le décret 78-49842.

## **Demandes d'autorisation d'ouverture de travaux**

A l'intérieur d'un titre minier, l'exploitant peut entreprendre des travaux à condition de déposer au préalable auprès du préfet compétent une demande d'autorisation d'ouverture de travaux miniers (AOTM). Il s'agit d'un dossier comprenant notamment (article 6 du décret 2006-649) :

- un mémoire descriptif des travaux envisagés ;
- une étude d'impact ;
- un document indiquant les mesures prévues pour préserver la santé et la sécurité des travailleurs ;
- un document indiquant les conditions d'arrêt des travaux ;
- un document indiquant les incidences des travaux sur la ressource en eau.

Après avis des services administratifs concernés et enquête publique, l'autorisation d'effectuer les travaux est délivrée par arrêté préfectoral. Cet arrêté précise notamment les prescriptions auxquelles l'exploitant devra se tenir en matière de sécurité publique et de préservation de l'environnement.

---

<sup>41</sup> Décret 2006-648 du 2 juin 2006 relatif aux titres miniers et aux titres de stockages souterrains.

<sup>42</sup> Décret 78-498 du 28 mars 1978 relatif aux titres de recherches et d'exploitation de géothermie, modifié par le décret 2015-15 du 8 janvier 2015.



## ANNEXE 3

### BASE DE DONNÉES D'ACCIDENTS



Le tableau d'accidents/incidents comporte 32 champs d'information :

- 1 champ pour le référencement de l'événement :
  - Identifiant
- 5 champs pour décrire le contexte de l'événement :
  - Date
  - Type d'activité concernée
  - Pays
  - Lieu
  - Informations complémentaires
- 8 champs pour décrire les circonstances et la nature de l'événement :
  - Unité fonctionnelle concernée
  - Phase d'opération
  - Évènement redouté (ER)
  - Évènement initiateur (EI) ou barrière inopérante
  - Détail de l'évènement initiateur (EI) ou de la barrière inopérante
  - Substances relâchées
  - Quantité correspondante
  - Informations complémentaires
- 5 champs pour détailler les causes de l'événement :
  - Causes liées aux équipements
  - Causes externes
  - Causes humaines
  - Causes organisationnelles
  - Informations complémentaires
- 4 champs pour reporter le ou les phénomène(s) généré(s) par l'événement :
  - Phénomène dangereux (PhD) ou phénomène impactant (PhI) généré
  - Milieu de rejet
  - Type d'accident de personne (le cas échéant)
  - Informations complémentaires
- 8 champs dédiés aux conséquences de l'événement :
  - Nombre de morts
  - Nombre de blessés
  - Dont blessés graves
  - Autres conséquences humaines ou socioéconomiques
  - Quantité correspondante (coût en euros du dédommagement, nombre de bâtiments détruits, etc.)
  - Conséquences environnementales
  - Quantité correspondante (surface polluée en m<sup>2</sup>, nombre d'espèces menacées, etc.)
  - Informations complémentaires
- 1 champ pour indiquer les sources utilisées

Certains termes présents dans les cases du tableau sont explicités dans le glossaire en ANNEXE. 1. Précisons en outre deux symboles :

- « - » : signifie **non précisé**, c'est-à-dire :
  - que les sources disponibles ne donnent pas l'information ;
  - que certaines sources donnent une information qui n'a pas pu être vérifiée ;
- « x » signifie sans objet, c'est à dire que l'information demandée par le champ est inappropriée compte tenu de l'accident considéré (par exemple le champ « substance relâchée » ne peut pas être rempli dans le cas d'un évènement de type « séisme induit »).

REFERENCE	CONTEXTE DE L'EVENEMENT					CIRCONSTANCES ET NATURE DE L'EVENEMENT								CAUSES					PHENOMENES GENERES				CONSEQUENCES						SOURCES			
Identifiant	Date	Type d'activité	Pays	Lieu	Infos complémentaires	Unité fonctionnelle concernée	Phase d'opération	Evènement redouté	Evènement initiateur (EI) ou barrière inopérante	Détails de l'EI1 ou de la barrière inopérante	Substances relâchées	Quantité	Infos complémentaires	Causes liées aux équipements	Causes externes	Causes humaines	Causes organisationnelles	Infos complémentaires	PhD ou Phi	Milieu de rejet	Type d'accident individuel	Infos complémentaires	Nb morts	Nb blessés	Dont graves	Autres conséquences humaines ou socioéconomiques	Qté	Conséquences environnementales	Qté	Infos complémentaires	Sources	
Agua Shuca	13/10/1990	Géothermie profonde	Salvador	Sud Ouest de Ahuachapan	Zone géothermale étendue	-	-	Eruption	-	-	Fluide géothermal boue roches	1600 m3	-	-	-	-	-	-	La cause n'est pas définie de manière exacte : il semble qu'une modification brutale des flux de chaleur de la zone géothermale ait provoqué une montée en pression incontrôlée du réservoir.	Explosion Projection	Sol	x	Cratère de 40 m de diamètre et 5 m de profondeur	25	35	-	bâtiments détruits	x	-	-	-	Escobar Bruno et al., 1992 Goff & Goff, 1997
Ahuachapan 1	été 1994	Géothermie profonde	Salvador	Ahuachapan	-	Circuit primaire	Exploitation	Fuite en surface	-	-	Fluide géothermal	-	Comme la réinjection des eaux était impossible, un canal de rejet des eaux de 82 km a été construit entre la centrale géothermique et l'océan.	-	-	-	-	-	Rejet toxique Rejet écotoxique	Sol Rivière	x	El Rio San Rafael pollué	plusieurs	plusieurs	-	-	Pollution importante	-	-	-	Goff & Goff, 1997	
Ahuachapan 2	année 1994	Géothermie profonde	Salvador	Ahuachapan	-	Circuit primaire	Exploitation	x	x	x	x	x	La mauvaise protection du canal de rejet a entraîné la chute d'animaux et de personnes dans le canal.	-	-	Erreur de conception	-	-	x	x	Chute accidentelle	Canal non protégé : brûlures, chute mortelle d'animaux, de personnes	plusieurs	plusieurs	-	-	-	-	-	-	Goff & Goff, 1997	
Bâle	08/12/2006	Géothermie profonde	Suisse	Bâle	Réservoir à 5000 m de profondeur	Réservoir	Stimulation hydraulique	Séisme	Pression de fluide excessive	-	x	x	-	x	x	Erreur de conception	x	Mauvaise connaissance du réservoir ou mauvaise planification des paliers d'injection	Secousses ressenties	x	x	11 000 évènements enregistrés dont 900 au dessus de la magnitude 0,9 et un maximum de 3,3	x	x	x	Dommages aux habitations (fissures) Abandon définitif du projet	9 millions de dollars de dédommagement	x	x	-	Baisch et al., 2009 Bachman, 2011 Giardini, 2009 Haring et al., 2008	
Berlin 1	1993-1994	Géothermie profonde	Salvador	Usulután	7 puits d'injection et 10 puits de production 700 à 2500 m de profondeur 183°C	Puits	Exploitation	Fuite en surface	Rupture de couvlage	-	Fluide géothermal	-	-	x	Mouvement de terrain	x	-	Zone de glissement de terrain	Emission gazeuse	-	-	-	x	x	x	-	-	-	-	-	Goff & Goff, 1997 Arévalo, 1998	
Berlin 2	16/09/2003	Géothermie profonde	Salvador	Usulután	8 puits d'injection et 10 puits de production 700 à 2500 m de profondeur 183°C	Réservoir	Stimulation hydraulique	Séisme	Pression de fluide excessive	-	x	x	Zone d'activité sismique naturelle importante	-	-	Erreur de conception	-	-	Secousses ressenties	x	x	Séisme de magnitude 4,4	x	x	x	-	-	x	x	-	Majer et al., 2007	
Biliran	23/06/2014	Géothermie profonde	Philippines	Biliran	-	Puits	Essai de production	Dégazage massif	-	-	Gaz asphyxiant	-	-	-	-	-	-	-	Emission gazeuse	-	-	-	x	8	2	-	-	-	-	-	Robert Z., 2014	
Bouillante	04/02/2010	Géothermie profonde	France	Bouillante, Guadeloupe	Puits allant jusqu'à 1400 m	Puits	Exploitation	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Désordres géotechniques Subsidence	x	x	Apparition d'un effondrement (1,5 m de diamètre et 1,5 m de profondeur) Affaissement de 1 à 14 cm	x	x	x	Suspension de la production géothermique par le préfet	-	-	-	-	Fabre J., 2010 Marchand et al., 2015	
Coulommiers	année 1996	Géothermie profonde	France	Coulommiers	-	Puits de réinjection	-	Fuite souterraine	Défaut d'étanchéité d'un couvlage	Perforation par corrosion	Fluide géothermal	660 000 m3	-	-	-	-	-	-	Rejet écotoxique	Aquifère	x	-	x	x	x	-	Contamination de 2 aquifères (50 m et 440 m) mais non observée au niveau des captages d'eau potable	-	-	-	Vernoux et al., 2002	
Geysers	1980-2010	Géothermie profonde	Etats-unis	Nord Califormie, 120 km au nord de San Francisco	-	Réservoir	Exploitation	Séisme	Refroidissement excessif du réservoir Réinjection partielle	-	x	x	Zone d'activité sismique naturelle importante Modification du champ de contraintes lié à la déplétion et à l'injection d'eau plus froide	-	-	-	-	-	Secousses ressenties	x	x	18 évènements de magnitude supérieur à 3 et un de 4,6 en 1982	x	x	x	-	-	x	x	-	Majer et al., 2007	
Habanero	mois de novembre 2012	Géothermie profonde	Australie	Cooper Bassin	Puits d'injection de 4077 m de profondeur	Réservoir	Stimulation hydraulique	Séisme	-	-	x	x	-	-	-	-	-	-	Secousses ressenties	x	x	en 3 semaines de stimulation, 27 000 séismes enregistrés de magnitude comprise entre 1,6 et 3	x	x	x	-	-	x	x	-	McMahon & Baisch, 2013	
Hengill	15/10/2011	Géothermie profonde	Islande	Hengill, sud ouest de l'Islande	-	Réservoir	Exploitation	Séisme	Débit de réinjection excessif	-	x	x	Zone d'activité sismique naturelle importante Le débit de réinjection est de 500 L/s	-	-	-	-	-	Secousses ressenties	x	x	3 séismes de moyenne 3 et le plus élevé 3,8	x	x	x	-	-	x	x	-	Halldorsson et al., 2012	
Hilsprich	à partir de 2006	Géothermie superficielle	France	Lorraine	2 sondes géothermiques de 95 m et 99 m de profondeur	Puits	-	Dissolution incontrôlée	Cimentation defectueuse	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Subsidence	x	x	-	x	x	x	Quinzaine de maisons fissurées et chaussées dégradées	-	-	-	-	Durst, 2014	
Innaminka	24/04/2009	Géothermie profonde	Australie	Innaminka	-	Puits	Essai de production	Fuite en surface	Défaut d'étanchéité d'un couvlage	Perforation par corrosion	Fluide géothermal	-	Eau+vapeur	Défaut matériel	x	Erreur de conception Erreur de test	x	-	Rejet toxique Projection	Sol	x	-	x	x	x	-	-	-	-	-	Strickland, 2009 University of Queensland, 2013	
Insheim	mois d'avril 2010	Géothermie profonde	Allemagne	Bavière	3 puits : 1 de production et 2 d'injection Température de 165°C	Réservoir	Stimulation hydraulique	Séisme	-	-	x	x	-	-	-	-	-	-	Secousses ressenties	x	x	2 séismes de 2,2 et 2,4 de magnitude	x	x	x	-	-	x	x	-	Kuperkoch, 2014 Brustle et al., 2014	
Japon	année 1998	Géothermie profonde	Japon	-	-	Installation de surface	-	Fuite en surface	-	-	H2S	-	Accumulation de gaz dans un local confiné dans lequel un homme est rentré	-	-	-	-	-	Rejet toxique	Local	-	-	1	x	x	-	-	x	x	-	Kage et al., 1998	
Kirchheim	année 2007	Géothermie superficielle	France	Alsace	6 sondes géothermiques de 100 m	Puits	-	Intrusion d'eau dans une formation d'anhydrite	Cimentation defectueuse	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Surrection	x	x	Variation de volume de 60%	x	x	x	1 bâtiment collectif fissuré	-	-	-	-	Durst, 2014 Miguet, 2014	

REFERENCE	CONTEXTE DE L'EVENEMENT					CIRCONSTANCES ET NATURE DE L'EVENEMENT								CAUSES					PHENOMENES GENERES				CONSEQUENCES						SOURCES					
Identifiant	Date	Type d'activité	Pays	Lieu	Infos complémentaires	Unité fonctionnelle concernée	Phase d'opération	Evènement redouté	Evènement initiateur ou barrière inopérante	Détails de l'EI1 ou de la barrière inopérante	Substances relâchées	Quantité	Infos complémentaires	Causes liées aux équipements	Causes externes	Causes humaines	Causes organisationnelles	Infos complémentaires	PhD ou Phi	Milieu de rejet	Type d'accident individuel	Infos complémentaires	Nb morts	Nb blessés	Dont graves	Autres conséquences humaines ou socioéconomiques	Qté	Conséquences environnementales	Qté	Infos complémentaires	Sources			
Landau 1	15/08/2009	Géothermie profonde	Allemagne	Landau	-	Réservoir	Exploitation	Séisme	-	-	x	x	-	-	-	-	-	-	-	Secousses ressenties	x	x	2 séismes importants (magnitude 2,4 et 2,7)	x	x	x	-	-	x	x	-	Brustle et al., 2014 ADIR, 2014 Kulish & Glanz, 2009		
Landau 2	13/03/2014	Géothermie profonde	Allemagne	Landau	-	Puits	Exploitation	-	-	-	-	-	L'hypothèse non vérifiée est une intrusion d'eau dans une formation d'argile due à une cimentation défectueuse	-	-	-	-	-	-	Surrection	x	x	-	x	x	x	Fissures dans certaines rues et soulèvement du sol Fissures de 25 à 70 mm de large 280 bâtiments endommagés	-	-	-	-	ADIR, 2014 Heimlich et al., 2015		
Lardarello	année 1985	Géothermie profonde	Italie	Lardarello	Vapeur exploitée entre 200° et 400 °C Réservoir à 2500m de profondeur	Puits	Exploitation	Fuite souterraine	Défaut d'étanchéité d'un cuvelage	Perforation par corrosion	-	-	Perforation au bout de 12 jours d'installation du tubage	Défaillance matérielle	Eaux très agressives	x	x	-	-	Rejet écologique	Sous-Sol	x	-	x	x	x	-	-	-	-	Bottai & Cigni, 1985 Durand-Delga et al., 2001			
Lochwiller	2008-2013	Géothermie superficielle	France	Alsace	1 sonde géothermique verticale de 140 m de profondeur	Puits	Forage	Intrusion d'eau dans une formation d'anhydrite	Venue d'eau incontrôlée	-	x	x	-	x	x	x	Compétence insuffisante du personnel Non respect de la réglementation	-	-	Surrection	x	x	-	x	x	x	Maisons fissurées, chaussée déformée, atteintes aux réseaux enterrés	-	-	-	-	Boissavy & Garroustet, 2013 Antoine, 2013 Miguet, 2014 Eroket, 2015 Libération, 2013		
Margamukti	07/05/2015	Géothermie profonde	Indonésie	Pangalengan ouest de Java	-	-	-	-	Rupture de cuvelage	-	-	-	-	x	Mouvement de terrain	x	x	-	-	-	-	x	x	x	-	-	-	-	-	-	Richter, 2015			
Meaux	année 2013	Géothermie profonde	France	Meaux	-	Puits	Exploitation	-	Corrosion importante	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	x	x	-	x	x	x	-	-	-	-	-	Energie Meaux, 2013			
Neustadt-Glewe	année 1998	Géothermie profonde	Allemagne	Neustadt-Glewe	Puits de 2200 m de profondeur	Puits	Exploitation	x	Colmatage	Précipitation de fer et de carbonates	x	x	-	Défaillance matérielle	x	x	x	Entrée d'oxygène par une vanne défectueuse en surface	x	x	x	Elimination des colmatants par acidification HCL	x	x	x	-	-	x	x	-	-	Seibt et al., 2005 Seibt & Wolfram, 2008		
Puna 1	07/08/2014	Géothermie profonde	Hawaii	Honolulu	-	Puits	Exploitation	Fuite en surface	-	-	H2S	-	-	-	-	-	-	-	-	Rejet toxique	-	x	-	x	x	x	-	-	-	-	-	Khon, 2008 Gadis, 2014		
Puna 2	15/06/1991	Géothermie profonde	Hawaii	Honolulu	Forage à 1060 m	Puits	Forage	Eruption	Venue	Formation en surpression	H2S	-	Durée : 30 heures	x	x	Erreur de conception	Non respect des procédures	-	-	Rejet toxique	-	-	-	x	1	x	Evacuation des personnes	-	-	-	-	Essoyan, 2002		
Rotokawa	01/01/2010	Géothermie profonde	Nouvelle Zélande	Rotokawa	Puits de 500 m à 3000 m de profondeur	Réservoir	Exploitation	Séisme	Refroidissement excessif du réservoir	-	x	x	-	-	-	-	-	-	-	Secousses ressenties	x	x	-	x	x	x	-	-	x	x	-	Sewell et al., 2015		
Saint Gall	20/07/2013	Géothermie profonde	Suisse	Saint Gall	Puits de 4500 m de profondeur	Puits	Forage	Séisme	Pression d'injection excessive	Poids excessif de la colonne de boue ayant fracturé les terrains	x	x	Opération de reprise de contrôle du puits suite à une venue de gaz Injection de 650 m3 d'eau	x	x	Erreur de conception	x	Mauvaise connaissance du réservoir (présence d'une quantité inattendue de gaz)	Secousses ressenties	x	x	Séisme de 3,6 de magnitude	x	x	x	120 plaintes pour dégâts matériels Abandon du projet	-	x	x	-	-	Hirschberg et al., 2015 Romandie, 2013 Bierlein, 2013 Faessler, 2014 La Tribune de Genève, 2013 20 minutes, 2014 Breede et al., 2013		
Salton Sea	1981-2012	Géothermie profonde	Etats-unis	Californie	Puits de 2000 m de profondeur Température de 320°C Vapeur exploitée	Réservoir	Exploitation	Séisme	Réinjection partielle	-	x	x	Zone d'activité sismique naturelle importante Modification du champ de contraintes lié à la déplétion (seulement 81% du fluide géothermal est réinjecté)	-	-	-	-	-	-	Secousses ressenties	x	x	Séisme le plus important de magnitude 5,1 et 10 000 séismes en tout de magnitude moyenne de 1,75	x	x	x	Crainte d'une réactivation de la faille de San Andreas	-	x	x	-	-	Boxall, 2013 Mauguit, 2013 Joyce, 2013 Brodsky & Lajoie, 2013 Starkey, 2014 Stephen, 2013	
Soultz-sous-Forêts	année 2003	Géothermie profonde	France	Alsace	8 puits entre 1 500 m et 5 000 m de profondeur Eau très minéralisée Température de 201°C à 5 000 m	Réservoir	Stimulation hydraulique	Séisme	-	-	x	x	-	-	-	-	-	-	-	Secousses ressenties	x	x	Séisme de magnitude 2,9	x	x	x	48 plaintes	-	x	x	la stimulation chimique a été ensuite utilisée car elle est moins génératrice de séisme	-	-	Chilou & Riou, 2011 Cuénot, 2015 Soppi, 2012. Cordon & Driscoll, 2008
Staufen	01/11/2007	Géothermie superficielle	Allemagne	Staufen	7 sondes géothermiques à 140 m de profondeur	Puits	Forage	Intrusion d'eau dans une formation d'anhydrite	Cimentation défectueuse	-	x	x	-	x	x	Erreur de conception	Non respect des procédures	Mauvais programme de forage et de cimentation	-	-	Surrection	x	x	-	x	x	x	Fissurations de plusieurs maisons	267 bâtiments	-	-	-	Weber, 2011 Arte, 2009 Therim, 2010	
Svartsengi	1976-1999	Géothermie profonde	Islande	Svartsengi	-	Réservoir	Exploitation	Déplétion excessive du réservoir	Réinjection partielle	-	x	x	-	-	-	-	-	-	-	Subsidence	x	x	Abaissement du sol de 23 cm (1 cm/an)	x	x	x	-	-	-	-	-	Eysteinnsson, 2000		
Unterhaching	-	Géothermie profonde	Allemagne	Bavière	-	Réservoir	Exploitation	Séisme	Refroidissement excessif du réservoir	Injection d'eau froide dans un système de failles	x	x	-	-	-	-	-	-	-	Secousses ressenties	x	x	-	x	x	x	-	-	x	x	-	Agemar et al., 2014		
Warakei	1950 à 1997	Géothermie profonde	Nouvelle Zélande	Warakei	-	Réservoir	Exploitation	Déplétion excessive du réservoir	Réinjection partielle	-	x	x	Couche de sédiments compressibles	-	-	-	-	-	-	Subsidence	x	x	Sol abaissé de 15 m (20 à 40 cm/an)	x	x	x	-	-	-	-	-	Allis, 1999 Allis et al., 2009 Berrizbelia, 2014		
Zunil 1	05/01/1991	Géothermie profonde	Guatemala	Sud-Ouest du Guatemala, 8 km au sud de Quetzaltenango	puits ZCQ 4 Température de 280°C 1300 m de profondeur	Puits	Exploitation	Fuite en surface	Rupture de cuvelage	-	-	-	-	x	Mouvement de terrain	x	x	glissement de terrain de 800 m de long et de 200 à 300 m de large	-	-	Explosion Projection	-	x	cratère de 15 m de diamètre	23	oui	oui	les morts sont le résultat du glissement de terrain	-	-	-	-	Goff & Goff, 1997 Flynn et al., 1991	



## ANNEXE 4

### FICHES DÉTAILLÉES D'ACCIDENTS



**Nom de l'évènement : PUNA 2**  
**Date de l'évènement : 15/06/1991**  
**Localisation : Honolulu, Hawaï**  
**Activité : Géothermie profonde**  
**Phénomène : Emission gazeuse**

## **RESUME**

Une émission massive de gaz (*blowout*), majoritairement du H<sub>2</sub>S, s'est produite lors de la réalisation d'un forage profond. Plus de 30 heures ont été nécessaires pour la maîtriser. De nombreuses personnes ont été évacuées.

## **LES INSTALLATIONS CONCERNEES**

Il s'agit d'un forage en cours de creusement. Sa profondeur est de 1060 m lorsque l'accident se produit.

## **L'ACCIDENT, SON DEROULEMENT, SES EFFETS ET SES CONSEQUENCES**

### L'accident

Le 15 juin 1991 lors du forage d'un puits une émission de gaz se produit, relâchant majoritairement du H<sub>2</sub>S. Les habitants les plus proches restent confinés chez eux, d'autres sont évacués.

### Les conséquences humaines et sociales

1 blessé et 75 personnes confinées chez elles.

L'éruption a duré un jour et 2 nuits générant un panache de gaz toxique et un bruit continu de 90 décibels.

### Les conséquences environnementales

Non précisé.

### Les conséquences économiques

Non précisé.

## **L'ORIGINE, LES CAUSES ET LES CIRCONSTANCES DE L'ACCIDENT**

### Origine

L'émission de gaz est due à une éruption en cours de forage, provoquée par une venue non maîtrisée.

### Causes immédiates

Une zone de gaz à haute pression avait été localisée mais a été atteinte plus tôt que prévu par le forage, engendrant la venue.

Deux hypothèses sont avancées : soit la zone de gaz n'avait pas été bien localisée, soit le foreur n'a pas bien estimé l'avancement en cours de foration.

### Causes internes

Non précisé.

## **LES SUITES DONNEES**

### Les mesures immédiates d'intervention et de secours

Non précisé.

### La mise en sécurité du site

Non précisé.

### Dépollution et réhabilitation du site

Non précisé.

### Les suites judiciaires

Non précisé.

## **LES ENSEIGNEMENTS TIRES**

Les enseignements tirés sont les suivants :

- Importance d'avoir la meilleure connaissance possible du sous-sol avant de forer ;
- Importance d'avoir une équipe formée et les équipements nécessaires (notamment un bloc d'obturation de puits) pour gérer une éventuelle venue de gaz, même lorsqu'elle est inattendue ;
- Le contexte volcanique est propice à la rencontre de formations sous forte pression de gaz en cours de foration.

## **REFERENCES**

Susan Essoyan, 2002. Blowout shuts geothermal unit in Hawaii.  
[http://articles.latimes.com/1991-06-15/news/mn-503\\_1\\_puna-geothermal-venture](http://articles.latimes.com/1991-06-15/news/mn-503_1_puna-geothermal-venture)

**Nom de l'évènement : COULOMMIERS**

**Date de l'évènement : 1996**

**Localisation : Coulommiers, France**

**Activité : Géothermie profonde**

**Phénomène : Déversement dans les aquifères**

## **RESUME**

En 1996, à Coulommiers, une fuite sur un forage géothermie profonde a conduit à une intrusion accidentelle de fluide géothermal dans des aquifères d'eau douce superficiels. Il s'agissait d'un fluide issu du réservoir du Dogger, situé vers 2000 m de profondeur. Cette fuite est apparue sur un forage de réinjection en cours d'exploitation et a été détectée suite à l'observation d'une baisse anormale de pression en tête de ce forage entre octobre 1995 (pression de 10 bar) et juillet 1996 (pression de 1,2 bar). Des diagraphies ont permis de repérer deux perforations du cuvelage, situées vers 50 m et 440 m de profondeur, soit respectivement au droit des calcaires de Champigny (Tertiaire) et de la craie. Ces deux formations renferment chacune un aquifère d'eau douce, localement capté pour l'alimentation en eau potable. Ces perforations sont probablement apparues en octobre 1995 : la fuite, d'abord faible, a dû atteindre son débit maximal (soit 70% des 135 m<sup>3</sup>/h produits) en avril 1996, ce qui représente un volume total de fuite de l'ordre de 660 000 m<sup>3</sup>. Du fait des faibles caractéristiques hydrodynamiques de la craie, située ici en profondeur, il a été admis que l'essentiel du panache de fluide géothermal avait dû s'épancher au sein des calcaires de Champigny. Il s'agissait d'une eau chaude (50 à 85 °C), moyennement acide (pH 6,1 à 6,5) mais surtout chargée en sels (6 à 35 g/L), en gaz dissous (H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>), en sulfures et en bactéries sulfato-réductrices. Cependant, le suivi des captages d'eau potable de la ville, implantés dans ce même aquifère, n'a finalement montré aucun indice significatif d'arrivée de fluide géothermal.

## **LES INSTALLATIONS CONCERNEES**

Il s'agit du puits de réinjection référencé GCO2 de 2315 m de profondeur.

## **L'ACCIDENT, SON DEROULEMENT, SES EFFETS ET SES CONSEQUENCES**

### L'accident

- octobre 1995 : la pression de réinjection du puits GCO2 diminue anormalement.
- janvier 1996 : la pression du puits, habituellement supérieure à 10 bars, n'est plus que de 2,6 bars.
- début juillet 1996 : la pression du puits continue de baisser pour atteindre 1,2 bar. Une série de diagraphies est lancée et confirme la perforation du cuvelage du puits à deux endroits vers 50 m et vers 440 m de profondeur. La fuite a dû apparaître en octobre 1995.

### Les conséquences humaines et sociales

Non précisé.

### Les conséquences environnementales

Le volume de fuite estimé est de 660 000 m<sup>3</sup>. L'eau géothermale du Dogger est réputée pour sa forte minéralisation, particulièrement une salinité élevée. Un suivi de la qualité de l'eau est réalisé dans 6 captages AEP situés en aval du puits (analyse quantitative des

ions chlorures, sodiums, fluorures, sulfates ainsi que de la conductivité). D'après les analyses, l'eau provenant de la fuite n'a pas atteint les captages d'eau potable.

#### Les conséquences économiques

Non précisé.

## **L'ORIGINE, LES CAUSES ET LES CIRCONSTANCES DE L'ACCIDENT**

#### Origine

Il semble que la fuite soit due à une perforation du cuvelage.

#### Causes immédiates

La corrosion serait en cause.

#### Causes internes

Non précisé.

## **LES SUITES DONNEES**

#### Les mesures immédiates d'intervention et de secours

Non précisé.

#### La mise en sécurité du site

Non précisé.

#### Dépollution et réhabilitation du site

Un suivi des eaux (analyse chimique) a été réalisé jusqu'en 1999.

#### Les suites judiciaires

Non précisé.

## **LES ENSEIGNEMENTS TIRES**

Les enseignements tirés sont les suivants :

- Vulnérabilité particulière des forages de géothermie profonde à la corrosion, en particulier dans le contexte des forages au Dogger dans le bassin parisien.
- Vulnérabilité plus grande des forages de réinjection au risque de fuite (du fait de la pression plus importante que dans les forages de production).
- Une baisse anormale de la pression en tête de puits doit être interprétée comme le signe d'une éventuelle fuite et doit permettre d'engager rapidement une campagne de diagraphies, avant que le volume de saumure déversé dans l'environnement du forage soit trop important.

## **REFERENCES**

JF Vernoux, M. Degouy, H. Machard de Gramont, R. Galin, 2002. Etude bibliographique sur le suivi des risques engendrés par les forages profonds sur les nappes d'eau souterraine du bassin Seine-Normandie, rapport BRGM/RP 51312-FR, 70 pages, 14 figures, 1 tableau, 2 annexes.

**Nom de l'évènement : STAUFEN**  
**Date de l'évènement : 01/11/2007**  
**Localisation : Staufen, Allemagne**  
**Activité : Géothermie superficielle**  
**Phénomène : Surrection**

## **RESUME**

Suite à la réalisation d'un forage de géothermie superficielle en plein centre-ville de Staufen à l'automne 2007, un phénomène de surrection se produit, provoquant des dommages sur 267 édifices de la ville. Le forage aurait créé une infiltration d'eau dans un banc d'anhydrites, causant un gonflement de celui-ci et donc un soulèvement du sol.

## **LES INSTALLATIONS CONCERNEES**

En septembre 2007, la municipalité de Staufen fait appel à une société autrichienne pour réaliser, derrière les bureaux de la mairie, 7 sondes géothermiques de 140 mètres de profondeur.

## **L'ACCIDENT, SON DEROULEMENT, SES EFFETS ET SES CONSEQUENCES**

### L'accident

- **septembre 2007** : début des travaux de forage
- **fin 2007** : des fissures apparaissent sur l'hôtel de ville et sur 179 bâtiments du centre historique.
- **printemps 2008** : les fissures continuent de s'agrandir et l'élévation du sol est mesurée : cette élévation atteint 12,5 mm/mois, ;
- **2011** : l'élévation cumulée atteint 40 cm par endroits ; 260 immeubles privés et 7 bâtiments municipaux présentent des dégâts, avec des fissures allant jusqu'à 10 cm de largeur.

### Les conséquences humaines et sociales

Des dégâts sont visibles sur de nombreuses maisons du centre historique classé de cette commune. Les bureaux des autorités publiques ont été évacués en raison des risques d'effondrement et de nombreux bâtiments ont dû être étayés. La largeur de certaines fissures peut atteindre 10 cm. L'ancienne caserne de pompiers utilisée par les services municipaux a été déclarée insalubre, après qu'une fissure de 30 centimètres de large a séparé le bâtiment en deux.

### Les conséquences environnementales

Le niveau du sol s'est élevé à certains endroits jusqu'à 40 cm.

### Les conséquences économiques

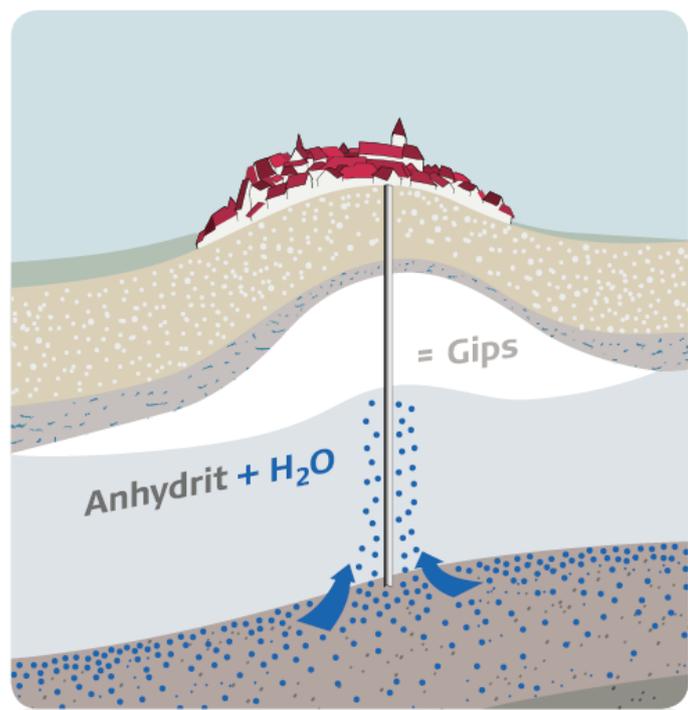
Les estimations actuelles évaluent le coût des dégâts, pour les bâtiments uniquement, entre 42 et 50 millions d'Euros.

La municipalité a financé provisoirement une partie des réparations sur fonds publics mais s'il est établi avec certitude que les forages sont à l'origine des fissures, elle compte se retourner contre l'entreprise de forage et le bureau d'étude.

## L'ORIGINE, LES CAUSES ET LES CIRCONSTANCES DE L'ACCIDENT

### Origine

La surrection des terrains a été causée par le gonflement d'un banc d'anhydrite, présent sous le village de Staufen, qui au contact de l'eau, s'est transformée en gypse (voir Figure ci-dessous). Cette hydratation de l'anhydrite en gypse engendre une augmentation de volume de 60%, ce qui a induit un soulèvement du sol.



*Schéma explicatif de l'effet du gonflement de l'anhydrite (Weber, 2011)*

### Causes immédiates

L'infiltration d'eau dans la formation d'anhydrites serait liée à une mauvaise cimentation du forage. L'entreprise de forage n'aurait pas utilisé un ciment suffisamment résistant aux sulfates présents dans la formation d'anhydrites. Sur certaines sections du forage, la cimentation serait même inexistante.

### Causes internes

Non précisé.

## LES SUITES DONNEES

### Les mesures immédiates d'intervention et de secours

Non précisé.

### La mise en sécurité du site

Depuis mars 2011, un second forage a été réalisé afin de pomper l'eau. Le taux de soulèvement maximal est ainsi passé de 12 mm par mois à environ 5,5 mm par mois.

### Dépollution et réhabilitation du site

Non précisé.

### Les suites judiciaires

L'entreprise de forage et le bureau d'étude ont été poursuivis en justice.

## **LES ENSEIGNEMENTS TIRES**

Les enseignements tirés sont les suivants :

- Importance d'avoir la meilleure connaissance possible du sous-sol avant de forer ;
- Importance d'une bonne qualité de la cimentation annulaire du forage ;
- Qualification indispensable de l'entreprise de forage.

## **REFERENCES**

Karl-Friedrich WEBER, 2011. **Réseau pour une ville déchirée en deux**. Le magazine mondial de Leica Geosystems, novembre 2011.

Arte, 2009. **Staufen : une ville qui s'effrite**. <http://www.arte.tv/fr/staufen-une-ville-s-effrite/1755842,CmC=2786544.htm>

Frédéric THERIN, 2010. **Vent de folie sur la géothermie allemande**. Les Echos, 17 mai 2010. [http://www.lesechos.fr/17/05/2010/LesEchos/20678-042-ECH\\_vent-de-folie-sur-la-geothermie-allemande.htm](http://www.lesechos.fr/17/05/2010/LesEchos/20678-042-ECH_vent-de-folie-sur-la-geothermie-allemande.htm)



**Nom de l'évènement : SAINT GALL**  
**Date de l'évènement : 20/07/2013**  
**Localisation : Saint Gall, nord de la Suisse**  
**Activité : Géothermie profonde (EGS)**  
**Phénomène : Secousses ressenties**

## **RESUME**

Le 20 juillet 2013, une injection d'eau sous forte pression est réalisée dans un forage de géothermie profonde afin de maîtriser une venue de gaz. Il s'ensuit un séisme de magnitude 3,6. Plusieurs dégâts de minime importance sont signalés par des particuliers. Cet incident conduit à l'abandon provisoire du projet.

## **LES INSTALLATIONS CONCERNEES**

Il s'agit d'un forage géothermique de 4500 m de profondeur.

## **L'ACCIDENT, SON DEROULEMENT, SES EFFETS ET SES CONSEQUENCES**

### L'accident

- **mars 2013** : début des opérations de forage
- **17-19 juillet 2013** : durant la préparation des essais de forage, une venue de gaz est détectée le 19 juillet au soir. Dans le but de contrôler cette venue, 650 m<sup>3</sup> d'eau sont injectés sous forte pression dans le forage. Une centaine de micro-séismes sont enregistrés dans le périmètre du forage.
- **20 juillet 2013, 5h30** : un séisme de magnitude 3,6 est enregistré à l'ouest de la ville de St Gall. L'hypocentre est situé à 4 km de profondeur.

### Les conséquences humaines et sociales

120 signalement de dégâts par des particuliers.

### Les conséquences environnementales

Non précisé.

### Les conséquences économiques

Pertes économiques importantes liées à l'abandon provisoire du projet.

## **L'ORIGINE, LES CAUSES ET LES CIRCONSTANCES DE L'ACCIDENT**

### Origine

Les séismes ont été causés par l'injection d'eau sous forte pression, réalisée dans le but de contrer une venue de gaz.

### Causes immédiates

La pression d'injection a été trop importante, ce qui a probablement conduit à la libération des contraintes le long d'une faille préexistante et à la génération d'un séisme ressenti.

### Causes internes

Une méconnaissance du sous-sol profond (présence de gaz) et un choix inapproprié de la position du forage font partie des causes qui ont mené à l'accident.

## LES SUITES DONNEES

### Les mesures immédiates d'intervention et de secours

Bouchage du puits.

### La mise en sécurité du site

Non précisé.

### Dépollution et réhabilitation du site

Abandon du projet

### Les suites judiciaires

Non précisé.

## LES ENSEIGNEMENTS TIRES

Les enseignements tirés sont les suivants :

- Importance d'avoir la meilleure connaissance possible du sous-sol avant de forer (formations susceptibles d'héberger du gaz) ;
- Importance d'avoir une équipe formée pour maîtriser d'éventuelles venues de gaz ;
- Importance de prioriser les risques : dans ce cas, la gestion de la venue de gaz a été jugée prioritaire, en dépit du risque sismicité induite.

## REFERENCES

Stefan HIRSCHBERG, Stefan WIEMER, Peter BURGHERR, 2015. **Energy from the Earth – Deep Geothermal as a Resource for the Future?** ISBN 978-3-7281-3654-1.

ROMANDIE, 2013. **CH/Géothermie: St-Gall poursuit son forage malgré le séisme de juillet.**

[http://www.romandie.com/news/n/CHGeothermie\\_St\\_Gall\\_poursuit\\_son\\_forage\\_malgre\\_l\\_e\\_seisme\\_de\\_juillet88270820131846.asp](http://www.romandie.com/news/n/CHGeothermie_St_Gall_poursuit_son_forage_malgre_l_e_seisme_de_juillet88270820131846.asp)

Louis BIERLEIN, 2013. **Suisse: un forage géothermique provoque un séisme.**

<http://ci.tf1.fr/science/environnement/suisse-un-forage-geothermique-provoque-un-seisme-8153345.html>

Jerôme FAESSLER, 2014. **Les réalisations de géothermie profonde peinent à émerger.** <http://www.letemps.ch/economie/2014/03/13/realisations-geothermie-profonde-peinent-emerger>

La Tribune de Genève, 2013. **Un forage géothermique provoque un petit séisme.**

<http://www.tdg.ch/suisse/Un-forage-geothermique-provoque-un-petit-seisme/story/22040751>

20 minutes, 2014. **Saint-Gall renonce à son projet géothermique.**

<http://www.20min.ch/ro/news/monde/story/14948152>

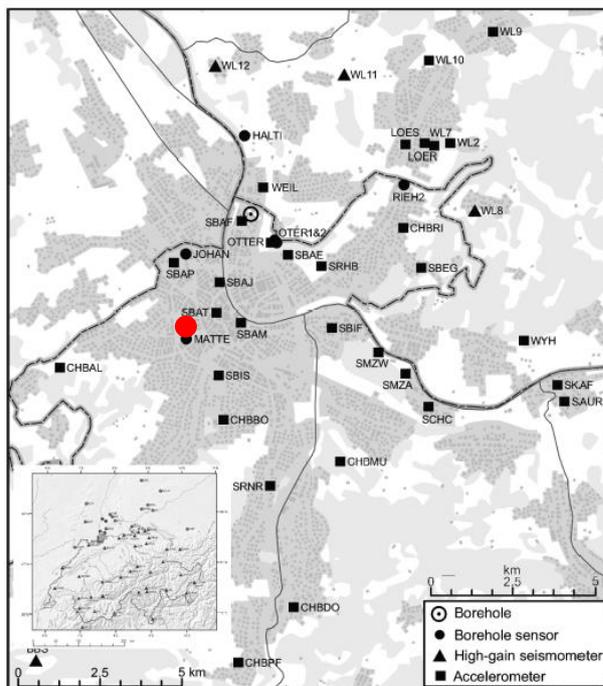
Katrin BREEDE, Khatia DZEBISASHVILI, Xiaolei LIU, Gioia FALCONE, 2013. **A systematic review of enhanced (or engineered) geothermal systems: past, present and future.** Geothermal Energy, 2013. <http://geothermal-energy-journal.springeropen.com/articles/10.1186/2195-9706-1-4>

**Nom de l'évènement : BÂLE**  
**Date de l'évènement : 08 décembre 2006**  
**Localisation : Bâle, Suisse**  
**Activité : Géothermie profonde (HDR)**  
**Phénomène : Secousses ressenties**

## RESUME

Un séisme de magnitude 3,4 s'est produit le 8 décembre 2006 au cours du développement d'un réservoir géothermique à 5 km de profondeur au-dessous de la ville de Bâle. Une opération de stimulation hydraulique du réservoir géothermique était alors en cours. Le séisme a été ressenti dans la ville accompagné d'une forte détonation. L'assurance de l'opérateur a payé près de 9 millions de dollars pour les dommages. Après cet évènement, le développement géothermique de cette zone a été arrêté.

## LES INSTALLATIONS CONCERNEES



*Localisation du puits d'injection  
(pastille rouge)*

Les installations concernées se situent dans le centre-ville de Bâle, ville densément peuplée (Figure ci-contre). Le projet « *Deep Heat Mining* » de Bâle visait à devenir l'une des premières centrales électriques commerciales basées sur l'extraction profonde de chaleur au sein de la roche cristalline, située à environ 4-5 km de profondeur (technologie EGS).

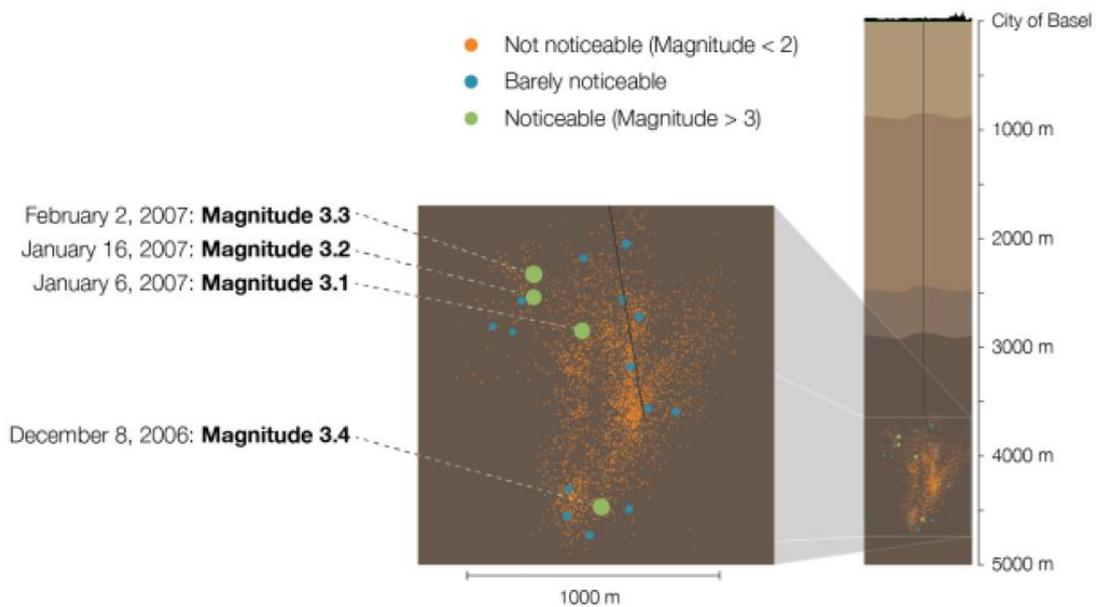
Il était prévu d'améliorer la perméabilité du réservoir par injection de fluide à haute pression (stimulation hydraulique) sur une période de temps d'environ deux semaines. Un système de surveillance sismique avait été mis en place, comprenant six sondes profondes, installées en forage à des profondeurs situées entre 300 m et 2700 m, et 30 stations de surface.

## L'ACCIDENT, SON DEROULEMENT, SES EFFETS ET SES CONSEQUENCES

### L'accident

- **2/12/2006** : démarrage de l'opération de stimulation hydraulique (injection d'un volume d'environ 11 500 m<sup>3</sup> d'eau)
- **2/12/2006 au 7/12/2006** : le débit est augmenté par paliers de 0 à 100 L/min résultant en une pression en tête de puits de 110 bar. Le débit est ensuite amplifié progressivement jusqu'à un maximum de 3300 L/min résultant en une pression en tête de 296 bar.
- **8/12/2006, vers 2h** : après environ 16 heures d'injection à ces valeurs maximales de débit et de pression, un séisme de magnitude de 2,6 est enregistré au niveau du réservoir.

- **8/12/2006, à 4h** : réduction de la pression d'injection.
- **8/12/2006, à 11h33** : arrêt de l'injection.
- **8/12/2006, vers 16h30** : pendant les préparatifs de purge du puits, un nouveau séisme de magnitude 3,4 est ressenti dans la ville de Bâle.
- **8/12/2006, vers 17h30** : initiation de la purge du puits
- **12/12/2006** : la pression au fond du puits retrouve une pression hydrostatique. Suite à cela, l'activité sismique diminue lentement.
- **6/01, 7/01 et 2/02/2007** : trois autres séismes se produisent, de magnitudes supérieures à 3 (respectivement 3,1 ; 3,2 et 3,3) alors qu'aucune opération d'injection n'est en cours.



*Sismicité observée après l'évènement du 8 décembre 2006 de magnitude 3,4*

#### Les conséquences humaines et sociales

Les dommages observés sur le bâti sont qualifiés de dommages structurels légers : fissures fines dans le plâtre de certaines habitations. En revanche, ces événements ont été nettement ressentis par les habitants et ont engendré de nombreuses plaintes. Une étude de risques menée par SERIANEX a conclu que le risque de sismicité induite était trop élevé en cas de poursuite du projet et que celui-ci devait donc être abandonné.

#### Les conséquences environnementales

Plus de 11.000 événements microsismiques ont été enregistrés au cours de l'opération de stimulation et dans les semaines qui ont suivi. Parmi ces événements, 900 d'une magnitude supérieure à 0,9 ont été localisés.

#### Les conséquences économiques

Le projet a été définitivement abandonné en 2009. L'assurance du consortium ayant entrepris les travaux (Geothermal Explorers Ltd ou GEL) a réglé l'intégralité des dédommagements demandés, soit 9 millions de dollars.

## **L'ORIGINE, LES CAUSES ET LES CIRCONSTANCES DE L'ACCIDENT**

### Origine

Les séismes ont été induits par l'injection d'eau sous forte pression dans un massif rocheux soumis à de fortes contraintes naturelles.

#### Causes immédiates

Le débit et la pression d'injection ont été beaucoup trop importantes et ont mené à une libération des contraintes accumulées sur des failles avoisinantes.

#### Causes internes

Sous-estimation du risque, dû en partie au manque de retour d'expérience. En effet, Bâle était un des tous premiers projets de mise en œuvre industrielle de la technologie EGS après les essais réalisés à Soultz-sous-Forêts.

## **LES SUITES DONNEES**

#### Les mesures immédiates d'intervention et de secours

Le réseau sismique mis en place a permis de suivre en temps réel l'évolution de la sismicité.

#### La mise en sécurité du site

Arrêt de l'injection et purge du puits.

#### Dépollution et réhabilitation du site

Aucune pollution générée.

Réparation des habitations fissurées.

#### Les suites judiciaires

Aucune. L'assurance de l'exploitant a dédommagé les victimes.

## **LES ENSEIGNEMENTS TIRES**

Les enseignements tirés sont les suivants :

- L'injection d'eau dans des structures faillées profondes tectoniquement actives doit être effectuée avec un débit et une pression limitées, dont le seuil est à définir selon chaque site ;
- Tout projet de géothermie de type EGS doit être accompagné d'un suivi microsismique en temps réel, qui doit permettre de stopper les opérations en cas de détection d'une activité microsismique anormale ;
- L'activité microsismique peut se poursuivre (voire s'intensifier) pendant plusieurs semaines après l'arrêt des opérations d'injection ;
- Même si la sismicité induite par des opérations de géothermie n'a jamais créé que des dégâts matériels légers sur des bâtiments, elle a un impact psychologique important sur la population ;
- Les projets EGS doivent être accompagnés de fonds de garanties, permettant une indemnisation rapide et intégrale des victimes.

## **REFERENCES**

Stefan BAISCH, David CARBON, Uwe DANNWOLF, Bastien DELACOU, Mylène DEVAUX, François DUNAND, Reinhard JUNG, Martin KOLLER, Christophe MARTIN, Mario SARTORI, Ramon SECANELL, Robert VOROS, 2009. **Deep Heat Mining Basel – Seismic Risk Analysis**. SERIANEX Group, November 30<sup>th</sup> 2009.

Corinne Elisabeth BACHMANN, 2011. New approaches towards understanding and forecasting induced seismicity.

Stefan HIRSCHBERG, Stefan WIEMER, Peter BURGHERR, 2015. **Energy from the Earth – Deep Geothermal as a Resource for the Future?** ISBN 978-3-7281-3654-1.

Domenico Giardini, 2009. **Geothermal quake risks must be faced.** Nature 462, 16/12/2009. <http://www.nature.com/nature/journal/v462/n7275/full/462848a.html> .

Markus O. HÄRING, Ulrich SCHANZ, Florentin LADNER, Ben C. DYER, 2008. **Characterisation of the Basel 1 enhanced geothermal system.** Elsevier, 469-495, 26/07/2008.