

Rapport final, 27 septembre 2018

# **Protection des eaux lors de forages pour sondes géothermiques**

Vue d'ensemble des systèmes  
d'étanchéité visant la protection des  
eaux souterraines



**energie schweiz**

Unser Engagement: unsere Zukunft.

**Auteurs**

Maurus Hess, CSD Ingénieurs SA

Fabrice Rognon, CSD Ingénieurs SA

Calame Nicole, CSD Ingénieurs SA

**Cette étude a été commandée par SuisseEnergie.  
Seuls les auteurs sont responsables de son contenu.**

**Adresse**

SuisseEnergie, Office fédéral de l'énergie (OFEN) Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen. Adresse postale: 3003 Berne

Ligne d'assistance 0848 444 444. [www.suisseenergie.ch/page/fr-ch/conseil-suisseenergie](http://www.suisseenergie.ch/page/fr-ch/conseil-suisseenergie)  
[suisseenergie@bfe.admin.ch](mailto:suisseenergie@bfe.admin.ch), [www.suisseenergie.ch](http://www.suisseenergie.ch)

# Contenu

<b>1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>6</b>
1.1	Situation initiale et motivation .....	6
1.2	Objectif .....	7
1.3	Méthode de travail.....	8
<b>2</b>	<b>Bases.....</b>	<b>10</b>
2.1	Exploitation de l'énergie géothermique au moyen de sondes et protection des eaux.....	10
2.2	Influence des eaux souterraines sur les sondes géothermiques d'un point de vue énergétique .....	11
2.3	Bases légales et techniques .....	11
2.3.1	Aide à l'exécution pour l'exploitation de la chaleur tirée du sol et du sous-sol, OFEV, 2009	11
2.3.2	Norme SIA 384/6 Sondes géothermiques, 2010 .....	12
2.4	Facteurs de risque .....	13
2.4.1	Pollution des eaux souterraines depuis la surface .....	13
2.4.2	Abouchement de nappes d'eaux souterraines .....	13
2.4.3	Fuite de la suspension de remplissage.....	14
2.4.4	Puits artésien .....	14
2.5	Démarche et entretiens.....	14
2.6	Acteurs .....	15
2.6.1	Maître d'ouvrage .....	15
2.6.2	Autorités .....	15
2.6.3	Entreprises de forage.....	16
2.6.4	Bureaux d'études géologiques.....	16
2.6.5	Producteurs et utilisateurs des systèmes d'étanchéité.....	17
2.7	Critères.....	17
2.7.1	Facilité de mise en œuvre.....	18
2.7.2	Fiabilité .....	18
2.7.3	Coûts .....	18
2.7.4	Mise en œuvre et risques.....	19
2.7.5	Unités vendues .....	19

2.7.6	Recommandations .....	19
<b>3</b>	<b>Évaluation des systèmes d'étanchéité .....</b>	<b>20</b>
3.1	Tubage permanent.....	20
3.1.1	Description du système.....	20
3.1.2	Facilité de mise en œuvre.....	20
3.1.3	Fiabilité en ce qui concerne la protection des eaux .....	21
3.1.4	Coûts .....	21
3.1.5	Unités vendues .....	21
3.1.6	Mise en œuvre et risques.....	22
3.2	Chaussette pour sondes géothermiques .....	22
3.2.1	Description du système.....	22
3.2.2	Facilité de mise en œuvre.....	23
3.2.3	Fiabilité en ce qui concerne la protection des eaux .....	24
3.2.4	Coûts .....	24
3.2.5	Unités vendues .....	24
3.2.6	Mise en œuvre et risques.....	25
3.3	Obturbateur textile pour sondes géothermiques.....	25
3.3.1	Description du système.....	25
3.3.2	Facilité de mise en œuvre.....	26
3.3.3	Fiabilité en ce qui concerne la protection des eaux .....	26
3.3.4	Coûts .....	27
3.3.5	Unités vendues .....	27
3.3.6	Mise en œuvre et risques.....	27
3.4	Obturbateur pour puits de forage (packer).....	27
3.4.1	Description du système.....	27
3.4.2	Facilité de mise en œuvre.....	28
3.4.3	Fiabilité en ce qui concerne la protection des eaux .....	29
3.4.4	Coûts .....	29
3.4.5	Unités vendues .....	29
3.4.6	Mise en œuvre et risques.....	29
3.5	Autres techniques d'étanchéification .....	30

3.5.1	Remplissage spécial .....	30
3.5.2	Injections .....	30
<b>4</b>	<b>Synthèse des possibilités d'utilisation .....</b>	<b>32</b>
<b>5</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>35</b>
<b>6</b>	<b>Sources .....</b>	<b>37</b>
<b>7</b>	<b>Annexe A Liste des acteurs interrogés .....</b>	<b>38</b>

# 1 Introduction

## 1.1 Situation initiale et motivation

La production d'énergie à partir du sous-sol sous forme de géothermie constitue un aspect important de la politique énergétique suisse. Celle-ci a par ailleurs été adoptée par le Conseil fédéral dans le cadre de la stratégie énergétique 2050.

La présente étude traite de l'exploitation de l'énergie géothermique à faible profondeur au moyen de sondes géothermiques. Au cours des dernières années, un nombre croissant de chauffages utilisant des pompes à chaleur couplées à des sondes géothermiques ont été installés, voir même rénovés (cf. Figure 1). De plus en plus de sondes géothermiques sont également installées pour le rafraîchissement des bâtiments, utilisant le sous-sol comme stockage thermique.

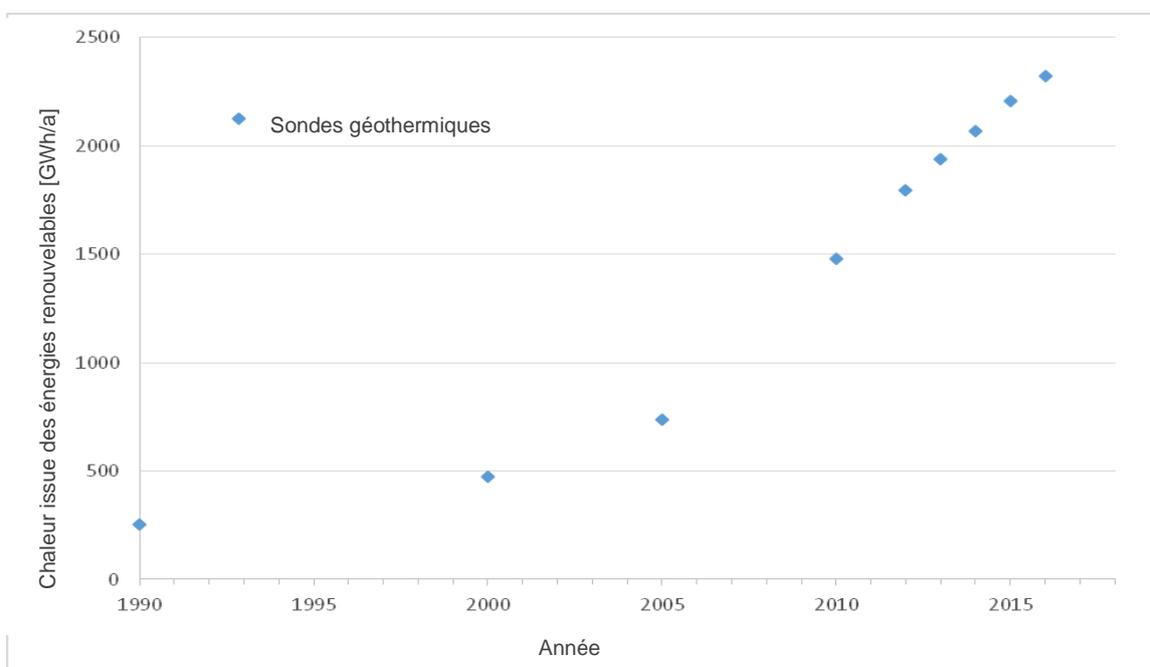


Figure 1: Développement de l'usage de l'énergie géothermique au moyen de sondes et de pompes à chaleur fonctionnant à l'eau saline depuis 1990. (Source: OFEN: Statistiques suisses sur les énergies renouvelables. Edition 2013. Berne, sept. 2014)

Quelque 2'500'000 m de sondes géothermiques ont été enfouies en 2016 en Suisse. La part de sondes installées dans les nappes phréatiques est cependant inconnue.

À cet égard, la qualité d'exécution des sondes géothermiques est essentielle. D'une part, elle est cruciale pour un bon raccordement thermique des sondes avec le sous-sol et permettre ainsi le fonctionnement performant des sondes et une bonne efficacité du système global chauffage-refroidissement. D'un autre côté, la priorité est donnée à la protection de l'environnement et en particulier des eaux souterraines. L'exécution professionnelle des travaux de forage et de l'installation de l'équipement est un facteur décisif pour satisfaire les exigences environnementales lors de forages liés à des sondes géothermiques.

Les forages pour sondes géothermiques sont susceptibles d'altérer les caractéristiques hydrogéologiques, par exemple à cause des facteurs suivants :

- pollution des eaux souterraines pendant le processus de forage, l'élargissement du puits de forage, de son remplissage ou pendant l'exploitation de l'installation de sonde géothermique
- abouchement de différents niveaux des eaux souterraines entre elles ou des eaux superficielles avec les eaux souterraines par le forage
- montée d'eaux souterraines captives ou artésiennes

Il en résulte de nombreux risques potentiels pour les eaux souterraines, particulièrement pour les aquifères les plus proches de la surface. Certaines des causes mentionnées ci-dessus peuvent non seulement nuire aux aquifères mais aussi aux eaux superficielles.

Lorsqu'il existe un risque que des eaux souterraines soient affectées par des forages pour sondes géothermiques, ceux-ci sont en règle générale soit totalement interdits, soit autorisés seulement sous certaines conditions. La définition de ces conditions relève de la compétence des cantons. L'aide à l'exécution de la Confédération «Exploitation de la chaleur extraite du sol et du sous-sol» brièvement présentée au chapitre 2.3 fait office de base pratique en matière d'autorisations.

Une planification et une réalisation en bonne et due forme d'une installation de sondes géothermiques peuvent considérablement minimiser ces risques. Des progrès notables ont été réalisés au cours des dernières années en termes d'aides techniques permettant l'étanchéification des forages. Divers fournisseurs fabriquent des produits pouvant être mis en place dans les différentes situations présentant des risques. Le recours à des mesures d'étanchéité, telles que décrites et évaluées dans le présent rapport, peut être soumis à d'éventuelles exigences spécifiques par les autorités cantonales.

L'objectif principal du présent travail est de répertorier les divers risques potentiels et d'établir quels produits disponibles sur le marché sont adaptés à chaque cas de figure. Ces produits sont évalués sur leur facilité de mise en œuvre, leur fiabilité ainsi que leur rapport coût-avantages.

Le remplissage de la sonde géothermique doit en principe assumer la tâche d'étanchéité du puits de forage dans les directions verticale et horizontale. En pratique, ce remplissage n'est cependant jamais totalement étanche (voir aussi Hess et al. 2015 pour SuisseEnergie), ainsi des exigences élevées doivent être posées en ce qui concerne l'étanchéité, en particulier dans le cas de forage dans les eaux souterraines.

## 1.2 Objectif

Dans le cadre du projet, les systèmes d'étanchéité permettant de protéger les eaux souterraines lors de forages pour des sondes géothermiques sont présentés et évalués. Divers acteurs de la branche ont été interrogés à ce sujet : entreprises de forage, autorités, bureaux d'études géologiques ainsi que fournisseurs de systèmes d'étanchéité. Ceci a permis d'actualiser l'état des connaissances et des expériences ainsi que d'élaborer d'une vue d'ensemble des systèmes

d'étanchéité aujourd'hui en usage. Il ne s'agit donc ni d'une priorisation des divers systèmes, ni d'une directive technique pour leur utilisation.

L'objectif est d'énumérer, catégoriser et évaluer les mesures d'étanchéité les plus pertinentes pour la protection des eaux souterraines lors de forages pour sondes géothermiques. D'autres risques potentiels (comme par exemple des fuites de gaz) ne font pas partie de la présente étude, bien que les divers systèmes d'étanchéité présentés ici puissent également être mis en place pour les prévenir ou les réduire.

Les produits et processus considérés sont des technologies mûres et éprouvées, disponibles sur le marché et actuellement en usage (donc pas de productions spéciales sur mesure ni de prototypes).

### 1.3 Méthode de travail

Les retours d'expérience d'acteurs de la branche, notamment d'entreprises de forage, d'autorités, de géologues et de producteurs et usagers de systèmes d'étanchéité, sont au cœur de ce travail. L'objectif à cet égard est d'obtenir le plus possible d'informations issues de la mise en pratique de ces systèmes. Un tableau comparant les divers systèmes usuels d'étanchéité selon plusieurs critères d'évaluation a servi de base à la collecte d'informations.

Les quatre systèmes d'étanchéité suivants ont été définis:

- Tubage permanent
- Chaussette pour sonde géothermique
- Obturateur textile pour sonde géothermique
- Obturateur pour puits de forage (packer)

Les termes sont ceux employés dans les fiches publiées par «Suisse Énergie» ([www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)). Un chapitre complémentaire intitulé «Autres techniques d'étanchéification » aborde également des systèmes qui ne sont pas mentionnés dans les fiches techniques.

Les critères d'évaluation suivants ont été définis :

- Facilité de mise en œuvre
- Fiabilité
- Coûts
- Limites
- Points critiques
- Unités vendues

Suite à l'envoi du tableau contenant les critères d'évaluation aux acteurs contactés, un entretien téléphonique a permis de recueillir leurs retours d'expériences. Les recommandations et remarques additionnelles récoltées auprès de ces-derniers sont également consignées dans ce rapport.

La méthode de travail, les critères d'évaluation ainsi que le choix des acteurs potentiels ont été déterminés en accord avec l'Office fédéral de l'énergie. Les auteurs ont essayé d'obtenir un retour d'expériences le plus large et détaillé possible. Les auteurs ne sont pas responsables du contenu des informations récoltées et ne peuvent garantir leur exhaustivité. La liste des acteurs ayant participé à cette étude est fournie dans l'annexe A.

L'appréciation critique et le bilan des auteurs se trouvent dans le dernier chapitre de ce rapport.

## 2 Bases

### 2.1 Exploitation de l'énergie géothermique au moyen de sondes et protection des eaux

Le sous-sol, eaux souterraines incluses, constitue une ressource importante d'énergie durable, renouvelable et respectueuse de l'environnement pour chauffer ou refroidir les bâtiments.

La sonde géothermique est la forme la plus courante d'exploitation de la géothermie. Il s'agit en général de tubes en plastique introduits dans le puits de forage habituellement en forme de U (sonde de type U ou double U) ou de forme concentrique (sonde coaxiale). Les puits de forage sont remplis de manière étanche après l'installation des sondes.

Le fonctionnement de la sonde géothermique est schématiquement représenté dans la figure 2. Elle forme un système fermé et sert d'échangeur de chaleur avec le sous-sol. La sonde permet le prélèvement de l'énergie géothermique du sol (en mode chauffage) ou l'apport de

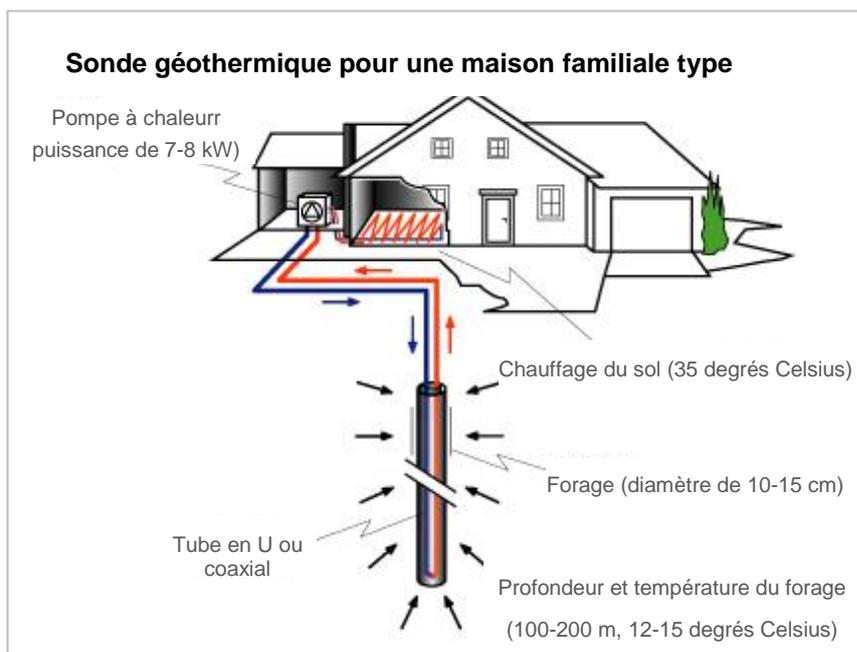


Figure 2: Image système de l'approvisionnement thermique pour une maison familiale au moyen d'une sonde géothermique et d'une pompe de chaleur. (Source: [www.geothermie.ch](http://www.geothermie.ch))

chaleur dans le sol (pour refroidir les bâtiments). Le nombre et la profondeur nécessaires des sondes géothermiques pour un besoin en énergie particulier dépendent des propriétés thermiques du sous-sol, de leur disposition géométrique, du fluide caloporteur, de la géométrie du puits de forage ainsi que d'autres paramètres.

Le forage nécessaire pour l'installation de sondes géothermiques implique une intervention dans le sous-sol. Si des eaux souterraines passent dans ce sous-sol, le forage constitue un risque potentiel pour celles-ci. L'installation et l'exploitation des sondes géothermiques relèvent donc de

la protection des eaux. La protection des eaux souterraines et des eaux potables est tout à fait prioritaire dans les processus d'autorisation et de concession.

## **2.2 Influence des eaux souterraines sur les sondes géothermiques d'un point de vue énergétique**

Les eaux souterraines ont également un effet positif sur la fonctionnalité des sondes géothermiques. Une série d'analyses (par ex. Poppei 2017 OFEN et l'Office des bâtiments du canton de Zurich 2017) conclut que les sondes géothermiques et les champs de sondes, dimensionnés selon SIA 384/6, témoignent souvent d'une efficacité élevée lorsqu'elles se trouvent dans l'écoulement des eaux dans la mesure où elles sont régénérées de manière naturelle. Ces études livrent également un aperçu précieux de théorie et d'expériences pratiques vécues jusqu'ici, et de l'influence du courant des eaux souterraines sur les paramètres géothermiques du sous-sol.

## **2.3 Bases légales et techniques**

L'attribution des autorisations et des concessions pour les sondes géothermiques relève en Suisse des instances cantonales. Les forages pour sondes géothermiques ne sont en règle générale pas autorisés par les autorités cantonales de protection des eaux lorsqu'il existe un risque de pollution des eaux souterraines et potables. Les autorités cantonales de protection des eaux sont compétentes pour classer leurs nappes phréatiques et pour autoriser, sous certaines conditions, les forages pour sondes géothermiques dans la région des eaux souterraines. Quelques cantons interdisent ainsi la pratique de forages pour sondes géothermiques dans les régions où des eaux souterraines sont présentes, tandis que d'autres ne les autorisent que dans des circonstances particulières ou sous certaines conditions. De telles conditions peuvent par exemple se traduire par la mise en place de systèmes d'étanchéité.

SuisseÉnergie a ainsi publié quatre fiches de description des systèmes d'étanchéité : tubage permanent, chaussette textile pour sonde géothermique, obturateur textile pour sonde géothermique, obturateur pour puits de forage. Cette répartition a été reprise dans la présente étude.

La législation relative à la protection des eaux est vaste. Des exigences fondamentales, relevant de la protection des eaux, sont consultables dans l'aide à l'exécution OFEV 2009. Les exigences techniques relatives aux forages pour sondes géothermiques, y compris les interventions en cas d'incident, sont réglées par la norme SIA 384/6. Ces deux documents sont développés plus en détail ci-dessous. Les renvois aux lois et ordonnances auxquelles elles se rapportent se trouvent dans ces documents.

### **2.3.1 Aide à l'exécution pour l'exploitation de la chaleur tirée du sol et du sous-sol, OFEV, 2009**

Cette aide à l'exécution fournit un aperçu des bases légales au niveau fédéral (constitution fédérale, législation et ordonnance sur la protection des eaux) et propose une base pratique en

matière d'autorisations cantonales. Les régions dans lesquelles les sondes géothermiques peuvent être autorisées sous certaines conditions sont déterminées comme suit:

1. Régions ayant une faible épaisseur de la nappe phréatique (techniquement inexploitable pour l'eau potable) situées dans la zone de protection des eaux A<sub>U</sub>.
2. Régions contenant des habitations et situées dans la partie utilisable de la zone de protection des eaux A<sub>U</sub>, mais qui ne sont pas propices à l'exploitation d'eau potable.
3. Régions avec nappes d'eaux souterraines superposées.
4. Régions avec eaux souterraines captives.
5. Régions avec eaux souterraines fortement minéralisées.
6. Régions dans lesquelles la structure géologique ou hydrogéologique du sous-sol est insuffisamment connue, ainsi que régions avec des formations locales de karst ou de fissures.
7. Régions contenant des installations souterraines existantes.
8. Régions dans lesquelles des problèmes géogènes sont possibles (p. ex. gaz naturel, roches pétrolifères, soulèvements de formations).
9. Lieux chargés, tant que les conditions de l'article 3 de l'Ordonnance sur les sites contaminés sont remplies.

Dans ces zones, la mise en place de tubages permanents, d'obturateurs ou la cimentation sous pression constituent les solutions généralement spécifiées par les autorités ou le géologue comme conditions permettant le forage.

### **2.3.2 Norme SIA 384/6 Sondes géothermiques, 2010**

La qualité du remplissage est une condition importante pour un puits de forage correctement étanchéifié. En plus de l'enrobage et de la protection des sondes ainsi que de la liaison thermique avec le sous-sol, la tâche principale du remplissage est de garantir l'étanchéité. (voir aussi Hess et al. 2015 pour SuisseÉnergie).

Sous le point 4.3.1.2, la norme SIA 384/6 stipule que, dans des cas particuliers, des aides techniques doivent être utilisés par exemple en cas d'afflux d'eau, de nappe artésienne, d'afflux de gaz, de présence de couches graveleuses et de fissures. Les moyens usuels mentionnés sont notamment les mélanges de suspensions adaptées et les obturateurs textiles pour sondes géothermiques.

L'annexe E.3 présente l'équipement de forage minimum en cas d'incident artésien:

- Un obturateur textile doit être installé pour l'étanchéité du forage dans le cas d'une intervention immédiate.
- Dans le cadre d'un assainissement (si besoin), on utilise des sondes géothermiques avec des obturateurs textiles (dans le cas d'une étanchéité avec installation de sonde géothermique) ou des obturateurs complets (dans le cas d'une étanchéité sans installation

de sonde géothermique). Sont également inclus les dispositifs pour l'ajout de remplissage lesté ou thixotrope et les additifs correspondants (p. ex. la baryte).

## **2.4 Facteurs de risque**

Ce paragraphe comprend un résumé des facteurs de risques potentiels pouvant survenir selon l'état des connaissances actuelles, prioritairement en cas de forages pour sondes géothermiques, et pour lesquels les systèmes d'étanchéité mentionnés dans cette étude peuvent être mis en place avec succès.

### **2.4.1 Pollution des eaux souterraines depuis la surface**

Un forage imparfaitement étanche peut provoquer un abouchement entre les eaux superficielles et souterraines et court-circuiter l'effet de filtrage naturel du sol. Si les eaux superficielles sont polluées ou ont une composition chimique différente des eaux souterraines, les premières peuvent constituer un réel danger pour ces dernières.

Des fuites d'huiles de machines ou de fluides hydrauliques ou même des précipitations ayant naturellement une composition chimique différente et pouvant en outre absorber des substances dangereuses par contact avec des routes, des toits, etc. sont autant d'exemples de pollution.

Nous comptons parmi les facteurs de risque dans ce contexte également les fuites de liquide caloporteur des sondes géothermiques ou de leur conduite de raccordement. Le liquide caloporteur est choisi de sorte qu'aucune glace ne puisse se former sur l'évaporateur et qu'aucune corrosion ne puisse avoir lieu sur les matériaux utilisés dans le circuit des sondes géothermiques. Il est constitué dans la plupart des cas d'un mélange d'eau et de produit antigel. Puisque la perte de pression liée à une fuite dans les sondes géothermiques induit généralement une défaillance de la pompe à chaleur, le volume total pouvant s'échapper avant que la fuite ne soit détectée est limité.

Ce risque peut déjà être fortement minimisé par une exécution soignée et correcte. Si un cas de contamination devait toutefois avoir lieu, la propagation peut être contrecarrée grâce à des puits de forage correctement étanchéifiés. Si une exploitation d'eau potable a lieu dans la zone d'influence potentielle des forages, des mesures comparatives de la qualité de l'eau sont recommandées avant, pendant et après les travaux de forage sur les sources concernées ou aux stations de surveillance des eaux souterraines.

### **2.4.2 Abouchement de nappes d'eaux souterraines**

Ce risque revêt une importance centrale puisqu'il peut avoir des effets irréparables sur les eaux souterraines. Il comprend la création de nouvelles voies d'eaux entre des niveaux distincts de nappes d'eaux souterraines mais aussi entre les divers systèmes de formation de karst et de fissures. Le mélange des différentes eaux souterraines peut d'un côté influencer les comportements hydrauliques au sous-sol et d'un autre côté modifier les compositions chimiques pouvant influencer à leur tour sur les roches environnantes. Il faut donc absolument éviter que les divers niveaux des eaux souterraines ne puissent communiquer entre eux par les forages pour sondes géothermiques.

### 2.4.3 Fuite de la suspension de remplissage

Les tâches principales du remplissage sont la protection de la sonde géothermique, l'étanchéification du puits de forage ainsi que la liaison thermique de la sonde avec le terrain. L'opération doit être réalisée suivant l'aide à l'exécution OFEV «Exploitation de la chaleur tirée du sol et du sous-sol». Des exigences techniques supplémentaires sont en outre consultables dans la norme SIA 384/6 annexe F3.

Néanmoins, sans mesures d'étanchéité supplémentaires, la suspension peut pénétrer dans le sol environnant avant de durcir dans des karsts, des fissures, des cavités ou des roches hautement perméables. Une fuite significative peut être en règle générale détectée par l'entreprise de forage en raison de la consommation de suspension ou d'un abaissement ultérieur du remplissage dans le puits de forage. Un risque potentiel peut également être identifié par le contremaître foreur si des cavités importantes sont rencontrées au cours des travaux de forage.

Les risques sont multiples. Une fuite de la suspension de remplissage est dans tous les cas considérée comme critique du point de vue des techniques de protection des eaux en raison de sa composition chimique. Souvent cela est également associé à un remplissage incomplet, ce qui n'est pas souhaitable en raison du manque d'étanchéité, ainsi que d'une détérioration de la connexion thermique de la sonde géothermique avec le sous-sol.

### 2.4.4 Puits artésien

Une nappe d'eau souterraine captive se forme si elle est retenue vers le haut par une couche imperméable et si à cause de cela, elle ne peut pas atteindre son niveau de pression hydrostatique réel. Si ce niveau est supérieur à celui de la surface du sol, on parle de nappe artésienne. Si la couche supérieure étanche est forée, les eaux souterraines situées en dessous vont s'élever dans le puits de forage jusqu'à atteindre leur niveau de pression hydrostatique. En cas de nappe artésienne, les eaux souterraines émergent à la surface. Le forage des eaux artésiennes entraîne par ailleurs la diminution de la pression hydraulique dans l'aquifère et peut influencer durablement les caractéristiques hydrogéologiques.

Les venues d'eaux souterraines en surface peuvent non seulement entraîner une contamination à grande échelle mais aussi endommager des bâtiments existants. Il convient donc de faire preuve de prudence du point de vue de la protection des eaux. D'autre part, les entreprises de forage doivent maîtriser les mesures d'urgence pour faire face aux cas de puits artésiens.

## 2.5 Démarche et entretiens

Cette étude présente un aperçu des systèmes permettant d'isoler de façon étanche les forages, pour la protection des eaux souterraines. Elle présente également une évaluation de leurs propriétés pour les divers champs d'application (risques). L'utilisation d'un système d'étanchéité spécifique est pourtant rarement requise légalement. De solides connaissances spécialisées ainsi qu'une bonne entente entre les différents acteurs sont indispensables pour la recherche d'une solution efficace. La solution doit satisfaire les exigences techniques de protection des eaux avec un rapport coûts-avantages raisonnable.

Le présent rapport concentre l'état des connaissances et de l'expérience de certains acteurs du domaine de la géothermie dans le but d'offrir un outil qui soit utile dans la pratique. Ces acteurs sont pour l'essentiel les différentes autorités qui garantissent la protection des eaux (représentant les cantons); d'entreprises de forage; de bureaux d'études géologiques qui accompagnent les forages pour sondes géothermiques et identifient et évaluent des situations à risque pour la protection des eaux puis requièrent des mesures appropriées; du maître d'ouvrage qui prend généralement en charge les coûts.

Les acteurs intervenant pour un forage ainsi que leurs droits et leurs obligations sont explicités de manière un peu plus approfondie dans le paragraphe 2.6.

Dans le cadre de ce projet, seul un nombre restreint d'acteurs a pu être interrogé. Il est établi à ce stade qu'il ne s'agit pas d'une enquête représentative. Les acteurs interrogés dans le cadre de cette étude ont reçu, préalablement à l'entretien, un tableau de base qui compare les systèmes permettant d'étanchéifier les forages selon différents critères d'évaluation. Des informations détaillées relatives aux critères sont exposées dans le chapitre 2.7. Les systèmes d'étanchéification sont décrits au chapitre 3 dans le cadre des résultats.

Ce tableau a été renseigné par l'acteur et a constitué la base des entretiens qui sont résumés et retranscrits fidèlement dans le chapitre suivant. Les auteurs ne sont pas responsables du contenu des informations récoltées et ne peuvent garantir leur exhaustivité.

## **2.6 Acteurs**

Les personnes interrogées lors d'entretiens ont été choisis de manière à permettre un échange d'expérience aussi large que possible, aussi bien d'un point de vue géographique que par rapport à leurs besoins dans le contexte de la mise en œuvre d'un projet. Des représentants des autorités, des sociétés de forage, des fabricants ainsi que des géologues ont été interrogés. Comme brièvement expliqué par la suite, ceux-ci remplissent des fonctions différentes dans le contexte de forages pour sondes géothermiques.

### **2.6.1 Maître d'ouvrage**

Comme premier acteur, on peut citer le maître d'ouvrage. Il est l'acquéreur de l'installation comprenant des sondes géothermiques, et donc porteur de la charge financière et du risque inhérent au site et a ainsi en premier lieu tout intérêt à une installation fonctionnant durablement. Le maître d'ouvrage est également responsable d'une mise en œuvre conforme à la protection des eaux et a intérêt à ce que l'exécution soit faite de façon professionnelle et appropriée. Si les dispositions légales de protection des eaux sur un site sont néanmoins trop élevées pour que l'installation fonctionne de façon rentable, il optera à temps pour une autre source d'énergie.

### **2.6.2 Autorités**

Les cantons sont chargés de protéger les eaux de surface et les eaux souterraines. L'attribution d'autorisations relative à l'installation de sondes géothermiques selon l'ordonnance sur la protection des eaux ainsi que la fourniture de conditions spécifiques relèvent de la compétence des cantons. Selon la législation cantonale, les municipalités respectives sont incluses dans le

processus d'approbation. Une étude de CSD Ingénieurs SA mandatée par l'Office fédéral pour l'énergie a montré entre autres à ce sujet ce qui suit (version 2015; présentation CSD le 10 septembre 2015 lors du séminaire sur les sondes géothermiques à Berne, organisé par «Suisse Énergie»):

- Dans la moitié des cantons environ, une demande d'autorisation de forage légale relative à la protection des eaux doit être déposée par l'intermédiaire d'une instance cantonale, dans l'autre moitié par une instance communale.
- Dans 16 cantons, la commune délivre un permis de construire pour chaque projet de sondes géothermiques (une demande de construction est requise dans tous les cas), ou est consultée au moins dans le cadre de la procédure d'autorisation. Dans les 10 autres cantons, soit la commune n'est consultée que dans certains cas (p. ex. si les distances sont inférieures à la valeur limite ou en cas de nouvelles constructions), soit la compétence de la commune n'est pas clairement établie à partir des documents portés au dossier.

Cela signifie que les autorisations de forage sont attribuées par les cantons. Le déroulement effectif de la demande peut cependant fortement varier au sein de la Suisse.

### **2.6.3 Entreprises de forage**

Plusieurs entreprises de forage sont actives en Suisse pour la réalisation de projets de sondes géothermiques. Leur tâche dans le cadre d'une telle installation regroupe en règle générale l'installation et la sécurisation du chantier, les travaux de forage, la mise en place de la sonde, le remplissage ainsi que le contrôle de la pression et de l'écoulement, protocoles inclus.

La plupart des entreprises de forage sont membres du Groupement professionnel suisse pour les pompes à chaleur (GSP). Un certificat qualité de GSP est en outre attribué en ce sens, certificat permettant «d'élever le niveau de qualité dans l'élaboration et la réalisation de systèmes de sondes géothermiques et de garantir celui-ci pour l'avenir» ([www.fws.ch](http://www.fws.ch)). Ces entreprises de forage garantissent, entre autres, une élaboration respectueuse de l'environnement de la sonde géothermique, des forages à la pointe de l'état de la technique actuelle et l'utilisation de matériel de haute qualité.

Les entreprises de forage sont en règle générale mandatées par le maître d'ouvrage, le représentant du maître d'ouvrage ou le planificateur de chauffage.

### **2.6.4 Bureaux d'études géologiques**

Les prestations du bureau d'étude géologique requises par les autorités se limitent généralement à l'accompagnement géologique des travaux de forage. Cela comprend généralement les instructions au contremaître foreur avant le début des travaux relativement à la géologie attendue et selon les risques potentiels, le relevé du profil géologique et l'établissement d'un rapport. Le géologue fait souvent le lien entre les participants du projet, rôle qui s'avère très important surtout en cas d'incident. L'élaboration d'une expertise préalable est aussi souvent demandée par un bureau d'études géologiques.

Il dépend également de la législation cantonale d'établir si, et sous quelle forme, un bureau d'études géologiques doit être impliqué dans un forage pour sonde géothermique. Une étude de CSD Ingénieurs SA mandatée par l'Office fédéral pour l'énergie a par ailleurs montré à ce sujet ce qui suit (version 2015; présentation CSD le 10 septembre 2015 lors du séminaire sur les sondes géothermiques à Berne, organisé par «Suisse Énergie»):

- Dans 17 cantons, chaque forage pour sonde géothermique doit être soumis à un suivi géologique. Dans 6 d'entre eux, une expertise préalable est demandée en fonction du site et de la profondeur.
- Dans 9 cantons, le suivi géologique n'est obligatoire que dans des zones particulières. Dans 3 d'entre eux, une expertise préalable est requise en fonction du site et de la profondeur.

Il est spécialement indiqué de consulter un géologue sur des sites exempts de forage existant dans le proche voisinage. Particulièrement en cas d'installations plus importantes, il est avantageux de le faire à un stade précoce de la planification du projet, car la nature du sous-sol a non seulement une influence sur la mise en œuvre technique du forage et de la protection des eaux, mais aussi sur le dimensionnement de l'installation.

Le bureau d'études géologiques est généralement mandaté par le maître d'ouvrage, le représentant de celui-ci, le planificateur de chauffage ou l'entreprise de forage.

### **2.6.5 Producteurs et utilisateurs des systèmes d'étanchéité**

Diverses entreprises en Suisse et à l'étranger fabriquent des produits pour étanchéfier les puits de forage. La majorité des systèmes d'étanchéité utilisés en Suisse sont produits en Allemagne et en Suisse. L'état de la technique dépend non seulement des exigences en matière de techniques de protection des eaux et des besoins des entreprises de forage, mais également de la force d'innovation des fabricants.

Des producteurs de systèmes d'étanchéité et des utilisateurs ont été sollicités ou interrogés dans le cadre de cette étude. Les informations recueillies au cours de cette étude sont toutefois insuffisantes pour permettre une comparaison technique complète des produits individuels entre eux ainsi que des divers types ou matériaux employés.

L'Office fédéral de l'énergie planifie dans une étape suivante de demander aux producteurs de systèmes d'étanchéité des détails techniques supplémentaires pour chaque produit afin d'élaborer un aperçu.

## **2.7 Critères**

Cette section explicite les critères d'évaluation utilisés comme base pour les entretiens menés ainsi que pour l'évaluation des différents systèmes d'étanchéité.

L'évaluation d'une méthode dépend naturellement de la perspective de la personne interrogée. Il faut donc s'attendre à ce que les divers acteurs interprètent les critères de manière différente. Puisque cette marge d'interprétation constitue une partie importante de la présente étude, les

critères n'ont volontairement pas été définis plus précisément dans le cadre des entretiens réalisés.

### **2.7.1 Facilité de mise en œuvre**

La facilité de mise en œuvre est un critère central. Le puits de forage, la sonde géothermique et les systèmes d'étanchéité correspondants se trouvent dans le sous-sol et ne sont ni accessibles, ni visibles. Les connaissances sur la nature du sous-sol se limitent généralement (si tant est qu'elle soit identifiable) à la perception du contremaître foreur ainsi qu'à l'interprétation géologique des déblais de forage (aussi nommés cuttings). Les déblais de forage désignent la roche pulvérisée par le processus de forage et amenée en surface par le fluide de forage. Un échantillonnage des déblais de forage est généralement requis ou recommandé tous les deux mètres.

Au moment de l'installation des systèmes d'étanchéité, des doutes subsistent souvent en ce qui concerne la nature de la roche environnante ainsi que l'ampleur et la profondeur des eaux souterraines. Le système d'étanchéité doit être correctement installé dans le diamètre limité du forage pour être fonctionnel à une profondeur spécifique.

Étant donné ce contexte, les autorités interprètent donc la facilité de mise en œuvre des systèmes d'étanchéité en lien avec leur capacité à être correctement positionnés et leur fonctionnalité vis-à-vis de certains types de risque. Pour l'entreprise de forage exécutrice, la facilité de mise en œuvre repose plutôt sur une possibilité d'installation avec le moins de complications possibles. Le géologue assume ici la fonction importante consistant à proposer un système adapté à la situation.

Afin de présenter les résultats de manière cohérente, la facilité de mise en œuvre du système d'étanchéité est restituée dans les résultats du point de vue technique de l'entreprise de forage.

### **2.7.2 Fiabilité**

La fiabilité décrit essentiellement si le système d'étanchéité, lorsqu'il est correctement installé, peut exercer son effet avec le taux de réussite le plus élevé possible en fournissant une étanchéité durable. Ceci est souvent difficile à évaluer et dépend dans une certaine mesure de la subjectivité de l'observateur. Des tests ont certes déjà été effectués pour différents systèmes d'étanchéité, mais les systèmes eux-mêmes sont souvent encore trop récents pour disposer de retours d'expérience sur le long terme. Les possibilités techniques manquent en outre pour contrôler de manière représentative le fonctionnement des systèmes installés dans un puits de forage.

Afin de présenter les résultats de manière cohérente, la fiabilité des systèmes est restituée dans les résultats du point de vue de la protection des eaux.

### **2.7.3 Coûts**

Les coûts constituent généralement un point important. Seuls les systèmes d'étanchéité qui disposent d'un rapport coûts-résultats raisonnable sont employés régulièrement. Ceci n'est cependant pas aisément quantifiable. Les résultats se mesurent au taux de réussite à élaborer une installation fonctionnelle et durable qui satisfasse toutes les contraintes réglementaires (principalement en ce qui concerne la législation de protection des eaux). Les dépenses se

mesurent d'une part aux coûts du système d'étanchéité lui-même et de l'autre au supplément de travail induit pour l'entreprise de forage et autres participants à la mise en œuvre du système.

#### **2.7.4 Mise en œuvre et risques**

Les limites des systèmes d'étanchéité ont été généralement interprétées d'un point de vue technique. Les limites propres de mise en oeuvre ne doivent pas être négligées au cours de la pondération des avantages et des inconvénients de chaque système. Les limites d'utilisation peuvent par exemple être interprétées spatialement (l'installation n'est par exemple réalisable que sur une certaine profondeur de forage) ou en fonction de l'intensité de la pression (telle que la force artésienne) que le système devra contrer. De plus, chaque système est adapté pour contrer certains risques.

#### **2.7.5 Unités vendues**

De nombreux systèmes et produits différents sont disponibles sur le marché pour l'étanchéité des forages pour sondes géothermiques. Les produits les plus utilisés sont directement vendus par les entreprises qui les fabriquent aux entreprises de forage. Il existe par ailleurs un nombre considérable de produits ayant été fabriqués directement par des entreprises de forage. Il n'est pas rare qu'il s'agisse de productions sur mesure ne pouvant pas être clairement attribuées à un système spécifique.

Les chiffres de ventes effectifs des fabricants ne sont généralement pas disponibles. Cependant, cette étude donne une indication approximative des parts de marché de chaque système.

#### **2.7.6 Recommandations**

La présente étude doit fournir aux acteurs de la branche géothermique un aperçu des systèmes d'étanchéité disponibles. S'agissant d'une étude orientée vers la pratique, une grande partie des informations provient de ces acteurs. Une grande importance a par conséquent été accordée lors des entretiens aux recommandations des acteurs.

## 3 Évaluation des systèmes d'étanchéité

Les systèmes d'étanchéité actuellement sur le marché, et traités lors des entretiens, sont présentés dans cette section. La définition des différentes notions constitue un élément important de cette étude. La plupart des systèmes d'étanchéité peuvent être classés parmi les quatre fiches de «Suisse Énergie». D'autres systèmes d'étanchéité ont encore été ajoutés dans le cadre de cette étude. La diversité des produits, des types et des matériaux est très grande et ne peut pas être traitée au cas par cas, puisque cela irait à l'encontre du principe d'une vue d'ensemble.

### 3.1 Tubage permanent

#### 3.1.1 Description du système

D'un point de vue conceptuel, le tubage permanent est un système simple permettant d'isoler de façon étanche et durable un tronçon du puits de forage par rapport au sous-sol. Un tube en est l'élément central qui sépare la sonde géothermique, remplissage inclus, de la roche environnante et des eaux souterraines.

Le tubage permanent comprend des conduites supplémentaires intégrées pour permettre l'étanchéification du tube comprenant la sonde géothermique et le remplissage ainsi qu'avec la roche environnante. La sonde géothermique peut y être employée normalement.

Différents types de matériau entrent en ligne de compte pour le tube. Il s'agit essentiellement d'acier (p. ex. tubes en aciers intégrés ou tubage auxiliaire laissés dans le sol) ou de matières plastiques (PVC, PE) lors de l'installation après le forage.

En cas d'utilisation avec des sondes géothermiques, des tubes en plastique sont généralement installés dans le puits de forage au-dessus de la profondeur à étanchéifier lors une étape distincte. L'espace entre le tubage permanent et la sonde géothermique est ensuite comblé. Cela permet d'éviter un écoulement horizontal incontrôlé de la suspension de remplissage dans la roche environnante et permet de protéger les couches perméables proches de la surface dans le secteur Au de protection des eaux ou les secteurs adjacents. Cela correspond à ladite «exécution simplifiée» selon la fiche «Suisse Énergie».

Pour éviter complètement la circulation de l'eau (également dans la direction verticale), une cimentation sous pression de l'espace annulaire entre le tube et la paroi du puits de forage, ainsi qu'une cimentation du pied à l'extrémité inférieure du tube, sont nécessaires.

#### 3.1.2 Facilité de mise en œuvre

Le tubage permanent est habituellement placé dans le puits de forage avant l'introduction de la sonde et son remplissage. Dans la majorité des cas, les tubes en plastique (p. ex. PVC, PE) sont installés au cours d'une étape de travail séparée, après le forage, sur la profondeur souhaitée. L'abandon de tubage auxiliaire en acier dans le sous-sol, lors de l'usage de marteau en fond de trou appartient aussi à cette catégorie. Dans les deux variantes, des éléments de tubes individuels

doivent être assemblés par vissage. Lors de l'insertion, la variante avec les tubes en plastique présente le risque technique que, dans le cas de forages au marteau en fond de trou, le tube en plastique d'un diamètre légèrement inférieur (les tubes d'un diamètre de 125 mm sont usuels) se trouve engagé dans le tubage auxiliaire. Le tubage permanent risque alors de se déplacer au moment du retrait du tubage auxiliaire temporaire. En cas d'installation à une faible profondeur de forage, le risque de cette complication est toutefois considéré comme faible. L'installation de tubage permanent est par conséquent en principe plutôt adaptée à une utilisation à proximité de la surface.

Le fait que le tubage permanent soit relativement grand et encombrant et ne puisse donc pas être transporté aisément va à l'encontre de sa facilité de mise en œuvre. Une installation requiert en règle générale une livraison spéciale avec les coûts et les délais d'attente correspondants.

Il faut également prendre en compte que des diamètres de forage compris entre 135 et 178 mm sont généralement utilisés pour les sondes géothermiques, ce qui limite la place dans le puits de forage, surtout pour les sondes de plus grands diamètres (40 mm ou plus grand). Pour les mêmes raisons, le tubage permanent forme, avec la sonde géothermique, une construction assez compacte et donc rigide, ce qui empêche pratiquement toute combinaison avec d'autres systèmes d'étanchéité dans une plage de profondeur similaire.

### **3.1.3 Fiabilité en ce qui concerne la protection des eaux**

Les éléments de tube individuels, aussi bien ceux en acier qu'en plastique, peuvent être vissés hermétiquement et représentent un système d'étanchéité fiable lorsqu'il est correctement installé. Il est indispensable de choisir pour le tubage un matériau inerte dans les conditions chimiques données.

L'étanchéité assurée par le tube lui-même est toutefois limitée à la direction horizontale entre la sonde géothermique noyée dans le remplissage et la roche environnante, respectivement les eaux souterraines. Ce système n'offre pas une étanchéité fiable contre les flux d'eau verticaux sans cimentation de l'espace annulaire et du pied.

Il convient de mentionner en outre que tout dommage éventuel survenant lors de l'installation n'est pas visible et ne peut donc pas être corrigé.

### **3.1.4 Coûts**

Les coûts pour l'utilisation de tubes en acier sont élevés en comparaison aux autres (environ 200 Fr./m pour un diamètre standard). Les tubes en plastique sont beaucoup moins chers (environ 20 à 30 Fr./m pour un diamètre standard). Pour ces derniers toutefois, les coûts découlant de l'étape de travail supplémentaire doivent être intégrés dans les calculs. Les coûts dépendent de la longueur du tronçon à isoler de façon étanche dans le puits de forage.

### **3.1.5 Unités vendues**

Les tubages permanents sont rarement utilisés comme systèmes d'étanchéité dans le domaine des forages dédiés à des sondes géothermiques, si l'on compare avec les autres systèmes. Ceci s'explique par la complexité du tubage permanent qui est une solution coûteuse : prix des tubes

en acier, supplément de travail lié à l'installation de ce système, et complications éventuelles lors de l'insertion en raison d'un espace restreint dans le puits de forage.

Les chiffres effectifs de la part de marché du tubage permanent pour l'étanchéité des forages pour sondes géothermiques ne sont pas disponibles. Elle est cependant estimée à moins de 5%.

### **3.1.6 Mise en œuvre et risques**

Le tubage permanent ne fournit pas une étanchéité supplémentaire dans la direction verticale, il ne constitue pas une solution adaptée à l'étanchéification des flux d'eaux verticaux (p. ex. eaux souterraines captives) ou à la séparation de différentes nappes d'eaux souterraines.

Le tubage permanent est cependant tout à fait adapté pour protéger un aquifère du contact avec la suspension de remplissage ou avec d'autres substances dangereuses pour les eaux souterraines à l'intérieur du forage (p. ex. fluide caloporteur lors d'une fuite). De même, l'écoulement de la suspension de remplissage dans la roche environnante, dans les eaux souterraines ou dans les fissures et les cavités peut être évité de manière fiable. Puisque l'installation correcte devient plus exigeante d'un point de vue technique et plus susceptible d'être endommagée avec une profondeur croissante, son application est généralement recommandée dans les zones proches de la surface.

Lorsqu'il est réalisé correctement, le tubage permanent est dans l'ensemble un système d'étanchéité fiable mais aussi relativement complexe et coûteux.

## **3.2 Chaussette pour sondes géothermiques**

### **3.2.1 Description du système**

La chaussette pour sondes géothermiques (figure 2) est constituée d'un matériau imperméable à l'eau et au ciment sous la forme d'un film ou d'un géotextile extensible et pouvant être aisément glissé sur la sonde. Le remplissage s'effectue à l'intérieur de la chaussette qui vient s'appliquer contre la paroi du puits de forage. De cette façon le film évite un écoulement de la suspension de remplissage et fournit un habillage étanche par rapport à la roche environnante et aux eaux souterraines. La sonde géothermique peut être utilisée normalement.

La chaussette pour sonde géothermique remplit par conséquent une fonction similaire à celle du tubage permanent, à savoir maintenir la suspension de remplissage autour de la sonde géothermique et garantir l'étanchéité entre la sonde, y compris son remplissage, et la roche environnante ainsi que les eaux souterraines. Contrairement au tubage permanent, la chaussette est d'abord remontée sur la sonde puis enfouie avec elle dans le puits de forage. La chaussette est ensuite remplie avec une suspension de remplissage, qui va la presser contre la paroi du puits de forage et fournir une étanchéité verticale.

En pratique, la chaussette n'est souvent pas utilisée sur toute la longueur de la sonde géothermique mais seulement sur une certaine portion. Afin de garantir l'étanchéité, la chaussette doit être fixée correctement dans la bonne position avant le remplissage.

La sonde géothermique à membrane (brevetée par Broder AG) constitue une forme particulière de chaussette pour sonde géothermique. Il s'agit (de manière simplifiée) d'une sonde coaxiale (contrairement à la double sonde en U) pour laquelle le tube externe est remplacé par une membrane dense ou imperméable à l'eau, en tissu polyester, qui est pressé contre la paroi du forage par la circulation du fluide caloporteur (eau).

### 3.2.2 Facilité de mise en œuvre

La chaussette pour sonde géothermique est glissée sur la sonde géothermique et enfouie conjointement avec elle à la profondeur désirée dans le forage. Il ne s'agit donc pas d'une étape individuelle distincte, mais plutôt d'un supplément de travail lors de la préparation d'une sonde géothermique avant son introduction dans le puits de forage et son remplissage.

Ce supplément de travail a un coût généralement considéré comme acceptable. Il dépend toutefois aussi de la longueur de l'installation. En raison du diamètre restreint du puits de forage, il est de plus en plus difficile d'introduire la chaussette glissée sur la sonde, sans dommages, dans le puits. C'est notamment la raison pour laquelle les chaussettes sont souvent installées uniquement par tronçon. Des longueurs de chaussettes de l'ordre de 30 à 50m s'avèrent acceptables actuellement dans la majorité des cas, mais elles peuvent atteindre jusqu'à 100m de long si nécessaire. Un grand avantage réside dans le fait que la chaussette est relativement maniable et peut donc être introduite par l'équipe de forage de manière standard et combinée à d'autres systèmes d'étanchéité.



Il faut aussi tenir compte du fait que les tubes d'injection supplémentaires permettant de remplir la chaussette elle-même, ainsi que le tronçon du forage situé sous la chaussette, doivent être enfouis conjointement sous la chaussette, ce qui nécessite également de la place dans le forage. L'installation correcte, et surtout le remplissage professionnel de la chaussette ainsi que des tronçons situés en dessous et au-dessus, sont extrêmement importants pour le bon fonctionnement de celle-ci et nécessitent l'expertise et l'expérience de l'entreprise de forage.

Figure 2: Implantation d'une chaussette pour sonde géothermique (source: CSD Ingénieurs SA)

### 3.2.3 Fiabilité en ce qui concerne la protection des eaux

Correctement installée, la chaussette en textile est un système fiable pour éviter l'écoulement de la suspension dans le sous-sol lorsqu'elle est montée sur toute la longueur.

Néanmoins, si la chaussette est installée par tronçons et fixée à la sonde, il est difficile de vérifier si elle ne s'est pas déplacée par rapport au tube de la sonde au cours de l'installation et si elle est effectivement placée au bon endroit. De plus, l'étanchéification est difficile à assurer aux extrémités. En principe, il est recommandé d'installer la chaussette sur la longueur complète de la sonde géothermique.

Un risque de dégradation du géotextile existe généralement lors de l'insertion de la sonde et lors du retrait du tubage auxiliaire. Puisqu'il s'agit d'un système avec un textile flexible, un contrôle fiable de la perméabilité après installation – par exemple par la pression de remplissage de la suspension – est impossible dans l'état actuel des connaissances. Des dommages éventuels ne peuvent par conséquent ni être détectés, ni réparés.

Tout comme le tubage permanent, la chaussette est un système fiable pour fournir une étanchéité entre un aquifère et une sonde géothermique avec son remplissage, sur toute la profondeur de forage. L'étanchéité verticale du puits de forage n'est pas l'objectif principal de ce système. Contrairement au tubage permanent, cependant, la chaussette peut aussi contribuer à empêcher le flux vertical de l'eau car elle presse contre la paroi du puits de forage.

La fiabilité ne peut pas être évaluée de manière concluante car tout dommage éventuel, survenu lors de l'installation, est difficilement détectable et ne peut donc pas être réparé.

### 3.2.4 Coûts

Les coûts liés à l'utilisation de chaussettes pour sondes géothermiques sont généralement désignés comme acceptables ou relativement faibles. Ils se situent environ entre 20 et 50 Fr./m. Les coûts dépendent également de la longueur du tronçon à équiper dans le puits de forage. Un supplément de travail doit être pris en compte pour l'équipe de forage lors de l'installation et du remplissage.

### 3.2.5 Unités vendues

La chaussette pour sonde géothermique est souvent utilisée si l'on compare avec d'autres systèmes d'étanchéité. Elle est relativement bon marché et peut être installée sans grande dépense supplémentaire. De nombreuses entreprises de forage ont habituellement de tels produits, par défaut, sur le chantier ou au moins en stock. Ce système est généralement utilisé sur décision des autorités ou sur les instructions du géologue. Rarement, mais de plus en plus souvent, elle est installée à la propre initiative de l'entreprise de forage pour p. ex. agir contre la perte de suspension dans les cavités et les fissures.

Les chiffres effectifs de la part de marché de la chaussette en textile pour l'étanchéité des forages pour sondes géothermiques ne sont pas disponibles. Ils sont cependant estimés à environ 30 à 50%.

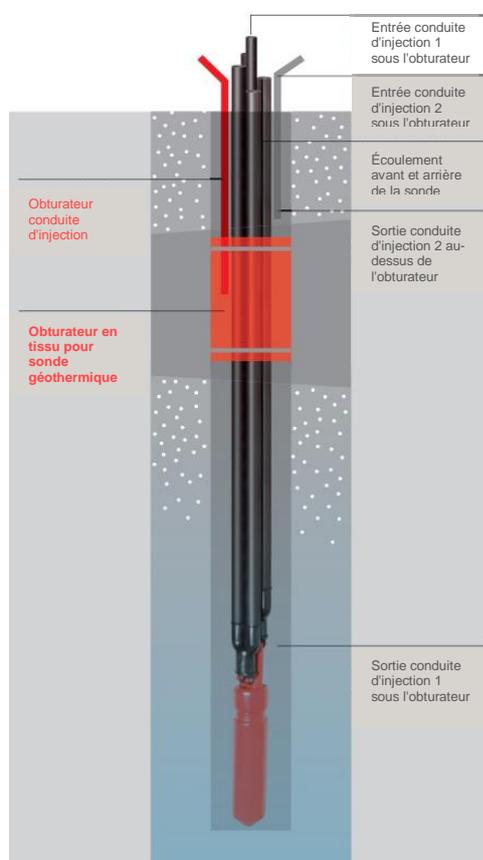
### 3.2.6 Mise en œuvre et risques

La chaussette pour sonde géothermique sert essentiellement à l'étanchéification horizontale du puits de forage en évitant l'écoulement de la suspension de remplissage dans la roche adjacente. Elle peut par ailleurs fournir une étanchéité verticale sur une plage de profondeur plus grande ou au moins apporter une contribution importante en association avec d'autres systèmes. Les possibilités d'utilisation sont donc variées et elle offre une solution fiable contre de nombreux risques. L'aquifère est étanchéifié par la sonde géothermique et le remplissage, tandis que la perte de suspension dans la roche meuble, les karsts, les fissures ou les cavités peuvent être évitées de manière fiable. Elle peut aussi contrecarrer l'écoulement vertical par l'étanchéification de la paroi du puits de forage en cas d'eaux souterraines captives. La chaussette peut contribuer à la séparation de nappes d'eaux souterraines ainsi que pour les puits artésiens, mais ne devrait être utilisée qu'en combinaison avec d'autres systèmes (p. ex. obturateur textile ou obturateur pour puits de forage).

Lorsqu'elle est installée correctement et sans dommage, la chaussette pour sonde géothermique fournit une protection des eaux souterraines fiable et polyvalente et peut être utilisée sur une grande plage de profondeurs.

## 3.3 Obturateur textile pour sondes géothermiques

### 3.3.1 Description du système



L'obturateur textile pour sondes géothermiques consiste en un flexible en textile filtrant (ou similaire) inséré à une certaine profondeur de forage (ou sur un certain emplacement de la sonde géothermique).

Contrairement aux systèmes d'étanchéité déjà mentionnés, l'obturateur textile pour sondes géothermiques a essentiellement pour objectif d'éviter un flux d'eau vertical. Il est placé directement sur la sonde au niveau de la profondeur à étanchéifier et enfoui conjointement avec la sonde. L'obturateur est constitué d'un textile filtrant qui est ensuite expansé sous pression avec une suspension de ciment, ce qui l'étend jusqu'à la paroi du puits de forage et forme ainsi une barrière étanche vers le bas et vers le haut. L'obturateur est placé autour des tubes des sondes à l'aide de manchettes d'étanchéité. Plusieurs obturateurs textiles peuvent être mis en place sur une même sonde. La sonde géothermique peut être exploitée normalement.

Figure 3: Schéma d'un obturateur textile sur une sonde géothermique (source: HakaGerodur AG)

### 3.3.2 Facilité de mise en œuvre

Tout comme la chaussette, l'obturateur textile pour sondes géothermiques est enfoui dans le puits de forage avec la sonde à la profondeur désirée. Il ne s'agit donc pas en soi d'une étape de travail individuelle et séparée. Un supplément de travail est induit pour l'entreprise de forage pour la préparation de la sonde géothermique avant qu'elle ne soit introduite dans le puits de forage par le dérouleur ainsi que lors du remplissage.

L'obturateur textile est généralement court. Le produit «Geotight» (voir figure 3) fait habituellement 2,5 m, mais peut être livré dans des longueurs plus grandes. Le supplément de travail dû à ce système d'étanchéité est généralement considéré comme acceptable. Il est en principe indépendant de la profondeur de pose, ainsi que de la profondeur du forage. Le risque de dommage lors de l'installation est relativement faible pour un obturateur textile. Il est considéré comme maniable, ne nécessite que relativement peu de place, comme la chaussette, et peut donc être installé de manière standard par l'équipe de forage.

Une fois l'installation réalisée, il est difficile de savoir si l'obturateur textile est installé correctement et à la bonne position. Il n'est de plus pas accessible pour une réparation. Il convient également de tenir compte du fait que des tuyaux d'injection supplémentaires pour l'obturateur textile lui-même ainsi que pour le tronçon du forage en-dessous doivent être enfouis conjointement, ce qui demande également de la place dans le puits de forage. L'installation correcte, et surtout le remplissage professionnel de l'obturateur textile ainsi que des sections supérieure et inférieure sont extrêmement importants pour garantir l'étanchéité et nécessitent l'expertise et l'expérience de la société de forage.

L'obturateur textile peut en principe être utilisé à n'importe quelle profondeur pour fournir une étanchéité verticale, et être combiné avec d'autres obturateurs textiles ou d'autres systèmes.

### 3.3.3 Fiabilité en ce qui concerne la protection des eaux

Contrairement au tubage permanent et à la chaussette pour sonde géothermique, l'obturateur textile est utilisé en priorité pour une étanchéité verticale et non horizontale.

Installé correctement, il peut éviter l'écoulement vertical des eaux de manière plus fiable et plus durable que les autres systèmes parce qu'il est rempli sous pression et peut former une barrière étanche entre la sonde géothermique et la paroi du puits de forage. Il est donc adapté principalement pour séparer de façon sûre deux nappes d'eaux souterraines, pour fournir une étanchéité lorsque des eaux superficielles sont polluées ou (le plus souvent) pour isoler de façon étanche un aquifère artésien traversé par un forage. Puisque l'obturateur textile est positionné autour de la sonde géothermique, celle-ci peut donc même être exploitée dans un puits artésien. En cas de pression artésienne élevée, l'installation d'une sonde et celle d'un obturateur textile sont toutefois impossibles. D'autre part, il est particulièrement important que l'obturateur textile soit rempli complètement avec une pression et un mélange parfaitement adaptés.

Il convient enfin de noter que la fiabilité ne peut être évaluée de manière définitive. Les dommages éventuels, survenus lors de l'installation, ne sont pas visibles et donc irréparables. L'obturateur est

fabriqué à partir d'un textile résistant. Lors de l'injection sous pression, l'étanchéité peut être contrôlée lors de la montée en pression au moyen d'un manomètre. Le tissu est en outre perméable à l'eau. Le processus de durcissement en est accéléré, ce qui facilite les interventions d'urgence ainsi que le contrôle.

### **3.3.4 Coûts**

Les coûts d'utilisation des obturateurs textile pour sondes géothermiques sont en général qualifiés d'acceptables, mais légèrement supérieurs aux coûts d'une chaussette pour sonde géothermique pour des longueurs comparables. Un supplément de travail est induit pour l'équipe de forage lors de l'installation et du remplissage et doit être pris en compte.

### **3.3.5 Unités vendues**

En comparaison aux autres systèmes, l'obturateur textile est souvent utilisé comme système d'étanchéité lors de forages pour sondes géothermiques parce qu'il peut être introduit sans grand travail supplémentaire. De nombreuses entreprises de forage disposent habituellement de tels produits sur le chantier ou du moins en stock. Il est généralement utilisé sur décision des autorités ou sur consigne du géologue.

Les chiffres effectifs de la part de marché de l'obturateur textile pour sondes géothermiques ne sont pas disponibles. Ils sont cependant estimés à environ 30 à 50%.

### **3.3.6 Mise en œuvre et risques**

L'obturateur textile pour sondes géothermiques sert principalement à fournir une étanchéité verticale. Il offre une protection fiable contre l'infiltration des eaux superficielles, permet d'isoler deux nappes d'eaux souterraines et permet de bloquer la sortie des eaux artésiennes.

Cependant, la longueur effective dans le forage n'est que de quelques mètres, ce qui est nettement inférieur à l'épaisseur typique des aquifères nécessitant une protection. Il est donc plutôt inadapté pour séparer l'ensemble de l'aquifère des sondes géothermiques traversantes et de leur remplissage.

En tenant compte de la place disponible dans le puits de forage, l'obturateur textile peut en principe être combiné avec n'importe quel autre système d'étanchéité ou avec d'autres obturateurs textiles pour sonde géothermique. Installé correctement, un obturateur textile garantit une étanchéité verticale fiable et durable du forage. Il peut être en principe installé à n'importe quelle profondeur.

## **3.4 Obturateur pour puits de forage (packer)**

### **3.4.1 Description du système**

L'obturateur pour puits de forage représente la forme la plus conventionnelle des systèmes d'étanchéité pour les puits de forage (voir figure 4). Tout comme l'obturateur textile pour sondes géothermiques, le principal objectif est d'éviter un écoulement vertical des eaux à une certaine profondeur de forage. L'obturateur pour puits de forage est introduit puis placé à l'endroit souhaité dans le puits de forage au moyen d'un tuyau ou d'une tige (par exemple celle d'un engin de

forage) puis expansé sous pression (p. ex. air comprimé) ou par compression le long de l'axe longitudinal jusqu'au remplissage complet du forage. L'obturateur peut en principe être installé et déplacé plusieurs fois.

Les obturateurs pour puits de forage appliqués aux sondes géothermiques sont souvent qualifiés d'«obturateurs flexibles» ou familièrement de «ballons».



Figure 4: Obturateur pour puits de forage (source: Comdrill Bohrausrüstungen GmbH)

Ce système d'étanchéité est essentiellement constitué d'un flexible expansible renforcé monté sur un tube en acier et peut être étendu par un tube supplémentaire. Le tube en acier est raccordé par un filetage avec la tige d'installation pour son positionnement correct dans le puits de forage puis libéré lorsque l'étanchéification a été réalisée avec succès.

### 3.4.2 Facilité de mise en œuvre

Tout comme l'obturateur textile, l'obturateur pour puits de forage doit être installé à une profondeur spécifique. Contrairement à l'obturateur textile, il n'est pas installé à la position souhaitée sur la sonde géothermique elle-même, mais au cours d'une étape de travail distincte, p. ex. par la tige d'installation de l'appareil de forage. Il faut systématiquement compter avec un travail supplémentaire important pour ce système, du moins en comparaison avec la chaussette ou l'obturateur textile installé conjointement avec les sondes.

L'obturateur pour puits de forage n'est pas rempli avec une suspension de remplissage mais expansé sous pression à l'aide d'un fluide approprié (p. ex. air). Un flexible supplémentaire doit donc être également introduit pour permettre l'acheminement du fluide sous pression. Cette étape comporte un risque de rupture. L'expérience montre que plusieurs essais sont parfois nécessaires avant de réussir l'installation.

L'obturateur pour puits de forage est considéré comme maniable, nécessite relativement peu de place, et peut en principe être installé par l'équipe de forage. Il constitue une solution idéale pour fournir une étanchéité verticale dans un puits de forage indépendamment de l'installation d'une sonde géothermique. De ce fait, des eaux artésiennes peuvent être arrêtées à n'importe quelle profondeur avec ce système, de manière pratique et fiable.

Dans le cas d'une venue d'eau artésienne, on peut juger depuis la surface de la mise en place correcte et à la bonne position de l'obturateur. Une bonne collaboration entre le contremaître foreur et le géologue est indispensable pour déterminer la position d'installation. Ce n'est qu'en combinant les constats issus des travaux de forage et les connaissances du géologue sur le sous-sol que la profondeur à laquelle le système d'étanchéité doit être mis en place peut être définie de manière optimale.

En principe, la partie du puits située au-dessus d'un obturateur peut encore être utilisée pour installer une sonde géothermique. Cela doit toutefois être évalué en fonction de la situation.

L'obturateur pour puits de forage peut être utilisé à n'importe quelle profondeur pour fournir une étanchéité verticale dans le forage. Aucune sonde géothermique ne peut toutefois être mise en place au-travers de ce système, de fait il n'est utilisé en général que pour les puits artésiens.

### **3.4.3 Fiabilité en ce qui concerne la protection des eaux**

Un obturateur pour puits de forage constitue une bonne solution pour une première intervention en cas de venue d'eau artésienne et est en règle générale employé si l'installation d'une sonde géothermique n'est plus autorisée à cause du puits artésien ou si aucun autre système ne peut être installé à cause de la pression artésienne trop élevée. Diverses expériences démontrent une bonne étanchéité immédiate même en cas de fortes pressions artésiennes, ainsi qu'un taux de réussite élevé.

Il doit être enfin mentionné que la fiabilité de ce système sur le long terme ne peut pas être établie de manière formelle en raison d'un manque d'études sur la durée.

### **3.4.4 Coûts**

Les coûts pour l'installation d'un obturateur de puits de forage sont surtout liés au supplément de travail pour l'équipe de forage et donc difficiles à chiffrer. Comme ceux-ci n'interviennent en général que si le puits de forage ne peut plus être utilisé (ou du moins plus sur toute sa longueur) pour l'installation d'une sonde géothermique, le coût supplémentaire de l'obturation et des éventuelles complications est modeste par rapport au coût de l'opération.

### **3.4.5 Unités vendues**

En comparaison avec d'autres systèmes d'étanchéité, l'obturateur pour puits de forage est globalement peu employé pour les forages prévus pour des sondes géothermiques. Il n'existe pas de chiffres effectifs sur la part de marché qu'il représente, ils sont cependant estimés à moins de 5% par rapport à toutes les mesures d'étanchéité considérées. Cela est surtout attribuable au fait qu'il est installé uniquement si aucune sonde géothermique ne peut ou ne doit plus être introduite à la profondeur correspondante.

### **3.4.6 Mise en œuvre et risques**

L'obturateur pour puits de forages sert uniquement à fournir une étanchéité verticale dans le puits. Il n'existe aucune possibilité de faire traverser une sonde géothermique. Cela signifie également que ce système n'est utilisé en pratique que lorsqu'il n'existe aucune autre option adaptée ou autorisée pour étanchéifier. Il est généralement utilisé en cas de venue d'eaux artésiennes.

Le forage peut ainsi être étanchéifié à n'importe quelle profondeur et de manière fiable lors d'une première intervention.

## **3.5 Autres techniques d'étanchéification**

Deux autres techniques pouvant fournir une étanchéité sont brièvement présentées ci-dessous.

### **3.5.1 Remplissage spécial**

Le remplissage lui-même joue un rôle majeur lors de l'exécution d'un forage pour sonde géothermique en protégeant la sonde ainsi qu'en assurant sa connexion thermique avec le sous-sol, il assure également une fonction d'étanchéité vis-à-vis de l'environnement et en particulier des eaux souterraines.

Le guide de mise en œuvre de l'OFEV pour l'utilisation de la chaleur du sous-sol décrit le mélange standard de bentonite, de ciment et d'eau. Le contremaître foreur a la possibilité de faire varier la pression d'injection et, selon la composition, d'influencer la densité et la viscosité de la suspension. Selon les exigences relatives à la protection des eaux, l'étanchéité n'est généralement pas considérée comme démontrée de manière durable sur le long terme.

Il existe par ailleurs différents produits sur le marché permettant de répondre à certaines exigences concernant la suspension de remplissage. Il existe par exemple des additifs dans des mélanges prêts à l'emploi, tels que des substances gonflantes (p. ex. minéraux argileux), qui peuvent prévenir un écoulement de la suspension en cas de petites fissures ou de cavités par accroissement de volume au contact de l'eau. Il existe aussi des additifs qui augmentent la densité de la suspension (p. ex. baryte). Dans les eaux souterraines à faible tension artésienne, c'est suffisant comme contre-pression pour agir hermétiquement contre celles-ci.

Il convient toutefois de noter que ces additifs pour le remplissage ne peuvent pas remplacer les systèmes d'étanchéité mentionnés ci-dessus. L'efficacité de leur utilisation sur le long terme est quasiment impossible à démontrer. Ils peuvent cependant représenter un bon complément. Après l'étanchéification d'un puits artésien à l'aide d'un obturateur pour puits de forage, la section du forage située au-dessus peut par exemple être remplie par une suspension enrichie en baryte.

Il faut toujours déterminer avec exactitude si tous les additifs du remplissage sont compatibles avec les eaux souterraines. D'autres exigences techniques, telles que les conditions de pression dans et autour de la sonde géothermique, doivent également être prises en considération.

### **3.5.2 Injections**

Les injections ne sont normalement utilisées lors de forages pour sondes géothermiques que si des eaux souterraines artésiennes sortent encore du puits rempli et achevé. Des matières synthétiques fluides (mousse de polyuréthane, ou résine synthétique) sont injectées dans le puits déjà durci et/ou le sol adjacent. Celles-ci durcissent et augmentent de volume, ce qui entraîne la densification et l'étanchéité désirée.

Pour stabiliser le terrain constructible ou pour assurer l'étanchéité entre les constructions et le sol, de telles méthodes d'injection ou des méthodes équivalentes sont déjà employées depuis longtemps avec succès.

Avec le procédé d'injection, les puits artésiens peuvent souvent être scellés ultérieurement avec succès. Cette méthode ne peut toutefois être employée qu'à des profondeurs maximales d'environ 10 à 20 m. Elle doit essentiellement être considérée comme une solution d'urgence relativement chère et compliquée, lorsque toutes les autres options ont été épuisées.

## 4 Synthèse des possibilités d'utilisation

Le tableau suivant récapitule les caractéristiques principales des systèmes d'étanchéité, basé sur les entretiens réalisés.

Système d'étanchéité	Étanchéité horizontale	Étanchéité verticale
Tubage permanent (PM < 5%)	Adapté Applicable proche de la surface Fiable quelle que soit la longueur du tronçon Installation de sonde possible Mise en œuvre lourde	Inadapté
Chaussette textile pour sonde géothermique (PM = 30 – 50%)	Adapté Applicable à n'importe quelle profondeur Fiable quelle que soit la longueur du tronçon Installation de sonde possible Mise en œuvre aisée	Adapté sous certaines conditions Applicable à n'importe quelle profondeur Fiable quelle que soit la longueur du tronçon Installation de sonde possible Contre artésien faible Mise en œuvre aisée
Obturbateur textile pour sondes géothermiques (PM = 30 – 50%)	Inadapté, ou seulement sur de très courtes sections	Totalement adapté Applicable à n'importe quelle profondeur Très fiable sur des sections limitées Installation de sonde possible Contre artésien faible à moyen Mise en œuvre aisée
Obturbateur pour puits de forage (packer) (PM < 5%)	Inadapté	Adapté Applicable à n'importe quelle profondeur Très fiable sur des sections limitées Installation de sonde impossible Contre artésien faible à élevé Mise en œuvre aisée

Tableau 3: Synthèse des systèmes d'étanchéité et leurs caractéristiques. PM = part de marché évaluée en fonction des entretiens (aucun chiffre effectif n'est disponible).

Nous nous limitons ici aux quatre catégories de systèmes d'étanchéité des chapitres 3.1 à 3.4, puisque les produits disponibles sur le marché peuvent généralement être classés dans ces catégories.

Un constat important de ce travail est qu'un classement en fonction du type d'étanchéité horizontale ou verticale est judicieux pour évaluer les propriétés de chaque système. Les principaux dangers peuvent être classés comme suit:

L'étanchéité horizontale du puits de forage dans le secteur d'un aquifère à protéger s'avère particulièrement pertinente dans les cas suivants:

- écoulement de la suspension dans les eaux souterraines, dans les cavités, les fissures, etc.
- entrée d'eaux superficielles polluées ou de fluide caloporteur dans le forage

L'étanchéité verticale du puits de forage est surtout pertinente dans les cas suivants:

- jonction de différents niveaux de la nappe phréatique et des circulations d'eaux
- puits artésien
- entrée d'eaux superficielles polluées ou de fluide caloporteur dans le forage

Le classement n'est pas absolu. Par exemple l'étanchéification horizontale et verticale peuvent être pertinentes dans une même mesure par exemple contre l'infiltration d'eaux superficielles polluées, et donc mentionnée dans les deux catégories.

Les points suivants, essentiels, peuvent être déduits et mis en avant :

- Le tubage permanent et la chaussette pour sondes géothermiques sont adaptés pour l'étanchéification horizontale du puits de forage. En se plaquant contre la paroi du puits, la chaussette peut en outre étanchéfier dans la direction verticale (au moins comme soutien, par exemple en combinaison avec un obturateur).
- Le tubage permanent devrait plutôt être employé en surface.
- La chaussette devrait être utilisée sur la totalité de la profondeur de forage et recouvrir la sonde géothermique en entier.
- L'obturateur textile pour sonde géothermique et l'obturateur pour puits de forage sont adaptés à l'étanchéification verticale de puits de forage. En raison de leur courte longueur standard ils sont moins adaptés pour fournir une étanchéité horizontale.
- Tous les systèmes d'étanchéité existent dans des versions de produits adaptées à une utilisation pratique et peuvent être installées moyennant un supplément de travail raisonnable. Le tubage permanent présente des inconvénients, notamment car il nécessite déjà beaucoup de place avant son installation, et ne peut pas être amené par défaut sur les chantiers.
- En matière de fiabilité, il manque des études ou des mesures sur le long terme, tout comme la possibilité de contrôler l'installation réalisée. L'efficacité ne peut être en pratique immédiatement constatée que pour l'étanchéification de puits artésiens. L'effet sur le long terme n'a toutefois pas été prouvé. Les produits disposent dans l'ensemble d'une certaine maturité et démontrent une bonne fiabilité.

- Le risque de dommages survenant pendant l'insertion est considéré comme supérieur pour la chaussette pour sondes géothermiques par rapport aux autres systèmes d'étanchéité, ce qui est dû au film géotextile.
- Pour fournir une étanchéité dans le cas de venues d'eaux artésiennes on peut employer la chaussette pour sonde géothermique (pour les faibles eaux artésiennes), l'obturateur textile pour sonde géothermique (pour les eaux artésiennes faibles à moyennes) ainsi que l'obturateur pour puits de forage (adapté même en cas de fortes pressions).
- Pour tous les systèmes, hormis pour l'obturateur de puits de forage, la sonde géothermique peut être introduite et utilisée sur la profondeur de forage initialement planifiée. L'utilisation d'une sonde géothermique au-dessus de la position d'un obturateur de puits de forage est en principe possible.
- Dans certaines circonstances, les différents systèmes peuvent ou doivent être installés en redondance ou combinés entre eux. Le diamètre limité du forage et l'espace disponible dans le puits constituent la limitation principale.
- Les coûts entre les différents systèmes d'étanchéité sont difficilement comparables. En effet, les prix du tubage permanent et de la chaussette pour sonde géothermique sont calculés au mètre, ceux de l'obturateur textile pour sonde géothermique et de l'obturateur de puits de forage sont à la pièce. En particulier lorsque l'installation nécessite une étape de travail supplémentaire (tubage permanent et obturateur de puits de forage), le prix d'achat du produit à installer n'est pas proportionnel aux coûts globaux, et ceci d'autant plus lorsque des temps d'attente et des livraisons spéciales sont nécessaires.

## 5 Conclusion

Nous tirons les conclusions suivantes sur la base des travaux, recherches et entretiens réalisés :

Une sensibilisation accrue s'est développée au cours des dernières années au sujet de la protection des eaux souterraines et des forages pour sondes géothermiques. Cette évolution est clairement perceptible. Des entreprises de forage toujours plus nombreuses participent activement à la recherche de solutions et l'élaboration de nouveaux produits d'étanchéification, tout en formant leurs contremaîtres foreurs de manière appropriée.

Les détails techniques relatifs aux différents systèmes d'étanchéité et plus particulièrement aux produits individuels ne sont que peu connus et pourraient être évalués au cours d'une étape ultérieure de la présente étude conjointement avec les fabricants.

Les produits permettant d'étanchéfier les forages pour sondes géothermiques sont devenus sophistiqués. Pour les forages dans les eaux souterraines, il existe généralement des solutions conformes aux exigences légales de la protection des eaux. Divers systèmes peuvent aussi être combinés si nécessaire.

Des lacunes ont été quelquefois observées dans les connaissances sur les systèmes d'étanchéité, sur leur utilisation ainsi que leurs avantages et inconvénients. Les expériences étaient souvent limitées à des systèmes individuels, voire à des produits individuels. Pour satisfaire les objectifs de protection des eaux, le système d'étanchéité, ou une combinaison de systèmes, doit être déterminé en adéquation étroite avec le ou les risques spécifiques encourus. En ce qui concerne la dénomination des systèmes et leur définition, de nombreuses interprétations et malentendus existent. La présente étude contribuera à les clarifier conjointement avec les fiches de l'OFEN.

Les informations sur les aquifères à protéger ainsi que sur la géologie du lieu de forage et de l'environnement proche sont toujours d'une grande importance. Des études préliminaires à ce sujet devraient déjà être réalisées suffisamment tôt dans la phase de préparation par le maître d'ouvrage conjointement avec les autorités et un bureau d'études géologiques. Des dispositions appropriées relatives à la protection des eaux peuvent ainsi être convenues lors de la prise de contact avec l'entreprise de forage. C'est la base d'une planification sérieuse et d'une mise en place conforme et augmente la probabilité d'identifier ou de prévenir à temps un potentiel supplément de travail.

Dans le cas idéal, le bureau d'études géologiques est impliqué lors de la planification et de l'exécution. Il a pour mission d'assister l'entreprise de forage et le client dans la réalisation d'un projet de sonde géothermique irréprochable autant du point de vue des installations techniques que de la protection des eaux. La répartition des tâches, compétences et responsabilités entre tous les participants doit être clairement définie pour l'ensemble du projet.

Dans le cas de projets plus importants, la réalisation d'un forage d'essai est recommandée. Il permet une planification optimale du forage pour la protection des eaux et le dimensionnement durable des installations.

Sur la base d'expériences et de constats issus d'installations existantes, ainsi que de la présente étude, nous proposons la démarche suivante pour la réalisation des forages pour sondes géothermiques qui met l'accent sur la protection des eaux :

- a. Concept réalisé par des géologues / planificateurs professionnels avec les autorités concernant la protection des eaux, la faisabilité technique et le dimensionnement des installations.
- b. Pour les champs de sondes géothermiques: forage d'essai suivi par un géologue pour améliorer le concept établi en a).
- c. Concept de forage, incluant (éventuellement) l'étanchéification du puits de forage, consultation avec les autorités, appel d'offres et adjudication des travaux de forage.
- d. Forage et réalisation de l'installation complète, selon les exigences techniques de protection des eaux et accompagnement approprié par un bureau d'études géologiques.

## 6 Sources

- 1) Fiche SuisseEnergie: Tubage permanent
- 2) Fiche SuisseEnergie: Chaussette textile pour sondes géothermiques
- 3) Fiche SuisseEnergie: Obturateur textile pour sonde géothermique
- 4) Fiche SuisseEnergie: Packer/obturateur pour puits de forage
- 5) Hess et al. 2015 pour SuisseEnergie: Contrôle de qualité des sondes géothermiques. Aperçu des méthodes de mesure pour contrôler le remplissage.
- 6) Poppei et al. 2017 pour SuisseEnergie: Sondes géothermiques dans une zone de construction dense – Investigation des conséquences et facteurs minimisants au moyen de cas exemplaires.
- 7) Poppei et al. 2017 pour la ville de Zurich, Office des bâtiments de la ville de Zurich: Distances à la limite dans les sondes géothermiques. Contrôles des nouvelles bases de mesure et de planification. Rapport final.

## 7 Annexe A Liste des acteurs interrogés

Organisation	<b>Office de l'environnement Uri</b>
Nom, prénom	Walker, Simon
Fonction	préposé à la protection des eaux
Rue, n°	Klausenstrasse 4
NPA, lieu	6460 Altdorf
URL	<a href="http://www.ur.ch/afu">www.ur.ch/afu</a>
Organisation	<b>Office de l'environnement Vaud / Direction générale de l'environnement (DGE), canton de Vaud</b>
Nom, prénom	Castella, Jérôme
Fonction	Responsable de domaine Eaux souterraines
Rue, n°	Valentin 10
NPA, lieu	1014 Lausanne
URL	<a href="https://www.vd.ch/autorites/departements/dte/environnement/responsables-par-domaine/responsables-eau/#c105454">https://www.vd.ch/autorites/departements/dte/environnement/responsables-par-domaine/responsables-eau/#c105454</a>
Organisation	<b>Augsburger Forages SA</b>
Nom, prénom	de Varreux, Nicolas
Fonction	Responsable technique - géothermie
Rue, n°	Rte d'Yvonand 2
NPA, lieu	1522 Lucens
URL	<a href="http://www.augsburger-forages.com">www.augsburger-forages.com</a>
Organisation	<b>Broder AG</b>
Nom, prénom	Mathias Broder
Fonction	Propriétaire
Rue, n°	St. Gallerstrasse 128
NPA, lieu	7320 Sargans
URL	<a href="http://www.broder.ch">www.broder.ch</a>
Organisation	<b>e-therm ag</b>
Nom, prénom	Buchli, René
Fonction	Directeur général
Rue, n°	Postgässli 23
NPA, lieu	3661 Uetendorf
URL	<a href="http://www.e-therm.ch">www.e-therm.ch</a>

Organisation **Geo Explorers AG**  
Nom, prénom Ebert, Andreas  
Fonction Co-directeur général  
Rue, n° Wasserturmplatz 1  
NPA, lieu 4410 Liestal  
URL [www.geo-ex.ch](http://www.geo-ex.ch)

Organisation **Blétry AG**  
Nom, prénom Blétry, Didier  
Fonction Propriétaire  
Rue, n° Benkenstrasse 52  
NPA, lieu 5024 Küttigen  
URL [www.bletryag.ch](http://www.bletryag.ch)

Organisation **CSD Ingénieurs SA**  
Nom, prénom Divers collaborateurs  
Rue, n° Hessestrasse 27d  
NPA, lieu 3097 Berne-Liebefeld  
URL [www.csd.ch](http://www.csd.ch)

Organisation **Haka Gerodur AG**  
Nom, prénom **Menzl, Michael**  
Rue, n° Mooswiesenstrasse 67  
NPA, lieu 9201 Gossau  
URL <http://www.hakagerodur.ch>

Organisation **HDG Umwelttechnik GmbH**  
Nom, prénom Müller, Tobias A.  
Rue, n° Am Rohrbach 14  
NPA, lieu D-88410 Bad Wurzach  
URL [www.hdg-gmbh.com](http://www.hdg-gmbh.com)

Organisation **Bospi SA**  
Nom, prénom Nadalet, René  
Rue, n° Bernstrasse 74  
NPA, lieu 4923 Wynau  
URL [www.bospi.ch](http://www.bospi.ch)

Organisation	<b>Comdrill Bohrausrüstungen GmbH</b>
Nom, prénom	Divers collaborateurs
Rue, n°	Im Kressgraben 29
NPA, lieu	D-74257 Untereisesheim
URL	<a href="http://www.comdrill.de">www.comdrill.de</a>