

Rapport final, le 01 avril 2018

Rapport «Matériaux cimentaires de remplissage des sondes géothermiques»

**Analyse et statistiques du marché,
exigences, caractéristiques et qualité des
matériaux de remplissage utilisés en Suisse**

Auteurs

Andreas Ebert
Geo Explorers AG
Wasserturmplatz 1
CH-4410 Liestal
www.geo-ex.ch

**La présente étude a été élaborée pour le compte de SuisseEnergie.
La responsabilité du contenu incombe exclusivement aux auteurs.**

Adresse

SuisseEnergie, Office fédéral de l'énergie OFEN
Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen. Adresse postale : 3003 Berne
Infoline 0848 444 444, www.suisseenergie.ch/conseil
energieschweiz@bfe.admin.ch, www.suisseenergie.ch

Contenu

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 1 | Introduction | 4 |
| 1.1 | Situation initiale | 4 |
| 1.2 | Objectifs du projet | 5 |
| 2 | Principes de base de la cimentation | 6 |
| 2.1 | Fonctions principales de la cimentation | 6 |
| 2.2 | Exigences complémentaires concernant les matériaux de remplissage | 7 |
| 2.3 | Etapes de travaux de mélange et de remplissage | 11 |
| 2.3.1 | Dispositions générales | 11 |
| 2.3.2 | Produits généralement mis en œuvre | 12 |
| 2.3.3 | Mélange: Procédés et exigences | 13 |
| 2.3.4 | Opération d'injection et de remplissage et leurs exigences | 16 |
| 2.4 | Composition du ciment et hydratation | 18 |
| 2.5 | Etat de la recherche et littérature | 19 |
| 3 | Exigences cantonales sur les matériaux cimentaires de remplissage pour les sondes géothermiques | 23 |
| 3.1 | Introduction | 23 |
| 3.2 | Démarche | 23 |
| 3.3 | Résultats | 24 |
| 3.4 | Bilan | 26 |
| 4 | Statistiques et assurance qualité des matériaux cimentaires mis en œuvre en Suisse | 28 |
| 4.1 | Introduction et démarche d'étude | 28 |
| 4.2 | Résultats et conclusions | 28 |
| 5 | Caractéristiques et comparaison des matériaux mis en œuvre | 33 |
| 5.1 | Exigences relatives aux matériaux de remplissage | 33 |
| 5.2 | Caractéristiques des matériaux cimentaires de remplissage et conditions de mélange | 34 |
| 5.3 | Influence du type et du mélange des matériaux de remplissage sur la qualité et la durabilité | 35 |
| 5.4 | Matériaux de remplissage améliorés | 36 |
| 6 | Analyse des matériaux de remplissage injectés | 39 |
| 6.1 | Démarche | 39 |
| 6.2 | Densités des suspensions échantillonnées | 39 |
| 6.3 | Résistance au gel des matériaux de remplissage | 42 |
| 6.4 | Autres caractéristiques des matériaux échantillonnés | 44 |
| 7 | Procédures de contrôle | 45 |
| 8 | Conclusions et recommandations | 47 |
| 8.1 | Exigences générales relatives à la cimentation | 47 |
| 8.2 | Exigences et recommandations cantonales | 47 |
| 8.3 | Matériaux de remplissage utilisés, qualité et recommandations | 48 |
| 8.4 | Matériaux de remplissage améliorés | 50 |
| 8.5 | Résumé: Comment varie la qualité des mortiers utilisés en Suisse | 51 |
| 8.6 | Résumé des recommandations d'amélioration | 51 |
| 9 | Observations finales | 52 |
| 10 | Références | 53 |

1 Introduction

1.1 Situation initiale

Le programme, lancé en 2001 par le Conseil Fédéral et dirigé par l'Office Fédéral de l'Energie, a pour but d'améliorer l'efficacité énergétique et de faire augmenter la part des énergies renouvelables. Il permettra d'apporter une contribution importante à la réalisation d'objectifs en matière de politique énergétique et de protection du climat. Le programme s'articule autour de la sensibilisation, de l'information et du conseil, ainsi que la formation, la compétence et l'assurance de la qualité sur divers points forts.

Les installations des pompes à chaleur avec sondes géothermiques peuvent, grâce à une bonne planification, une installation correcte et un fonctionnement adéquat, présenter une efficacité énergétique significativement supérieure à une pompe à chaleur air-eau. Etant donné que l'installation de sondes géothermiques demande un investissement de départ important en comparaison avec d'autres installations génératrices de chaleur, des paramètres tels qu'un fonctionnement efficace et des frais d'exploitation réduits sont déterminants pour l'amortissement des coûts d'installation. D'un point de vue de politique énergétique, il convient d'éviter que les installations avec un potentiel d'efficacité important ne soient pas entièrement exploitées. De plus, il faut noter que les sondes géothermiques non conformes peuvent présenter un danger pour les eaux souterraines.

Le présent travail a pour but d'améliorer la qualité et l'efficacité des sondes géothermiques et de mieux comprendre le marché actuel. Du fait que les sondes géothermiques ne sont que peu accessibles une fois qu'elles ont été mises en place, il est important qu'entre autres la mise en place de la sonde, l'installation et le remplissage soient réalisés correctement et avec la meilleure qualité possible. Cela implique aussi la réalisation d'un contrôle de qualité. Très peu de données concernant les matériaux de remplissage sont disponibles en Suisse pour le moment. Dans le cadre du projet SuisseEnergie, ce travail a donc pour but d'éclaircir ces points.

En Suisse, plus de 2'500'000 m de forages sont réalisés chaque année pour l'installation de sondes géothermiques. Pour ce faire, divers matériaux de remplissage provenant de fabricants différents sont utilisés. La plupart du temps, le mélange et l'injection de ces matériaux sont réalisés à l'aide de différentes méthodes. Afin d'assurer sur le long terme à la fois la protection des eaux souterraines et la fonctionnalité de la sonde, la qualité des matériaux de remplissage a une incidence considérable. La qualité et la durée de vie des matériaux ne sont pas les seuls critères déterminants ; il est aussi nécessaire d'avoir un mélange et une mise en place de qualité.

Actuellement, il n'existe aucun document synthétisant les types de matériaux de remplissage, leur lieu de mise en œuvre ainsi que leur fréquence d'utilisation. Il en va de même pour les exigences cantonales concernant ces matériaux, par exemple dans le cas où la protection des eaux souterraines doit être garantie. Malgré l'importance de la cimentation, les mélanges ainsi que le processus d'injection sont rarement contrôlés. A ce jour, il n'existe pas encore d'analyse complète concernant la qualité et la durée de vie des ciments de remplissage utilisés en Suisse.

Les objectifs exacts de ce travail sont décrits dans les chapitres suivants. Les travaux ont été effectués entre les mois d'août 2017 et de mars 2018.

1.2 Objectifs du projet

En Suisse, les sondes géothermiques sont autant cimentées avec le mélange standard proposé par le GSP (conditions de mélange prédéfinies et réalisées sur chantier) qu'avec des mélanges prêts à l'emploi de différents fabricants. En revanche, il est impossible de savoir si les prérequis du GSP ou des fabricants sont correctement appliqués et si tous les mélanges prêts à l'emploi remplissent les exigences de la directive de l'OFEV « Exploitation de la chaleur tirée du sol et du sous-sol » (2009).

La présente étude permet une investigation des points suivants:

- Analyse des caractéristiques des matériaux de remplissage et des exigences de mélange. Définition et comparaison de l'influence de divers matériaux de remplissage (en fonction des taux et types de mélange) sur la qualité et la durée de vie. Informations sur les possibilités de contrôle.
- Toutes les autres exigences cantonales éventuelles concernant les matériaux de remplissage et leur mélange.
- Clarification concernant la relation coûts-bénéfice des matériaux spéciaux avec une conductivité thermique améliorée, une résistance aux eaux sulfatées et une prise accélérée, y compris une évaluation de la conformité des produits proposés
- Recommandations pour une amélioration de la situation actuelle

Il existe différents matériaux de remplissage, diverses exigences, et diverses techniques de mélanges. Les contrôles, en particulier les contrôles de qualité, sont également réalisés de manières diverses. Le problème fondamental réside dans le fait qu'il est impossible de voir comment et avec quelle qualité le remplissage est réalisé, quelle est la qualité de la suspension injectée, et si les matériaux mis en œuvre respectent les exigences. Tous ces facteurs influencent la durabilité de la cimentation. Une mauvaise qualité de cimentation n'est révélée, en général, que plusieurs années plus tard, quand le système ne fonctionne plus de manière optimale (par exemple en raison d'une cimentation insuffisante, d'un mauvais contact avec la roche, ou d'une non-résistance au gel ou aux sulfates). La conséquence la plus défavorable serait le gel de la sonde car celle-ci ne produit plus assez d'énergie.

En raison de l'importance de la cimentation, des analyses détaillées seront réalisées:

- Sondage et statistiques à propos des exigences cantonales sur la cimentation et ses matériaux
- Analyses et statistiques sur les matériaux de remplissages utilisés et les procédures, sur la base d'un sondage auprès des entreprises de forage.
- Analyse des caractéristiques, de la qualité et de la durabilité de la majorité des matériaux de remplissage ainsi que des coulis spéciaux selon les exigences générales et les fiches techniques des différents fournisseurs ainsi que selon les références bibliographiques
- Analyse d'échantillons de ciments provenant de divers chantiers ainsi que de la manière de les mettre en œuvre (mélange, injection et tests de qualité)

2 Principes de base de la cimentation

Les exigences connues les plus importantes sont listées et décrites en détail dans le tableau suivant. Il repose essentiellement sur les exigences de l'OFEV (Aide à l'exécution de 2009), la norme SIA 384/6 et du Groupement professionnel suisse pour les pompes à chaleur (GSP), ainsi que sur les exigences en Allemagne et les publications reconnues et pertinentes. Les exigences décrites constituent la base de l'analyse des matériaux cimentaires et des étapes de leur mise en œuvre. Si ces exigences sont respectées, il est possible d'en déduire que la qualité de la cimentation est bonne. Les exigences seront dans la suite de ce travail séparées en deux sous-parties. La première décrit les exigences minimales et les fonctions principales du remplissage, qui proviennent essentiellement des autorités. Dans la deuxième, les informations complémentaires et détaillées relatives à la cimentation sont listées.

2.1 Fonctions principales de la cimentation

Chaque forage de sonde géothermique est cimenté après la mise en place de la sonde. Le remplissage doit répondre à certaines exigences relatives à la protection des eaux souterraines et aux exigences techniques du système thermique. Les exigences principales pour la cimentation des sondes géothermiques en Suisse sont mentionnées dans la norme SIA 384/6 et le guide de l'OFEV (2009) « Exploitation de la chaleur tirée du sol et du sous-sol ». De nombreuses autres exigences recommandées sont décrites et évaluées dans diverses publications (cf. chapitre 2.5).

Les principales tâches de la cimentation d'un forage géothermique ou de forages similaires sont (références correspondantes au chapitre 2.5):

| Fonction | Détail et utilisation |
|--------------------------|---|
| Contact avec le sous-sol | Le flux thermique doit être garanti avec le meilleur contact possible au sous-sol. L'énergie devrait pouvoir passer sans résistance, dans la mesure du possible, du sol à la sonde et inversement. |
| Étanchéité du forage | Elle permet essentiellement la protection durable des eaux souterraines (par ex. prévention contre les courts-circuits hydrauliques ou déperdition de fluide caloporteur dans le sol). Selon différentes études (voir les références au chapitre 2.5) et selon la société internationale pour les pompes à chaleur géothermiques, la perméabilité doit être d'environ $\leq 1 \cdot 10^{-9}$ m/s (selon l'OFEV 2009 et le GSP 2013 autour de $\leq 1 \cdot 10^{-7}$ m/s). Il convient de tenir compte du fait que la perméabilité de l'ensemble du système trou de forage – coulis de remplissage – sonde est généralement plus grande de une à deux puissances de 10 et dépendante du temps (la perméabilité diminue avec le temps). L'étanchéité à long terme est déterminée par le développement de la microstructure au cours de la prise mais aussi par l'ajout d'argile gonflante lors du mélange. Les coulis de remplissage sans argile ont généralement une perméabilité inférieure, en raison de la formation de fissures. L'étanchéification ou la prévention d'écoulement d'eau souterraine est obligatoire dans les roches sulfatées, afin d'éviter des dommages dus soit à la dissolution de gypse et aux tassements associés, soit à la transformation d'anhydrite en gypse et aux gonflements qui en résultent. Un exemple connu de cette situation est celui de Staufen (Allemagne). |
| Étanchéité de la surface | Permet d'empêcher que l'eau puisse s'infiltrer depuis la surface ou remonter vers la surface, ou pour empêcher la pollution des eaux souterraines. Des tassements du remplissage arrivent fréquemment |

| | |
|---------------------------|---|
| | dans les forages. C'est pourquoi les zones proches de la surface doivent subir un remplissage d'appoint, avec le matériau de remplissage ou des billes d'argile. |
| Assurance de la stabilité | Permet de stabiliser durablement le trou de forage et de prévenir les dommages sur la sonde. Cet état est atteint avec une résistance minimale. Selon l'OFEV 2009, la résistance à la compression devrait être de min. 1.5 N/mm² après 28 jours. En comparaison avec le béton du secteur du bâtiment dont la valeur minimale est de 20 N/mm ² , la valeur pour une sonde est très faible ! Pour que la valeur minimale soit atteinte, il faut non seulement un bon matériau, mais également une mise en œuvre et une compression correcte. |

Pour remplir ces conditions, un ciment standard tel que décrit dans la norme SIA 384/6 paragraphe F.3 suffit : 100 kg de bentonite + 200 kg de ciment + 900 l d'eau. D'autres exigences importantes relatives aux coulis de remplissage concernent des propriétés telles que la qualité, la durée de vie, la manipulation et la mise en œuvre, et sont décrites dans le prochain chapitre.

2.2 Exigences complémentaires concernant les matériaux de remplissage

De manière générale et de plus en plus fréquemment, de nouvelles exigences sont mises en place concernant les matériaux cimentaires de remplissage: des exigences thermiques, rhéologiques et mécaniques. Celles-ci sont dépendantes de la géologie, du système thermique, des aspects hydrogéologiques et de certaines demandes concernant la qualité et les finitions. D'autres exigences sont exposées dans le tableau ci-dessous (références correspondantes au chapitre 2.5):

| Exigences supplémentaires | Détail et utilisation |
|---------------------------|--|
| Densité | <p>La densité du coulis lors de l'injection dans le trou de forage doit être de minimum 1.1-1.3 kg/dm³ (OFEV 2009, GSP 2013, références bibliographiques au chapitre 2.5), afin que la boue de forage et l'eau puissent être intégralement refoulées hors du trou. La densité devrait être, selon la référence, d'environ 0.1-0.3 kg/dm³ plus importante que la boue et que l'eau souterraine. La plupart des densités se situent autour de 1.4-1.6 kg/dm³. La densité devrait être conforme aux indications du fabricant, contrôlée, et consignée ! Le rapport eau / particules solides devrait se situer entre 0.2 et 1.0 (préconisation du groupe de travail gouvernemental fédéral et des Länder 2015). Dans le cas où le rapport eau / particules solides est >0.4, il reste de l'eau dans les pores même après une hydratation complète. Plus la teneur en eau est élevée, moins les coulis de remplissage sont résistants au gel et, plus faibles sont la densité, la conductivité thermique et l'étanchéité, et plus la décantation est importante (Travaux de recherches du groupement EWS-tech 2016). Et dans le cas contraire, le coulis est plus facile à compresser.</p> <p>La densité du coulis doit être adaptée à la profondeur de la sonde, afin qu'il n'y ait pas d'écrasement des tuyaux de la sonde (SIA 384/6 F.3). La pression externe exercée par le ciment sur les tuyaux de sonde, qui est remplie avec de l'eau et bouchée de manière étanche, ne doit pas excéder la pression interne de plus de 8 bar (respectivement 12 bar) pour les sondes PN16 (respectivement PN20) que la pression interne</p> |

| | |
|------------------------|--|
| | ne doit pas excéder la pression externe de plus de 21 bar (respectivement 25 bar). |
| Conductivité thermique | <p>Une conductivité thermique optimale permet de s'assurer que le flux thermique entre le sous-sol et la sonde fonctionne bien. Il est préférable que la conductivité thermique du remplissage soit similaire aux roches du sous-sol, mais au moins égale au 0,85 W / mK du remplissage standard cité dans la norme SIA 384/6.</p> <p>Les coulis de ciment à capacité thermique améliorée grâce à des additifs tels que le graphite, la poudre de quartz ou la poudre de fer réduisent la résistance du trou de forage et permettent une meilleure conduction de chaleur ou de froid du sous-sol vers la sonde et inversement. Ceux-ci sont de plus en plus utilisés dans les champs de sondes géothermiques et pour les systèmes utilisant la chaleur et le froid. L'efficacité peut augmenter de plusieurs pourcent. Les matériaux thermiquement améliorés présentent des valeurs de conductivité d'environ 2 W / mK, qui en réalité, varient en fonction du type de mélange et des influences hydrogéologiques.</p> |
| Résistance au gel | <p>L'expérience montre que les systèmes peuvent atteindre des températures inférieures à 0°C, en particulier lorsque de durée d'utilisation du système augmente. (Rapport de l'OFEN 2017 «Analyse von Erdwärmesondenanlagen», Rohner & Rybach 2001). C'est pourquoi un antigel est utilisé comme caloporteur, permettant ainsi une exploitation au-dessous de 0°C. De plus en plus de cas de dégâts dûs au gel sont révélés.</p> <p>Pendant les processus d'allumage et d'arrêt de la pompe à chaleur, des cycles de gel-dégel se forment à proximité de la sonde lorsque la température de fonctionnement est inférieure à 0°C. Un matériau de remplissage qui n'est pas résistant au gel, comme par exemple le ciment standard défini dans la SIA 384/6 alinéa F.3 ou bien des matériaux prêts à l'emploi fréquemment utilisés, peut être abîmé suite à une alternance gel-dégel répétée. De par la création de glace et l'augmentation de volume de 9% qui l'accompagne, des fissures se créent sur le matériau de remplissage. A cause de l'infiltration d'eau souterraine dans la fissure, la structure est continuellement fragilisée par les cycles de gel-dégel successifs. De ce fait, le matériau de remplissage ne peut plus assurer ses fonctions d'étanchéité, de solidité et de bonne connexion au sous-sol, ni sa fonctionnalité et sa stabilité à long terme. En plus de l'extraction de chaleur plus faible et de la perte de protection des eaux souterraines, il peut y avoir des dommages secondaires, comme p.ex. des soulèvements ou des tassements. Le transfert de chaleur de moins bonne qualité conduit à des températures du système encore plus basses et consécutivement à un potentiel de dommage supplémentaire.</p> <p>Un rapport de contrôle indépendant concernant la résistance au gel-dégel devrait être exigé. Toutefois, il n'y a jusqu'à maintenant aucune méthode de contrôle standardisée pour la résistance au gel des matériaux de remplissage des sondes géothermiques. Différents travaux montrent que la façon d'effectuer les contrôles influence de manière déterminante les résultats (voir les références du chapitre 2.5). En principe, après de fréquentes alternances gel-dégel (p.ex. 6x selon VDI 4640), le matériau devrait présenter un faible et irréversible assouplissement de la structure. Pour cela, des critères judicieux sont p.ex. l'absence d'écaillage, une faible création de fissures, une masse constante, une perméabilité modifiée d'un ordre de grandeur tout au</p> |

| | |
|-------------------------|---|
| | <p>plus, des vitesses ultrasonores constantes, une proportion en minéraux argileux gonflants (voir aussi le chapitre 2.5). La meilleure protection antigél reste quand même un dimensionnement suffisant. Alternativement, il est également possible de renoncer à un antigél et de faire fonctionner la sonde géothermique avec de l'eau pure.</p> <p>L'importance de la résistance au gel du matériau de remplissage est souvent trop peu considérée. Cela est dû à la norme SIA 384/6 selon laquelle le dimensionnement devrait être fait de telle manière à ce que la température du fluide soit encore au min. à -1.5 °C après 50 ans et que le matériau de remplissage ne gèle pas ou que très partiellement. En Allemagne, le dimensionnement est moins généreux d'après le VDI. En conséquence, la protection contre le gel y est plus importante.</p> |
| Résistance aux sulfates | <p>La résistance aux sulfates est particulièrement demandée pour les zones contenant des couches riches en gypse et en anhydrite. Cela devrait permettre d'empêcher les eaux souterraines, agressives pour le ciment, de dégrader le ciment. Les sulfates font partie des substances contenues dans l'eau les plus agressives pour le béton et le ciment.</p> <p>En fonction de la composition du matériau de remplissage (aluminat tricalcique C_3A, sulfate, acide silicique, carbonate), des températures, du pH et de la concentration de sulfate, de l'ettringite (sulfate d'aluminat de calcium) ou de la thaumasite (sulfate calco-silico-carboné) peuvent se former (voir les références du chapitre 2.5). Cela conduit à une augmentation du volume (agitation du sulfate), respectivement à une dissolution qui mène à la création de fissures et à la désintégration de la structure.</p> <p>Par conséquent, la teneur en C_3A dans les matériaux résistants au sulfate ne devrait pas dépasser certaines limites, afin que l'ettringite ne puisse pas se former à l'aide de composés d'aluminium réactifs. Quant à la formation de thaumasite, des exigences plus hautes en particulier pour les agents liants sont posées (p.ex. une élasticité plus grande). Concernant la résistance au sulfate, il n'y a pas encore de processus de contrôle standardisés. C'est pourquoi les procédés de contrôle appliqués peuvent être remis en cause de manière critique.</p> |
| Exigences techniques | <p>Solidité : devrait arriver plus ou moins rapidement selon les exigences. Après 7 jours, la résistance à la compression monoaxiale devrait atteindre min 1 N/mm^2, et min. 1.5 N/mm^2 après 28 jours (OFEN 2009). L'expérience montre que la tête de la sonde est souvent ouverte rapidement après la cimentation. Ici, la résistance propre est importante, afin de pouvoir éviter l'écrasement des tuyaux de la sonde. Une faible désolidification assure une stabilité durable.</p> <p>Un léger retrait ou une fixation dans le trou de forage, afin qu'une constante de volume soit garantie. Afin que cela soit faible et qu'une solidité constante soit atteinte sur l'ensemble de la colonne du trou de forage, la suspension devrait être aussi stable et homogène que possible. Celle-ci est définie avec la décantation et plus particulièrement avec la sédimentation (OFEN 2009, GSP 2013: Retrait max. 2% de la profondeur du forage et max. 5 m).</p> <p>Un bon comportement thixotrope est un avantage pour une mise en œuvre optimale et une bonne compression. Il faut viser une fluidité avec une limite d'élasticité de $10 - 70\text{ N/m}^2$ (Préconisation du groupe de travail gouvernement fédéral et des Länder 2015). La viscosité de la</p> |

| | |
|------------------------|--|
| | <p>suspension devrait être assez faible de manière à ce que toutes les cavités soient remplies, mais aussi assez élevée pour que la suspension ne s'écoule pas inutilement dans le sous-sol. Pour cela, une mesure est le temps d'injection d'un litre de suspension depuis un entonnoir, qui devrait se situer entre 40-100 secondes (recommandations du cercle de travail Geothermie" 2015). La viscosité plastique est également une mesure avec des valeurs comprises entre 0.25 – 1.25 Pa*s (Travaux de recherches sur le sujet de concert avec les cantons EWS-tech 2016).</p> <p>Une durée de traitement optimale garantit une prise pas trop rapide afin qu'une cimentation complète puisse être garantie, mais que le matériau de remplissage se lie tout de même rapidement au trou de forage.</p> <p>Une grande résistance et une faible érosion sont aussi avantageuses pour des raisons économiques.</p> <p>Afin de protéger les tuyaux de la sonde, la chaleur d'hydratation ne devrait pas dépasser plus de 40°C les valeurs d'utilisation prescrites par les fabricants pour les tuyaux conventionnels de sonde.</p> <p>En raison de l'espace annulaire du forage plutôt restreint, de la proportion de clinker plutôt faible et de la dissipation de chaleur dans la roche / les eaux souterraines, la température augmente en principe jusqu'à un maximum de quelques °C (Touzin 2017). Une réaction lente et donc une dissémination plus faible de la chaleur d'hydratation est aussi importante pour le développement de la structure, car les réactions rapides et des températures hautes peuvent mener à des tensions, des rétrécissements et donc des fissures.</p> <p>En cas de mélanges prêts à l'emploi, les rapports de mélange sont obligatoirement à utiliser conformément aux consignes du fabricant. C'est seulement comme cela que les caractéristiques susmentionnées pourront être respectées. La densité du matériau de remplissage doit être prise en compte pour les forages profonds. Afin que les tuyaux de sondes profondes ne soient pas durablement écrasés, la recette du mélange ne devrait pas être changée, mais il faudrait utiliser un matériau de remplissage adapté avec une densité plus faible ou une cimentation par paliers (voir SIA 384/6, F.3).</p> |
| Impact environnemental | <p>Le matériau ne doit en aucun cas être nocif pour les eaux souterraines ; plus particulièrement, il doit être sans danger. Il doit être testé de manière appropriée. Cela concerne par exemple le pH qui ne doit pas augmenter de manière significative celui des eaux environnantes. Généralement, c'est au cours de la prise que certains incidents peuvent avoir lieu (par exemple, faibles augmentations de pH, pertes de coulis selon la perméabilité du sous-sol, réactions chimiques selon la chimie des eaux) mais qui au vu de la quantité peuvent être négligés. Les certificats d'essais correspondants doivent être disponibles.</p> |
| Stabilité chimique | <p>Selon la chimie des eaux, le matériau doit être stable en présence d'acide carbonique soluble dans le calcaire et de sels échangeables (sel de magnésium et d'ammonium). Une carbonatation mène à un rétrécissement ou à un gonflement selon l'humidité. Le pouvoir de gonflement des argiles en présence de sels solubles doit également rester inchangé, car sinon elles perdent leur effet étanche supplémentaire (p.ex. Préconisation du groupe de travail gouvernement fédéral et des Länder 2015 et Travaux de recherches sur le sujet de</p> |

concert avec les cantons EWS-tech 2016).

Afin d'assurer la **qualité à long terme** d'une sonde géothermique, des paramètres tels que l'étanchéité, la résistance au gel et la résistance aux sulfates sont primordiaux. Les autres paramètres sont bien plus déterminants pour le bon fonctionnement de la sonde sur le court terme. Si ces derniers ne sont pas réunis, ils auront également une influence sur le comportement à long terme de la sonde. Une grande **teneur en minéraux argileux gonflants** (la plupart du temps de la montmorillonite) favorise la durée de vie de la sonde, p.ex. grâce à la capacité de régénération, due à la capacité de gonflement durable lors de dégâts liés au gel ou à la présence de sulfates. Elle favorise aussi une plus grande résistance aux eaux agressives, une meilleure résistance au gel et un faible tassement.

2.3 Etapes de travaux de mélange et de remplissage

2.3.1 Dispositions générales

En Suisse, les exigences concernant la cimentation sont réglementées par les directives de l'OFEV (**Aide à l'exécution «Exploitation de la chaleur tirée du sol et du sous-sol», OFEV 2009**). La norme SIA 384/6 et la plupart des fiches techniques cantonales se réfèrent à ce document. Les conditions détaillées sur les matériaux de construction sont consignées dans les chapitres 2.1 et 2.2. Concernant la manière de mettre la cimentation en œuvre, il est écrit : « *Aussitôt que la sonde géothermique est en place, le trou de forage est rempli complètement et sans discontinuité, du fond jusqu'à la surface, en injectant une suspension durcissante et non gélive. Pour ce faire, on utilisera un tuyau distinct, fixé au pied de la sonde, qui restera dans le trou de forage. Les valeurs indicatives figurant à l'annexe A7 sont applicables pour obtenir une suspension appropriée. La quantité de suspension injectée doit être notée. Si elle dépasse le double du volume du trou de forage, il faut interrompre le remplissage et informer l'autorité compétente.* »

D'une manière plus détaillée, dans le paragraphe 6.17-20 du règlement du Groupement professionnel suisse pour les pompes à chaleur GSP (**Certificat de qualité pour Entreprises de forages de sondes géothermiques verticales (SGV), 2013**) on trouve la recommandation suivante : « *Sitôt que la sonde géothermique verticale est en place dans le trou de forage, procéder à l'injection complète d'une suspension durcissante plastique du pied de la sonde jusqu'à la surface. Le remplissage doit être effectué par le biais d'un tube supplémentaire restant dans le trou de forage, fixé au pied de sonde. Pour la suspension, les exigences minimales suivantes sont requises :*

- *Poids spécifique de la suspension : au minimum 1.2 kg/dm³ ou selon les indications du fabricant,*
- *Qualité à l'état durci : facteur de perméabilité $k_f < 1 \times 10^{-7}$ m/s, sans fissuration ni sédimentation (l'opale n'est pas admise). Le compactage de la suspension ne doit pas dépasser 2% de la profondeur de forage sur un maximum de 5m, sinon il convient de procéder à un remplissage complémentaire.*

Par exemple, le mélange standard suivant pour une suspension d'un m³ répond à ces conditions : 100kg de bentonite, 200kg de ciment et 900kg d'eau. Seuls des additifs sans danger pour l'environnement doivent être utilisés.

En cas de mélanges prêts à l'emploi, les rapports de mélange sont à utiliser conformément aux consignes du fabricant. Une installation d'injection au minimum par mission de forage doit être sur place. Le tubage ne doit être retiré qu'après avoir rempli avec succès la sonde géothermique. Après avoir rempli avec succès la sonde géothermique, un essai de débit et un essai d'étanchéité sont mis en œuvre et consignés par écrit conformément à la norme SIA 384/6. »

Dans la **norme SIA 384/6 F.3**, des informations complémentaires concernant la densité de la suspension sont fixées pour éviter un écrasement de la sonde. La pression différentielle de l'extérieur vers l'intérieur ne doit pas excéder certaines valeurs au niveau du pied de sonde en fonction de la résistance et de la longueur/profondeur de la sonde ainsi qu'en fonction de la densité du coulis de remplissage. Voir aussi les chapitres 2.2 et 2.3.2. Par exemple, une suspension d'une densité de 1.6 t/m³ peut être injectée dans une sonde type PN 16 seulement

jusqu'à 340m de profondeur ; au-delà, la pression au niveau du pied de sonde dépasserait rapidement la pression maximale autorisée de 21 bars. Une alternative possible est de réaliser une cimentation par palier ou de mettre en œuvre des matériaux moins denses. Par exemple, lorsque la suspension a une densité de 1.4 t/m^3 , la sonde bouchée et étanche à la pression pourrait être installée à plus de 400m de profondeur.

Il convient de noter que le coulis est à mélanger selon les indications du fabricant pour obtenir la densité voulue. Si un coulis moins dense est nécessaire, un mélange prêt à l'emploi ayant une densité plus faible par défaut doit être mis en place. Il existe de tels mélanges sur le marché avec des valeurs de densité d'environ 1.25 t/m^3 .

Le mélange en lui-même, les exigences complémentaires sur les matériaux, ainsi que les contrôles comme par exemple les essais sur site ne sont pas normalisées et rarement contrôlés. En conséquence, une grande variété de matériaux, de malaxeurs et de procédés d'injection sont utilisés (voir aussi le chapitre 4). De même, les contrôles du remplissage et des procédés d'injection sont effectués de manières diverses par les foreurs.

D'autres directives comparatives et détaillées sont présentes dans les documents suivants (voir aussi au chapitre 2.5):

Recommandations pour la géothermie de surface (dt. Arbeitskreis Geothermie, 2015)

Recommandations pour la perméabilité (dt. Bunt-Länderarbeitsgruppe, 2015).

La procédure générale lors de l'installation et la cimentation d'une sonde géothermique est décrite dans la Fig. 1 de manière schématique.

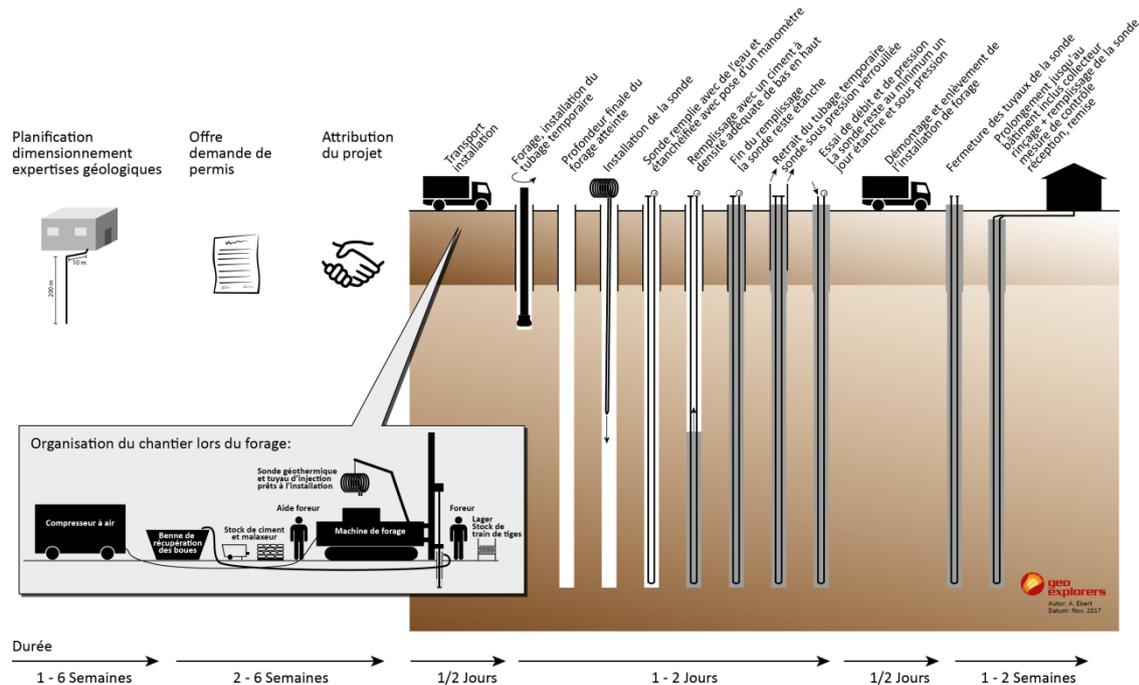


Fig. 1 Procédure de l'installation d'une sonde géothermique

2.3.2 Produits généralement mis en œuvre

La plupart du temps, des mélanges prêts à l'emploi en sacs sont utilisés. Les mélanges particuliers sont plus rares. Il existe différents produits dotés de propriétés variées (voir chapitres suivants). Lorsqu'aucune demande particulière n'est émise par l'autorité responsable ou le planificateur ou encore le client, des produits peu onéreux et faciles à travailler sont utilisés. Les avantages des mélanges prêts à l'emploi par rapport aux mélanges particuliers sont que les quantités injectées, leurs propriétés et les prescriptions du fabricant sont plus simples à contrôler. Grâce à ces matériaux, le danger que le remplissage ne respecte pas les conditions de résistance

au gel ou aux sulfates, d'étanchéité du trou de forage ou de conductivité thermique sont moindres. Il est important de prendre en compte les besoins et exigences spécifiques des produits utilisés comme par exemple : des propriétés thermiques améliorées, une densité moindre pour des sondes très profondes ou encore d'autres exigences règlementaires comme par exemple la résistance aux sulfates. Pour les sondes avec régénération ou à recharge thermique, il est important de noter que des températures élevées peuvent endommager le coulis de remplissage à cause d'une dessiccation et d'un rétrécissement du matériau.

2.3.3 Mélange: Procédés et exigences

Le ciment, la plupart du temps sous forme de mélange prêt à l'emploi, est mélangé à l'eau directement sur chantier puis immédiatement travaillé. Le mélange est réalisé par exemple à l'aide d'un malaxeur colloïdal.

La qualité et les propriétés des coulis de remplissage ne dépendent pas seulement du matériau mais aussi de la manière dont le coulis est malaxé puis mis en œuvre. La densité et l'homogénéité réelles du coulis sont aussi à prendre en compte, tout comme l'intensité de mélange et le temps de prise. Les systèmes de mélange doivent permettre un dosage approprié, un mélange suffisant et garantir un temps de malaxage et d'imbibition adéquats. Il s'agit de la seule manière pour que tous les composants du ciment (y compris les colloïdes) soient totalement intégrés. En général, des temps de malaxage allant de quelques minutes à dix minutes sont recommandés. Il est très important que la densité soit établie selon les instructions du fabricant. Celle-ci doit être mesurée et non estimée à l'œil nu comme c'est habituellement le cas. La densité peut être mesurée à l'hydromètre ou simplement en pesant un volume défini. De plus, il s'agit de contrôler que le coulis présente une bonne homogénéité, sans grumeaux et une viscosité correcte (par exemple, temps de malaxage d'environ une minute).

Généralement, trois malaxeurs différents peuvent être utilisés : des malaxeurs colloïdaux, des malaxeurs à mélange forcé ou continu et plus particulièrement des pompes mélangeuses à mortier et enfin le malaxage dans une cuve. En Suisse, une grande quantité de malaxages sont effectués à l'aide de malaxeurs à mélange forcé et de malaxeurs colloïdaux, même si le premier est légèrement plus courant. Les cuves sont en comparaison rarement utilisées (voir chapitre 4).

Malaxeur colloïdal (Fig. 2) :

Les matériaux en sacs et le ciment sont coulés à travers une grille avec de l'eau, dans une cuve de malaxage d'environ 150 l. Ils sont alors mélangés de manière homogène à l'aide d'un appareil de mélange ayant une force de cisaillement importante. Le mélange est ensuite pompé vers une seconde cuve de mouture (environ 150 à 300 l) dans laquelle est ajoutée la quantité optimale de minéraux argileux gonflants (colloïdes). A partir de là, le coulis est injecté via le tuyau d'injection dans l'espace annulaire, à l'aide d'une pompe à vis excentrée. Du fait de la présence de 2 cuves, le malaxage peut être effectué rapidement et il n'est pas nécessaire d'attendre longtemps jusqu'à ce que le mélange avec ajout de colloïdes soit prêt. La qualité du mélange peut être très bien contrôlée, de sorte à obtenir une suspension uniforme, homogène et stable, qui présente une sédimentation réduite et de bonnes propriétés d'écoulement. Il est nécessaire de respecter le rapport de mélange ainsi que les temps de mélange et d'hydratation du fabricant. La capacité de production est un peu plus importante que pour un malaxeur à mélange forcé ou un malaxeur continu. C'est pour cela qu'il consomme légèrement plus d'électricité et que sa manipulation est légèrement plus complexe.



Fig. 2 Malaxeur colloïdal

Malaxeur à mélange forcé / malaxeur continu / pompe mélangeuse à mortier (Fig.3):

Les matériaux en sacs et plus particulièrement le ciment sont déversés par une grille de remplissage dans une chambre en forme d'entonnoir. De là, ils sont transférés vers la chambre de malaxage à l'aide d'une vis sans fin. Dans cette chambre, le ciment est mélangé à de l'eau de manière continue et directement pompé vers le tuyau d'injection. Contrairement au malaxeur colloïdal, le coulis n'est pas réalisé en deux phases puis injecté, mais il est réalisé en continu.

Il existe diverses opinions concernant le fait de savoir si cette méthode permet un remplissage plus rapide ou non. Un avantage néanmoins conséquent est que le matériel est simple à manipuler et à mettre en œuvre. De plus, cette méthode oblige à travailler avec de l'eau claire. Cela rend impossible le mélange avec des boues ou eaux de forage, comme cela s'est parfois produit avec d'autres systèmes de mélange.

L'inconvénient de ce système par rapport aux autres est que le mélange peut être moins bien contrôlé ; une homogénéité et une densité correcte ne sont donc garanties que par l'ajout constant de ciment en sac et d'eau, l'ajout d'eau permettant de gérer la densité du coulis obtenu. L'expérience montre que certains foreurs ont une grande maîtrise du mélange, mais aussi qu'au cours du remplissage, l'alimentation en eau est régulée de manière aléatoire et que l'ajout de ciment se fait de manière lacunaire, impliquant que seule de l'eau est alors pompée. Des problèmes d'obstruction sont souvent observés au niveau de la vis d'injection ainsi que du tuyau. Ce genre de problème est probablement dû au fait que le rapport eau/solide n'est plus correct et/ou à une mauvaise homogénéisation du coulis. Les conditions de pression d'eau variables peuvent aussi être en partie responsables de ces dysfonctionnements.

Suivant les fournisseurs, il est recommandé que les utilisateurs soient régulièrement formés, que les malaxeurs soient correctement entretenus et il est nécessaire que la densité soit mesurée et enregistrée au début et à la fin du processus de malaxage avec une balance. L'apport d'eau doit lui aussi être correctement réglé pour obtenir un bon rapport eau/solide. De plus, le gonflement des argiles n'a lieu que dans l'espace annulaire.



Fig. 3 Pompe mélangeuse à mortier



Fig. 4 Cuve pour mélanger du coulis

Malaxage en cuve (Fig. 4):

Peu d'entreprises utilisent ce procédé pour le malaxage de leur coulis de remplissage. Cette technique permet le mélange de plus grandes quantités qui suffisent à remplir en une fois l'espace annulaire du trou de forage. Il est possible de malaxer des mélanges prêts à l'emploi tout comme des mélanges spécifiques. L'inconvénient est que selon l'estimation réalisée, la quantité ne suffise pas ou au contraire soit trop importante et doive donc être éliminée. Lors du malaxage d'une grande cuve, il convient de s'assurer que l'ensemble du volume soit mélangé de manière homogène, tout en maintenant une durée de mélange maximale. Et contrairement au malaxeur à mélange forcé, le malaxage en cuve présente l'intérêt de pouvoir contrôler l'homogénéité et la densité de la suspension plus aisément.

Lors du mélange du ciment avec l'eau, il est important d'observer les points suivants:

- Mise en œuvre de matériaux répondant aux **exigences** des chapitres 2.1 et 2.2. Des matériaux résistants aux sulfates seront éventuellement demandés.
- **Matériaux en suffisance** sur le chantier. L'expérience montre que ce n'est à maintes reprises pas le cas. Dans ce cas, le remplissage ne peut pas se faire sans interruption de bas en haut. Le volume nécessaire doit donc être calculé au préalable. Les pertes de ciment dans les géologies correspondantes (par exemple, karst ou zone de failles) doivent être compensées par l'incrément de masse correspondant. Le matériau doit être stocké à l'abri de l'humidité.
- **Densité de la suspension** et son **contrôle régulier** pendant le mélange, tout spécialement dans le cas du malaxeur à mélange forcé. La densité est la manière la plus simple et la plus précise de contrôler que le coulis est mélangé conformément aux instructions du fabricant (se référer aux fiches techniques des produits). Il s'agit de la seule manière pour que le coulis de remplissage présente une résistance adéquate et qu'il refoule entièrement et efficacement les boues de forage vers la surface. Si le coulis est trop liquide, le remplissage ne satisfait pas la résistance minimale exigée. Dans le pire des cas, il n'y a pas de durcissement. De plus, la conductivité thermique requise n'est pas être atteinte et le coulis peut se décanter et entraîner une mauvaise étanchéité vis-à-vis des eaux souterraines avec de potentielles arrivées d'eau susceptibles de geler et donc de causer des dommages à l'installation.
- **Homogénéité**. Le mélange ne doit pas être grumeleux.
- **Viscosité** selon les instructions du fabricant afin que le coulis puisse être injecté correctement et que la pression ne soit pas trop importante dans le tuyau d'injection.
- **Temps de fonctionnement**. Des valeurs élevées (impliquant une plus grande viscosité) peuvent être positives, de ce fait le trou de forage est rempli complètement et sans cavités.
- **Dépôt** doit se limiter à <1.5%.
- Le mélange ne doit **pas se décanter**.
- **Documentation** concernant le matériau utilisé, la date de production, la quantité nécessaire. Il s'agit de la seule manière de conserver un support en cas de dommages.

Pour les mélanges spécifiques, la vérification de la qualité est un problème. Dans le cas de mélanges prêts à l'emploi, la densité est souvent trop élevée (voir chapitre 6).

2.3.4 Opération d'injection et de remplissage et leurs exigences

Lors de l'installation de la sonde dans le trou de forage, un tuyau d'injection, attaché au pied de sonde, est installé en même temps. Les tubes de la sonde sont remplis avec de l'eau et verrouillés de manière étanche avant le début de la cimentation. Le verrouillage étanche de la sonde permet de minimiser la possibilité que les tubes de la sonde soient écrasés par la colonne de ciment dans le trou de forage. Selon la profondeur de la sonde et la densité du coulis, un deuxième tuyau d'injection peut être utilisé, par exemple jusqu'à la moitié du forage, afin de réaliser une cimentation par palier. Les bourroirs ne sont rarement voire jamais utilisés en Suisse.

Afin que le remplissage refoule complètement jusqu'à la surface, le comblement du vide annulaire doit être réalisé par injection sous pression. Le coulis, une fois mélangé, doit être injecté de bas en haut. L'injection se poursuit jusqu'à ce que le coulis émerge en surface du forage et que sa densité corresponde à celle qui a été introduite (cf. fig. 1). Cette dernière est évidemment dépendante de l'environnement du forage. Selon la machine de malaxage, le comblement se fait en continu ou par palier. Pour contrôler la pression dans la sonde (pour rappel, une pression maximale de l'intérieur vers l'extérieur de 21 bars est autorisée pour une PN 16 (voir chapitre 2.2)), un manomètre doit être monté sur la tête de sonde. Les tuyaux de la sonde restent verrouillés de manière étanche jusqu'à la prise du coulis. Celle-ci se fait suivant les phases d'hydratation qui peuvent prendre de quelques minutes à quelques heures (voir chapitre 2.4). Souvent, il est supposé à tort que le coulis s'est complètement durci en moins d'une heure.

Néanmoins, pour résoudre la problématique du retrait du tubage temporaire, des raccords étanches à la pression peuvent être utilisés. Ceux-ci sont utilisés par plusieurs entreprises de forage, de sorte à toujours pouvoir retirer le tubage temporaire. Si cela n'est pas possible, alors les tubes de sonde devraient à nouveau être mis sous pression le plus rapidement possible suite à la tentative de retrait. Le tuyau d'injection reste généralement dans le trou de forage et est également rempli.

Pour les sondes profondes, il est nécessaire de réaliser une cimentation par palier afin que les tubes de la sonde ne soient pas écrasés ou que la pression interne n'augmente pas trop. Ce cas s'applique, selon la densité du coulis, aux sondes de plus de 250m de profondeur. L'expérience montre toutefois qu'à de telles profondeurs, la pression est souvent trop élevée dans le tube de la sonde ou dans le tuyau d'injection et le processus doit donc être suspendu. Dans le cas d'une cimentation par palier, on poursuit le remplissage après un certain temps de pause (le coulis doit avoir commencé à durcir) à l'aide du second tuyau d'injection. L'expérience montre que souvent ce second tuyau est inséré ultérieurement dans le trou de forage, depuis le haut, et que l'injection se poursuit alors. Etant donné que le second tuyau d'injection est généralement court ou qu'il ne peut pas être placé à la profondeur nécessaire, la partie supérieure de la cimentation présentera sans doute des lacunes.

Les tassements au niveau de la cimentation ne peuvent pas être évités et sont fréquents. Pour des tassements faibles, les différences de hauteur peuvent être comblées par des granulés d'argile.

Lors de la cimentation, il convient de surveiller les paramètres suivants :

- Elle doit être **ininterrompue** du bas vers le haut afin qu'elle puisse être garantie sans vides (flux thermique garanti, aucune voie de circulation d'eau possible)
- Respecter les **prescriptions** des autorités compétentes, par exemple : mise en place d'un packer, d'une gaine étanche, d'un certain type de ciment (ex : résistants aux sulfates)
- **Coulis plus dense** que la boue de forage afin que les boues soient entièrement chassées vers le haut du trou de forage (généralement, une densité $\geq 1.2 \text{ kg/dm}^3$ environ est recommandée)
- Respecter impérativement les **indications du fabricant** afin que les propriétés telles que la conductivité thermique et la rigidité soient atteintes.
- Prendre en compte la résistance du **tuyau d'injection** (sur de courtes périodes, il peut supporter jusqu'à 34 bars, mais il arrive encore et toujours que certains tuyaux éclatent car le coulis est trop dense ou la pression d'injection trop élevée)
- Au cours du forage, le foreur doit **détecter les éventuelles cavités** et les référencer (par exemple, chute de l'outil de forage ou arrivées d'eau soudaines) afin de minimiser les risques de pertes de ciment non maîtrisables (par exemple, installation d'un packer avant une grande cavité)
- Lorsque des pertes de ciments sont attendues, par exemple dans les roches meubles, des **obturateurs textiles** ou des **chaussettes pour sondes géothermiques** peuvent être mis en œuvre pour les éviter
- Dans le cas d'**écoulements artésiens**, le coulis doit être alourdi par exemple avec de la barytine ou alors des matériaux spéciaux à prise ultra rapide doivent être mis en œuvre

- **Contrôler et documenter** la pression dans les tubes de la sonde, la densité du coulis, sa quantité et son homogénéité
- **Signaler** les pertes au géologue



Fig. 5 Remplissage qui sort de la tête de puits

Paramètres influençant la qualité de la cimentation :

- Généralement, elle est arrêtée lorsque la suspension arrive à la tête du puits. En fait, cette dernière devrait continuer à sortir jusqu'à ce que la densité corresponde à celle de la suspension compressée. Selon l'environnement, p.ex. dans un jardin, ce n'est pas toujours réalisable en pratique !
- Des entretoises ou le centrage aident à minimiser les vides dans la cimentation, mais compliquent la mise en œuvre. Le positionnement des tuyaux de la sonde influence le profil de température dans le remplissage et donc également une éventuelle congélation partielle.
- En principe, la qualité de la cimentation est influencée par les paramètres suivants : pas de vides (la position tridimensionnelle des tuyaux de la sonde (p.ex. comme torsadé) influence également la présence de vides), eaux souterraines / géologie, type de ciment / densité du ciment, homogénéité, profondeur du forage, surface de la sonde.

2.4 Composition du ciment et hydratation

Les ciments de remplissage standards sont constitués de composants principaux comme le clinker de ciment et la bentonite mais aussi d'additifs comme la silice (sable de quartz). Le ciment est cuit dans un four à 1450°C à partir d'une mouture de calcaire, argile/marne, quartz ainsi que des oxydes de fer, et il est possible d'ajouter du gypse/l'anhydrite (ciment portland). Au cours de la cuisson apparaissent les composants principaux à savoir les silicates tricalciques (C₃S ou

$3 \text{ CaO} \times \text{SiO}_2$), des silicates bicalciques (C_2S ou $2 \text{ CaO} \times \text{SiO}_2$), des aluminates tricalciques (C_3A ou $3 \text{ CaO} \times \text{Al}_2\text{O}_3$) et enfin des aluminoferrites tétracalciques ($\text{C}_4(\text{A},\text{F})$ ou $4 \text{ CaO} \times \text{Al}_2\text{O}_3 \times \text{Fe}_2\text{O}_3$). Plus le ciment est finement broyé, meilleure est la résistance et ainsi meilleure est la vitesse de réaction du clinker. Selon les propriétés demandées, d'autres additifs (comme le graphite) peuvent être ajoutés pour une conductivité thermique plus importante.

Le ciment est utilisé comme liant hydraulique et durci par ajout d'eau jusqu'à obtenir un remplissage stable. Au cours de l'hydratation, les réactions permettent la création de silicates de calcium hydratés (CSH) et d'ettringite (trisulfoaluminate de calcium hydraté) (voir par exemple Taylor, 1992). Le mélange ciment-eau présente un rapport de 0.3 à 0.8. L'hydratation peut grossièrement être divisée en trois phases délimitées par la création des diverses structures hydratées dans les espaces poreux: raidissement, solidification et durcissement des structures. La vitesse de réaction et sa durée dépendent principalement de la taille des pores et du ratio eau/ciment. La résistance est déterminée en fonction de la teneur en argile par la construction de silicates de calcium ou de silicates d'aluminium hydratés.

Au cours des premières minutes et jusqu'à 2 heures, les sulfates de calcium et les sulfates alcalins sont dissous. Ceux-ci réagissent ensuite avec les différentes phases du clinker et aboutissent en premier lieu à la formation de cristaux d'ettringite et de CSH. Ceux-ci sont cependant encore trop petits et ne remplissent pas les espaces poreux; ainsi, il ne forment pas encore de structure solide. La structure n'a que peu de rigidité et reste instable. Entre 2 à 24 heures après le mélange, une hydratation intensive des phases du clinker se produit. Grâce à la croissance progressive et à l'imbrication des cristaux des CSH et d'ettringite, une structure de base se crée et les espaces poreux se remplissent. La vitesse de réaction se réduit avec la diminution du nombre de phases actives du clinker. La suspension se fige de plus en plus. Entre 2 et 28 jours, les produits d'hydratation continuent à grandir dans les espaces poreux et stabilisent la structure. Le matériau acquiert sa solidité.

Pendant l'hydratation, de la chaleur est libérée. L'énergie thermique ainsi libérée dépend de la quantité de matériau et de la composition du clinker de ciment. Puisque, en comparaison avec le béton, seule une faible solidité est requise dans le domaine des matériaux de remplissage, la proportion du clinker de ciment est plus petite. Par conséquent, moins de chaleur est libérée. La chaleur libérée peut être mesurée dans les sondes géothermiques. Le réchauffement se situe entre quelques dixièmes et quelque °C et devient négligeable après 10 jours tout au plus (Touzin, 2017).

2.5 Etat de la recherche et littérature

Les exigences principales pour la cimentation des sondes géothermiques en Suisse sont mentionnées dans la norme **SIA 384/6** et le **guide de l'OFEV (2009) « Exploitation de la chaleur tirée du sol et du sous-sol »**. De la même manière, les exigences minimales du remplissage sont décrites dans le **Certificat de qualité de SGV §6.17** et dans différentes fiches techniques des cantons. Ces dernières se réfèrent la plupart du temps à la SIA et à l'aide à l'exécution.

En Allemagne particulièrement, quelques enquêtes de qualité des matériaux de remplissage pour les sondes géothermiques ont été menées ces dernières années. Mais la plupart se réfèrent à des essais de laboratoire. Certains Etats allemands ont publié des études et guides détaillés. Pour le présent travail, les publications suivantes sont pertinentes. Seules les plus actuelles sont listées, car elles résument, décrivent en détail et actualisent les travaux plus anciens.

L'étude **« Recommandations pour la géothermie de faible profondeur – planification, construction, exploitation et surveillance – EA géothermie » du groupe de travail « géothermie » de la section Hydrogéologie et Géologie de l'ingénieur** (de 2015) constitue un résumé succinct de l'état actuel des connaissances et des exigences en matière de remplissage. Il décrit également la manière de réaliser un remplissage correct.

Les travaux académiques suivants se sont surtout concentrés sur les exigences concernant les matériaux de remplissage et les méthodes de contrôle, en particulier relativement à la résistance au gel, qui sont déterminantes pour la qualité à long terme des sondes géothermiques :

La thèse de **Herrmann, V.J. (2008) „Etudes de géologie de l'ingénieur sur la cimentation de trous de forage géothermiques avec des sondes géothermiques“**. Dans ce travail, différents

matériaux de remplissage utilisés pour les sondes géothermiques ont été testés sur leur résistance au gel en laboratoire et dans le cadre d'expériences à grande échelle. Dans ce cadre-là, des méthodes de contrôle ont aussi été examinées et adaptées. Par ailleurs, des matériaux de remplissage ne formant pas de fissures lors des cycles de gel-dégel ont été développés. Les cimentations non-résistantes au gel se fissurent suite aux cycles de gel-dégel et les tuyaux de la sonde se décollent. Les mélanges standardisés et prêts à l'emploi sont certes fluides et faciles à pomper, mais ne résistent généralement pas au gel. On a pu y constater des fissures irréversibles par toutes les méthodes de contrôle. Plus la suspension était aqueuse, plus le matériau était endommagé.

Les critères de résistance au gel sont p.ex. l'endommagement microscopique et macroscopique de la structure, la variation de la vitesse d'ultrasons ou de la constante de masse. L'échantillon ne devrait présenter aucune fissure d'une largeur >0.1 mm. La dégradation, à savoir la perte de poids après chaque cycle gel-dégel devrait être inférieure à 1g. Les champs de vitesse des ondes restent constants dans les deux directions axiales. La dilatation verticale de l'échantillon est de $<1\%$. De plus, le E-module dynamique devrait être $>75\%$ après 28 jours.

Lorsque le rapport eau / matière solide était de >1 , l'échantillon se désintérait complètement. Lorsque ce rapport était d'environ 0.4, les échantillons présentaient également des fissures mais ne désagrégeaient pas. Des ciments avec un processus de durcissement plus lent tendaient à être moins dommageables. Les matériaux résistants au gel avaient une teneur en eau plus faible, avec des valeurs eau-matière solide d'env. 0.25 (env. 20% du poids). Moins il y a d'eau dans le système, plus la chance que des lentilles de glace et des fissures se forment suite à des augmentations de volume est faible. Les points suivants influencent les résultats des tests: la taille, la forme et le récipient de l'échantillon, l'emplacement et la manière dont le gel fait effet, l'espace entre les échantillons, l'humidité et la taille du compartiment. P.ex. les échantillons doivent rester humides pendant le test et avoir une grandeur minimale définie.



Fig. 6 Mélange prêt à l'emploi après 0, 2 et 4 cycles de gel-dégel

De la thèse Herrmann 2008. Mélange prêt à l'emploi à base de quartz avec 32% en poids d'eau.

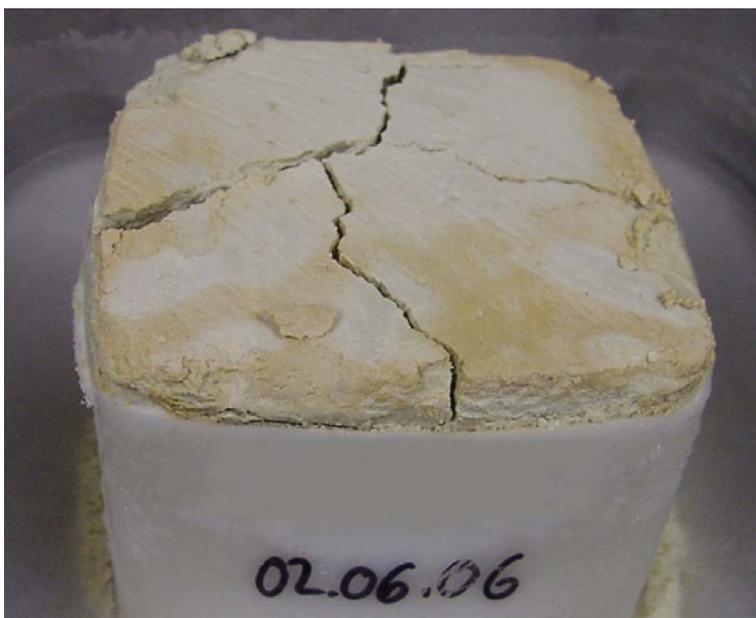


Fig. 7 Mélange standard après 6 cycles de gel-dégel

De la thèse Herrmann 2008. Mélange standard selon la norme SIA 384/6.

La thèse de **Anbergen, H. (2015) „Processus de contrôle pour définir l'influence de l'alternance gel-dégel sur les matériaux cimentaires de remplissage pour les sondes géothermiques“**. En raison de l'absence d'un processus de contrôle standardisé, ce travail en a développé un pour les matériaux de remplissage, l'a testé sur différents matériaux et l'a vérifié numériquement. Le processus de contrôle se base essentiellement sur une mesure reproductible de la perméabilité du système après les cycles de gel-dégel, car celle-ci augmente avec les dommages liés au gel en raison de la désintégration de la structure, p.ex. à cause des fissures. Les critères de contrôle étaient la dispersion de la masse de l'échantillon, le gel de l'intérieur vers l'extérieur sur un tuyau de sonde intégré à l'échantillon et la mesure directe de la conductivité hydraulique. Il a été constaté que l'étanchéité du système tuyaux de sonde et remplissage est de deux ordres de grandeur plus faible que le matériau seul (dépendant de l'état de la surface des tuyaux de la sonde), et que les premières alternances gel-dégel sont déterminantes pour l'étanchéité. Après 6 cycles de gel-dégel, une conclusion définitive est possible, sachant que le coefficient de perméabilité ne change presque plus. Le coefficient de perméabilité du système général augmente d'en moyenne 10^{-7} à 10^{-8} m/s jusqu'à 10^{-7} à 10^{-6} m/s pendant l'alternance gel-dégel, donc en moyenne de max. trois ordres de grandeur. Ces valeurs hautes se réfèrent aux matériaux de remplissage sans minéraux argileux susceptibles de gonfler, car un gonflement ultérieur n'est pas possible. Les changements de perméabilité sont spécifiques au matériau, ce qui veut dire que chaque produit présente au départ une perméabilité différente, mais que celle-ci change chez chacun pendant les 6 premiers changements gel-dégel. Dans ce cadre-là, il faut prendre en compte l'âge de l'échantillon, car les échantillons plus anciens sont moins perméables. De plus, le travail compare et évalue plusieurs méthodes de contrôle existantes.

Les **travaux de recherche sur le sujet de concert avec les cantons EWS-tech (2016)** sont plus complets. Dans ceux-ci, lors d'essais en laboratoire et à grande échelle, différentes méthodes de contrôle sur des matériaux de remplissage usuels et thermiquement améliorés ont permis d'examiner les propriétés d'étanchéité, de rhéologie, d'homogénéité, de stabilité ainsi que les influences environnementales comme l'eau et la température, et la qualité des matériaux de remplissage (durée de vie, perméabilité,...). De plus, différents paramètres ont été étudiés, comme la variation du rapport eau/particules solides ou la durée de mélange. Il en est ressorti que la plupart des méthodes de contrôle produisent des résultats similaires.

Un groupe de travail du gouvernement fédéral et des Länder du service géologique étatique en Allemagne a élaboré une « **Recommandation concernant les exigences sur la perméabilité hydraulique du système de sonde géothermique** » (2015), dans laquelle beaucoup de données de base existantes sur les exigences et propriétés des matériaux de remplissage, de leur

mélange, injection et contrôles sont réexaminées. Afin de protéger les eaux souterraines et le bon fonctionnement de la sonde géothermique, le coefficient de perméabilité du système entier (forage – cimentation – tuyau de sonde) doit atteindre min. $1 \cdot 10^{-9}$ m/s pendant toute la durée de vie, en prenant en compte la présence de sulfate et de gel, et les propriétés souhaitées du matériau (conductivité thermique, plasticité, retrait,...). Des exigences minimales concrètes et des critères d'évaluation du matériau sont donnés dans le tableau 5. Plus la teneur en minéraux argileux gonflants est élevée, plus la densité, plus la régénération par la capacité de gonflement prolongée lors p.ex. de dommages dus au gel ou aux sulfates, plus la durabilité, la résistance contre les eaux agressives et la résistance au gel sont hautes et plus la possibilité de déformation est faible.

D'autres **examens d'aptitude** complets de différents matériaux d'injection pour les sondes géothermiques en **Autriche** sont décrits dans le rapport de **Niederbrucker & Steinbacher (2007)**. Ils montrent très bien que les mélanges standard ou particuliers présentent clairement une qualité inférieure aux mélanges prêts à l'emploi quant à la solidité, à la décantation, à la résistance au froid, à l'étanchéité et à la conductivité thermique, ou n'atteignent en partie pas par les exigences minimales.

3 Exigences cantonales sur les matériaux cimentaires de remplissage pour les sondes géothermiques

3.1 Introduction

La réalisation d'un forage peut créer des éventuelles circulations d'eau artificielles. Celles-ci doivent, pour des raisons de protection des eaux souterraines, être arrêtées rapidement et de la meilleure manière possible. Ce rôle doit être joué par les matériaux cimentaires de remplissage. Ainsi, les autorités cantonales n'autorisent un forage que lorsque qu'une cimentation correcte est possible et aussi mise en œuvre afin que les eaux souterraines restent protégées. Selon la géologie, des coulis spéciaux, des chaussettes pour sondes ou autres sont exigés, ou alors le forage n'est pas autorisé. De plus, il est important pour les autorités cantonales de veiller à la compatibilité environnementale et à la longévité des matériaux de remplissage pour la protection des eaux souterraines.

La directive de l'OFEV de 2009 constitue une base importante, à laquelle la majorité des autorités cantonales se réfèrent (conditions et exigences définies au chapitre 2). Puisque le sous-sol change, parfois de manière notable, d'un canton à l'autre, les exigences en matière de matériaux de remplissage sont aussi différentes. Dans les domaines karstiques ou présentant des couches riches en gypse et en anhydrite, les exigences sont autres que dans le bassin molassique par exemple. Par conséquent, les exigences cantonales seront analysées.

3.2 Démarche

Les sites internet des cantons ont été analysés par rapport aux exigences concernant les matériaux de remplissage. Dans ce cadre, les éléments recherchés étaient les fiches techniques ainsi que tous les renvois à la norme SIA 384/6, au GSP ou à la directive de l'OFEV. Dans certains cantons, les notices de demandes d'autorisation, dans lesquelles des informations relatives à la cimentation sont disponibles, étaient jointes. De plus, des informations comme le fabricant, le type, la quantité ou la conductivité thermique du matériau peuvent être demandées dans la demande d'autorisation. Une recherche toute particulière a été réalisée pour savoir si des exigences plus poussées comme par exemple dans la directive de l'OFEV 2009 étaient d'usage. Sur la base des informations accessibles ou de celles déjà connues, des questions concrètes ont été posées aux responsables des autorités cantonales. Les questions suivantes ont été posées pour plus particulièrement vérifier ou corriger nos recherches :

Par rapport aux exigences, renvois aux fiches techniques, autorisation et demande:

- Conditions générales de remplissage visibles sur la page d'accueil du site (par exemple fiche technique, liens ou renvoi direct à la norme SIA 384/6, au GSP, à la directive de l'OFEV)
- Conditions relatives au remplissage citées dans le permis (par exemple, fiche technique jointe, condition inscrite sur le permis)
- Détails des matériaux de remplissage cités dans la demande (par exemple fabricant, type, quantité, conductivité thermique)
- Indications sur les potentiels problèmes lors de la cimentation (par exemple karst, eaux souterraines) et sur les mesures appropriées à prendre, par exemple dans le permis?
- Quelles sont les mentions concrètes relatives à la cimentation et plus particulièrement les exigences additionnelles ? (par exemple cimentation du bas vers le haut, ciments spéciaux par exemple résistants aux sulfates, chaussette pour SGV dans le secteur Au, ...) ?
- Quand, où et pourquoi les exigences spéciales interviennent-elles (par exemple Karst, Keuper gypseux, ...)?

Contrôle, documentation et conséquences:

- Est-ce que la cimentation est documentée et contrôlée (si oui, à quelle fréquence, de manière ponctuelle ou systématique, par qui) ?
- Est-ce que les données des cimentations bien réalisées sont systématiquement collectées par le canton (par exemple type de ciment, quantité, pertes ...)?
- Parfois la sonde n'est pas cimentée correctement (par exemple, mauvaise densité, non continue du bas vers le haut,...), une fois l'évènement décelé, comment le canton réagit-il ?

Retour d'expérience:

- Quelles sont les expériences que le canton sur les ciments (problèmes, dommages, ...) ?

3.3 Résultats

Sur les 26 cantons interrogés, entre 14 et 16, selon les questions, ont répondu. Les données ont été complétées par nos propres recherches (courant décembre 2017). Ces données font partie de l'évaluation.

Exigences et/ou conseils dans les fiches techniques, permis et demande

Sur 16 pages d'accueil de sites cantonaux, les exigences générales relatives à la cimentation sont citées ou renvoyées vers les textes correspondants : (renvoi à la norme SIA 384/6, au GSP et/ou à la directive de l'OFEV avec dans certains cas des fiches explicatives faisant les mêmes renvois ou avec les mêmes exigences que dans la directive de l'OFEV). 14 cantons font état de règles ou d'exigences dans les permis et plus particulièrement à propos de la cimentation. Au minimum dans 10 cantons on trouve des renvois autant au site web qu'à l'autorisation. Concrètement, les cantons indiquent une fiche technique ou le concept d'utilisation des sondes géothermiques. Chez 8 cantons on trouve des renvois à l'OFEV. 5 cantons se réfèrent à la norme SIA 384/6 et au GSP. Dans les autorisations, on trouve des renvois à la norme SIA 384/6 dans 9 cantons, à l'OFEV dans 8 cantons et au GSP dans 4 cantons. 5 cantons renvoient aux fiches techniques.

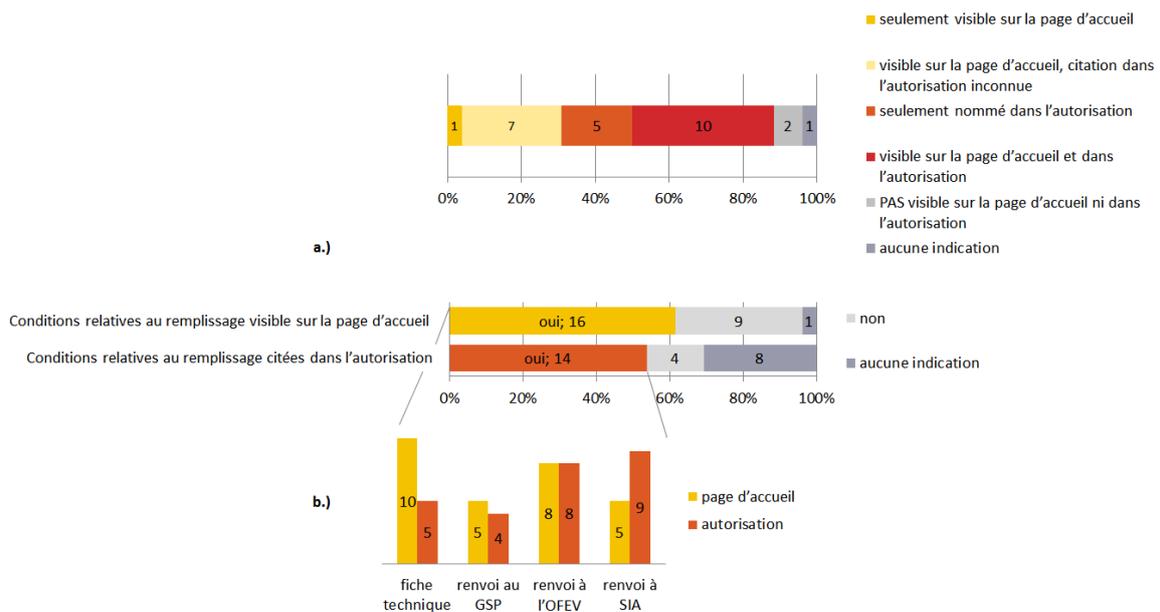


Fig. 8 a.) Exigences de la cimentation visibles sur la page d'accueil ou nommées dans l'autorisation
b.) Exigences sur la notice jointe / concept d'exploitation de l'énergie géothermique, resp. renvois à SIA 384/6, GSP, OFEV (réponses multiples incluses)

Un seul canton, sur les 14 ayant répondu, exige dans la demande d'autorisation, le fabricant, le type de ciment, les quantités de ciment prévues ainsi que la conductivité thermique du ciment.

Des indications concernant les problèmes possibles lors de la cimentation (par exemple, forte épaisseur de roches meubles, karst, risque de présence de gaz, Keuper gypseux) ont été données par 6 des 16 cantons. 2 cantons ont signalé des problèmes concrets liés aux karsts et plus précisément à des pertes de ciment dans le karst. 1 canton prévoit à long terme d'informer les demandeurs de la présence éventuelle de karst. 5 cantons donnent des indications d'importance concernant de la protection des eaux souterraines et fournissent parfois des exigences en conséquence (par exemple mise en place d'une chaussette pour SGV pour éviter les pertes de fluides, mise en œuvre d'un ciment résistant aux sulfates dans le Keuper gypseux, restriction de profondeur ou suivi réalisé par un géologue).

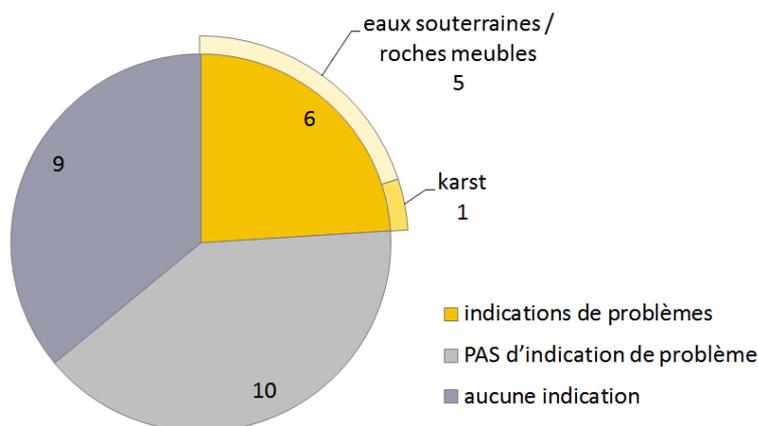


Fig. 9 Indication des problèmes survenant lors de la cimentation

Plus précisément, différentes procédures et mesures concernant la cimentation sont exigées. Sur les 26 cantons interrogés, 16 ont répondu.

10 cantons citent des mesures de la directive de l'OFEV, et plus particulièrement de la SIA ou du GSP (cf. 2.3.1). **La plupart du temps, l'extrait cité concerne le remplissage de l'espace annulaire du bas vers le haut, sans vides, avec un coulis approprié. Ceci assure un contact étanche, permanent, physiquement et chimiquement stable de la sonde avec le sous-sol. Les propriétés spécifiques (par exemple densité, coefficient de perméabilité, résistance au gel) du matériau de remplissage ne sont généralement pas mentionnées.**

Généralement, les cantons attachent plus d'importance à la protection des eaux souterraines qu'au fonctionnement sur le long terme de la sonde géothermique. La protection des eaux souterraines est un devoir cantonal, alors que le fonctionnement est considéré comme privé. Par conséquent, il n'y a donc pas d'exigences concernant la conductivité thermique ou le type de ciment. En revanche, des indications sont données (par exemple par rapport aux pertes de ciment dans les cavités karstiques ou dans les roches meubles) avec des directives appropriées comme par exemple la mise en place d'une chaussette pour SGV. Dans 10 cantons, d'autres problèmes ont été explicités, qui doivent être traités en conséquence. Parmi ceux-ci figurent la présence de Keuper gypseux (6 cantons), l'artésianisme (2 cantons) et la présence de gaz (2 cantons). De ce fait, des matériaux résistants aux sulfates, des installations techniques telles que la mise en place d'un packer ou le remplissage immédiat de l'espace annulaire sont nécessaires. Une exigence supplémentaire, n'étant mentionnée ni par l'OFEV, la SIA ou le GSP, n'existe que dans un canton. Celui-ci demande la mise en œuvre d'un ciment à faible conductivité thermique dans les champs de sondes géothermiques situés dans les zones d'eaux souterraines fortement chauffées anthropiquement.

En plus, 4 cantons indiquent les responsabilités. Les mesures sont sous la responsabilité du géologue dans 4 cantons et sous la responsabilité de l'entreprise de forage dans 2 cantons. Sur les 16 cantons ayant répondu, les documents constitutifs de la demande d'autorisation sont disponibles en ligne.

Contrôle, Documentation, Conséquences

Dans 1 des 16 cantons, les données sont systématiquement collectées lors de la réalisation d'une cimentation (par exemple, type de ciment, quantité de ciment, pertes éventuelles ...), de même un contrôle a lieu sur place. Dans 9 cantons, la cimentation peut être partiellement documentée par les bureaux de géologie référents ou les entreprises de forage, puis transmis à l'administration cantonale. Dans un canton, les informations collectées permettent de savoir si la cimentation est conforme aux exigences du permis. Dans 5 des 16 cantons, aucun contrôle ni documentation n'est réalisé. 10 cantons n'ont pas répondu aux questions.

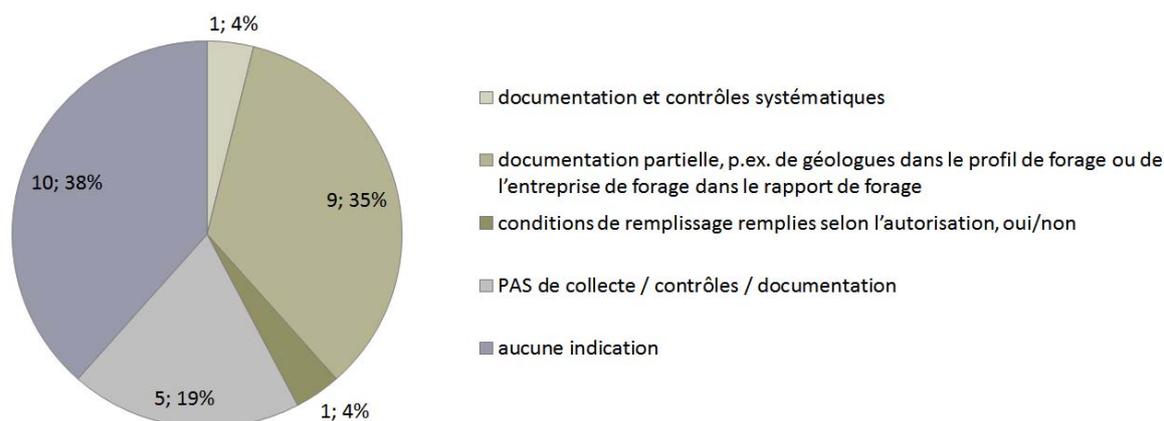


Fig. 10 Documentation et saisie de données systématique des cimentations et des contrôles

13 des 26 cantons ont répondu aux questions relatives à une cimentation incomplète. 5 cantons indiquent que de tels cas ne sont pas ou peu décelés ou que l'office n'en est pas informé. Dans 2 cantons, la cimentation incomplète n'entraîne pas de conséquences. Un canton évalue indépendamment chaque cas.

Dans un canton, la sensibilisation de l'entreprise de forage a lieu par un bureau spécialisé ainsi que par des rappels écrits ou des discussions avec les entrepreneurs responsables en cas de récurrence. Dans 1 canton, la sonde doit être mise hors service. Ce cas n'est cependant jamais survenu. Dans 2 cantons, une interdiction d'installer de nouvelles sondes est émise en cas d'artésianisme. Dans 2 cantons, l'entreprise de forage est contactée. Dans un canton, il faut faire prendre des mesures par le maître de forage ou l'hydrogéologue.

Retour d'expérience

Seuls 7 sur 14 cantons ont une expérience des procédures mises en place lors de problèmes de cimentation. Dans 3 cantons, il y a eu des pertes de coulis dans le karst, et dans 1 canton dans la molasse subalpine. Dans 3 cantons, il a été nécessaire de boucher des artésianismes.

3.4 Bilan

Presque tous les cantons posent des exigences sur la cimentation. Dans un peu plus de la moitié des cas, celles-ci figurent sur la page d'accueil du site et dans l'autorisation. Les cantons se réfèrent la plupart du temps au GSP et à la SIA, ou directement à l'OFEV. De courts extraits sont souvent cités. Cela concerne les exigences minimales. Le plus souvent, il est dit qu'une suspension adéquate doit être utilisée, qui assure une liaison durable, étanche, permanente, physiquement et chimiquement stable entre la sonde et le sous-sol. Ces exigences sont complètes, sans qu'il faille nommer des propriétés détaillées du matériau. Le maître d'ouvrage ou l'entreprise de forage reste ainsi libre de choisir le matériau adéquat et de procéder à la mise en œuvre de manière conforme.

La protection des eaux souterraines est particulièrement importante pour les cantons (pour ~4/5 des cantons participants). C'est pourquoi la cimentation complète du bas vers le haut est souvent encouragée. Un contrôle de la résistance et de la qualité, qui peut avoir à long terme un effet sur la protection des eaux, n'est pas fait par le biais du canton. Les exigences particulières quant à la gestion de la cimentation lors de l'apparition d'artésianisme, de keuper gypseux, de gaz, etc, sont fortement reliés à la géologie. Les cantons d'AG, de BL, du JU et du VS requièrent par conséquent des matériaux spéciaux dans certains cas.

Seul le canton de SO fait un contrôle sur place en plus d'une collecte systématique. Dans env. ¼ de tous les cantons participants au sondage, les données sont uniquement récoltées par l'entreprise de forage ou les géologues mandatés. Les mesures qui doivent être prises lors de la survenance de problèmes sont parfois entièrement de la responsabilité du géologue ou de l'entreprise de forage. Beaucoup de cantons sont d'avis que les problèmes concernant la cimentation sont rarement détectés resp. communiqués. Certains cantons ont demandé quelles mesures devraient apparaître dans l'autorisation. Parfois, le contrôle n'est pas vu comme une tâche cantonale. Moins de la moitié des cantons participant au sondage donnent des indications sur les problèmes éventuels liés au remplissage et font des recommandations appropriées.

Le chapitre 8 aborde les recommandations en question.

4 Statistiques et assurance qualité des matériaux cimentaires mis en œuvre en Suisse

4.1 Introduction et démarche d'étude

Une analyse des matériaux de cimentation mis en œuvre en Suisse est seulement possible si les matériaux utilisés sont connus, et si les quantités de même que la méthode de mélange, d'injection et de contrôle sont connues. Ainsi, toutes les entreprises de forage qui travaillent en Suisse ont été contactées et priées de répondre à une série de questions.

Les questions suivantes ont été posées:

1. Utilisez-vous un mélange propre ou un mélange prêt à l'emploi?
2. Quelle quantité de ciment utilisez-vous chaque année?
3. Quels matériaux cimentaires utilisez-vous pour la cimentation des sondes géothermiques (fabricant, type de ciment, quantité annuelle)?
4. Nombre total de mètres de forage annuels?
5. Utilisez-vous des appareils de mesure digitaux pour les mesures de qualité (débit et pression) ? Si oui, lesquels ?
6. Utilisez-vous des appareils digitaux pour l'évaluation de la densité et de la quantité de remplissage ? Si oui, lesquels ?
7. Si pas de réponse à la question précédente: A quelle fréquence mettez-vous en œuvre des ciments spéciaux ?
8. De quelle manière mélangez-vous le ciment (par exemple, malaxeur à mélange forcé, malaxeur colloïdal, cuve) ?
9. De quelle manière la densité du ciment mis en œuvre est-elle contrôlée, documentée ?
10. Combien de fois par an la qualité du coulis est-elle mesurée au cours de l'injection ?
11. D'après votre expérience, existe-t-il des ciments problématiques ?
12. Quelles sont vos façons de procéder pour éviter un écrasement de la sonde lors de forages profonds de plus de 250m ?

Les principaux résultats de cette enquête sont présentés ci-après.

4.2 Résultats et conclusions

Sur les 40 entreprises contactées, 19 ont répondu. Un nombre restreint d'entre elles sont à peine ou plus du tout actives en Suisse. La totalité des mètres de forage réalisés par ces entreprises est d'environ **1 700 km par an** (au cours des années 2016/2017). En Suisse, 2 500 km de forage sont globalement réalisés tous les ans. Les résultats de l'enquête sont donc pertinents même si toutes les entreprises de forage n'ont pas répondu. Cela est également prouvé par le fait le principal fournisseur de mortier en Suisse vend environ 5500 t par année, sachant qu'à l'enquête 5000 t ont été prises en compte. La gamme de mètres de forage par entreprise de forage se situe entre 11000 et 260000 m (points bleus dans la figure 11).

Pour ce faire, environ **9 200 t de matériaux de cimentation** ont été mis en œuvre. 17% de ces matériaux étaient des mélanges particuliers ou des mélanges standard. Il ressort que ce sont plutôt les grandes entreprises de forage qui utilisent des mélanges particuliers (barres jaunes dans la figure 11). 12 des 19 entreprises de forages ont mis en œuvre des ciments spéciaux au cours de l'année 2016 comme par exemple des ciments thermiquement améliorés et ou des matériaux spéciaux résistants aux sulfates (barres rouges dans la figure 11). Ils constituent environ 8% des matériaux de remplissage utilisés.

La quantité de remplissage moyenne pour 100 m est d'environ 700 kg (triangles verts sur la figure 12). Il ressort toutefois que la quantité diffère pour un remplissage de 100 m selon le type de matériau mis en œuvre. Pour le BTD Füller 350 et les mélanges particuliers, la valeur moyenne est d'environ 360 kg pour 100 m de forage et pour les produits KÜCHLER, d'environ 950 kg pour 100

m de forage. Il convient de noter que le rapport eau/particules solides joue un rôle déterminant pour les différentes propriétés et exigences (voir chapitre 2). Le rendement doit être évalué en conséquence et de manière critique.

Le mélange des coulis est en grande partie réalisé à l'aide d'un malaxeur à mélange forcé et plus particulièrement par malaxeur continu, suivi du malaxeur colloïdal (initiales dans la figure 12). Certaines entreprises de forage utilisent plusieurs systèmes. Il ressort que les petites entreprises de forage utilisent essentiellement le malaxeur à mélange forcé, alors que les grandes entreprises de forage (plus de 100 000 m forés par an) recourent plutôt au malaxeur colloïdal et/ou à la cuve de malaxage. Les entreprises qui utilisent les ciments Küchler utilisent habituellement plutôt la pompe à mortier Mungg (distribué par Küchler).

Les produits mis en oeuvre en Suisse sont présentés à la figure 12. Les produits Küchler sont utilisés dans 54% des cas, le K Injekttherm 110 étant le plus utilisé. Viennent ensuite les produits de BTB (env. 20%), les mélanges particuliers (env. 17%) et les ciments spéciaux de HDG-Umwelttechnik Sàrl (env. 5%).

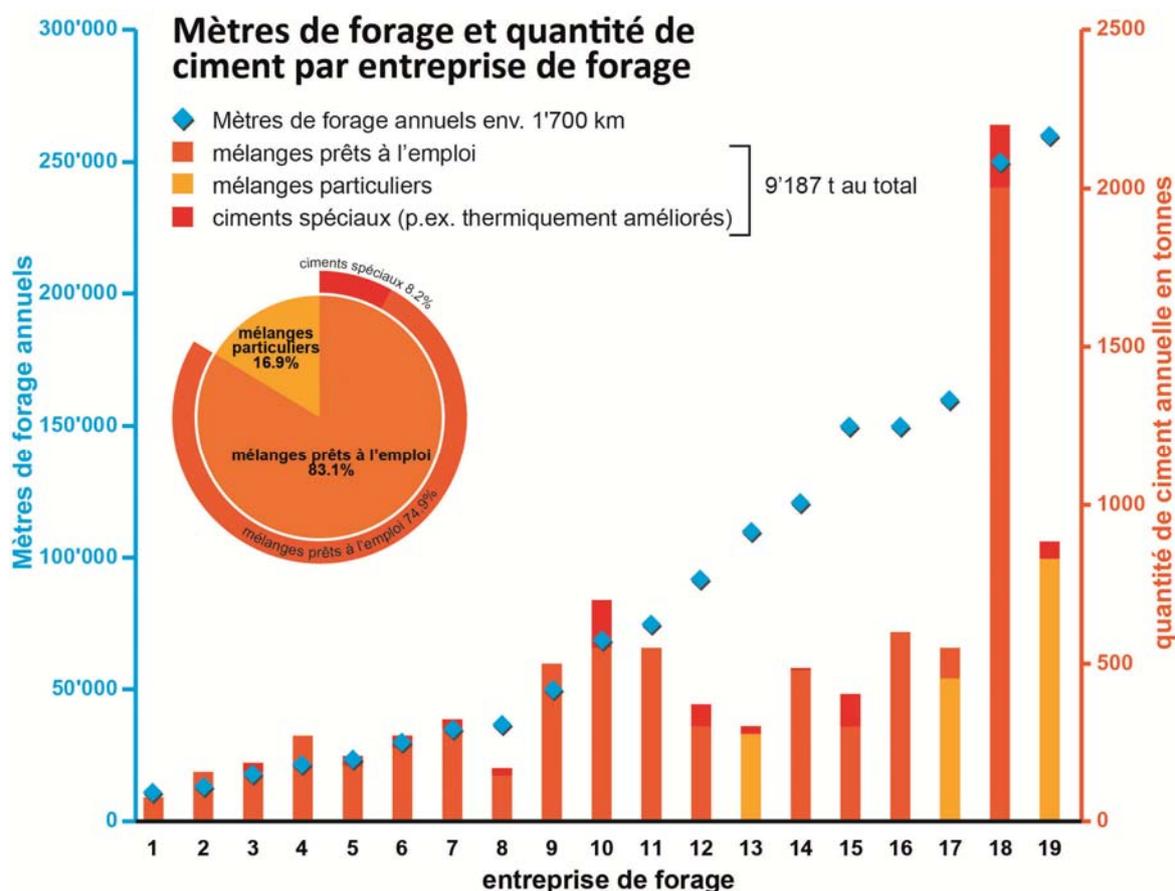


Fig. 11 Mètres de forage (losanges bleus) et quantité de ciment (barres jaunes, oranges et rouges) par entreprise de forage et par année

Problèmes habituels avec les matériaux de remplissage:

13 entreprises de forage n'ont pas fait mention ou n'ont eu jusque-là aucune expérience problématique avec les matériaux de remplissage. Autrement, les problèmes suivants ont été cités : parfois tassements trop importants ; parfois trop riche en quartz et donc difficile à pomper (les ciments thermiquement améliorés pour les sondes profondes sont problématiques en raison de leur poids) ; parfois trop lourd ; parfois mauvaises informations (il n'existe pas de mortier résistant au gel, par ailleurs la résistance au gel n'est pas indispensable car le sol gèle également

et que le gel est la conséquence d'un mauvais dimensionnement et n'est pas dû à la cimentation ; parfois la pompe mélangeuse est défaillante.

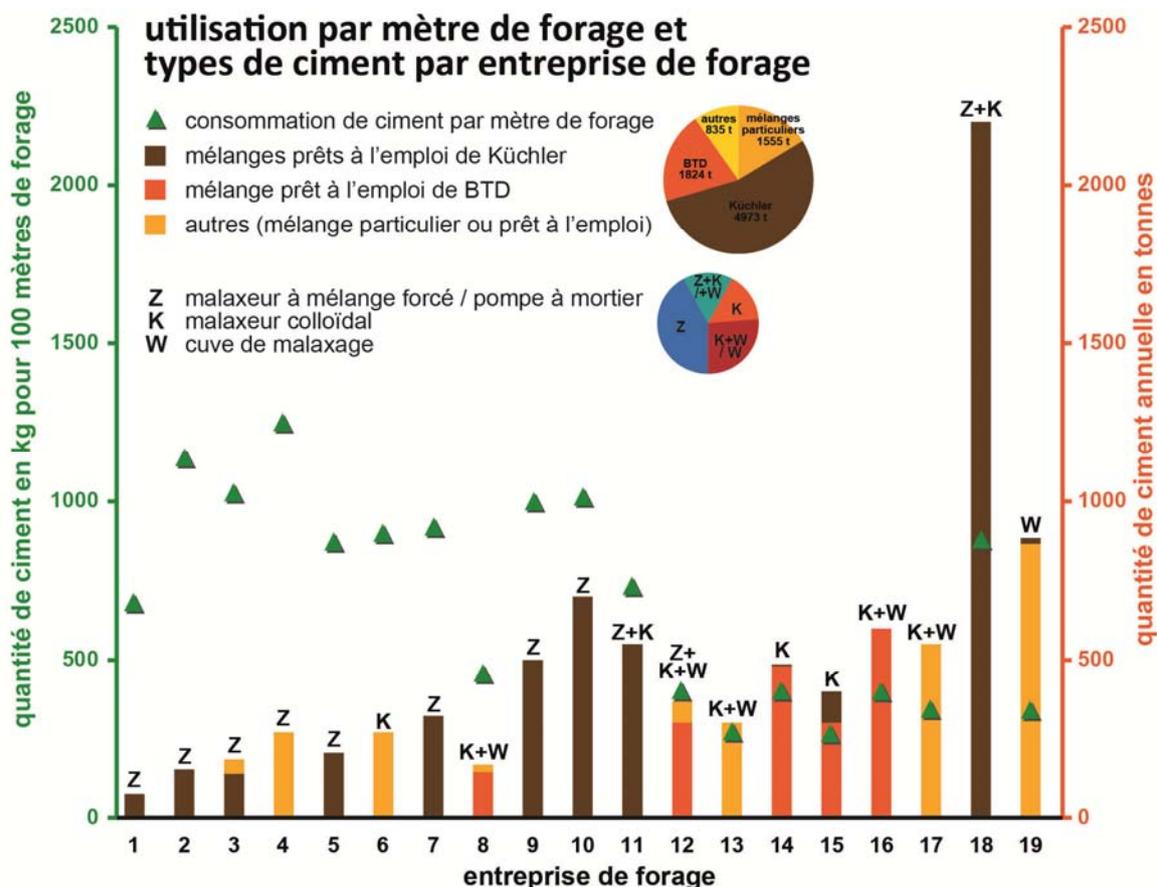


Fig. 12 Types de ciments utilisés (barres) et utilisation par mètre de forage (triangles verts)

Les barres colorées représentent les différents types de ciments utilisés (l'axe y de droite). Les triangles verts montrent l'utilisation de ciment moyenne de chaque entreprise en kg pour 100 mètres de forage (déterminée par la quantité de ciment utilisée annuellement et le nombre de mètres de forage total de chaque entreprise). Les lettres au-dessus des barres montrent le mélangeur avec lequel la suspension est mélangée. Les deux diagrammes circulaires comparent les types de ciments et de mélangeurs utilisés.

La démarche pour les sondes profondes de plus de 250 m, pour éviter que celles-ci soient écrasées, a été décrite comme suit (19 participants donc 19 réponses) :

- 4x aucune indication n'est donnée, ou, des sondes aussi profondes ne sont pas installées.
- 11x un contrôle de la pression est fait à l'aide d'un manomètre sur les tuyaux de la sonde et parfois la pression d'injection est renseignée.
- 8x la cimentation par palier est mentionnée comme un procédé réalisable, seules quelques entreprises mentionnent le fait que plusieurs tuyaux d'injection sont mis en place. Mention est aussi faite d'une injection complémentaire par le haut. Remarque : ce dernier cas est observé sur les chantiers lorsque la pression interne dépasse une certaine valeur critique.
- 4x il est cité que la sonde est mise sous pression en contre-mesure (par ex. avec une pression de 5 bars).
- 3x il est cité que le coulis est mélangé de manière à être moins dense. Remarque : généralement le coulis doit toujours être préparé selon les indications du fabricant.

- 3x il est cité qu'un matériau plus léger est mis en œuvre.
- 3x il est cité qu'à partir d'une certaine profondeur, les tubes de sonde sont verrouillés et remplis d'eau. Remarque : selon la norme SIA 384/6 Paragraphe 5.4.3 la sonde doit dans tous les cas être verrouillée de manière étanche et remplie d'eau.
- Réponses isolées : mise en œuvre de sondes PN20 ou PN30, inondation du trou de forage avant l'installation de la sonde, attendre une nuit, verrouiller la sonde de manière à ce qu'elle soit étanche à la pression. Remarque sur les dernières observations : Dans les réponses ci-dessus concernant le contrôle de la pression, le verrouillage étanche de la sonde est sous-entendu. Ici, il a toutefois été répondu que le verrouillage étanche de la sonde empêche son écrasement ! Le verrouillage étanche seul ne suffit pas à empêcher un écrasement (voir norme SIA 384/6 F.3.).

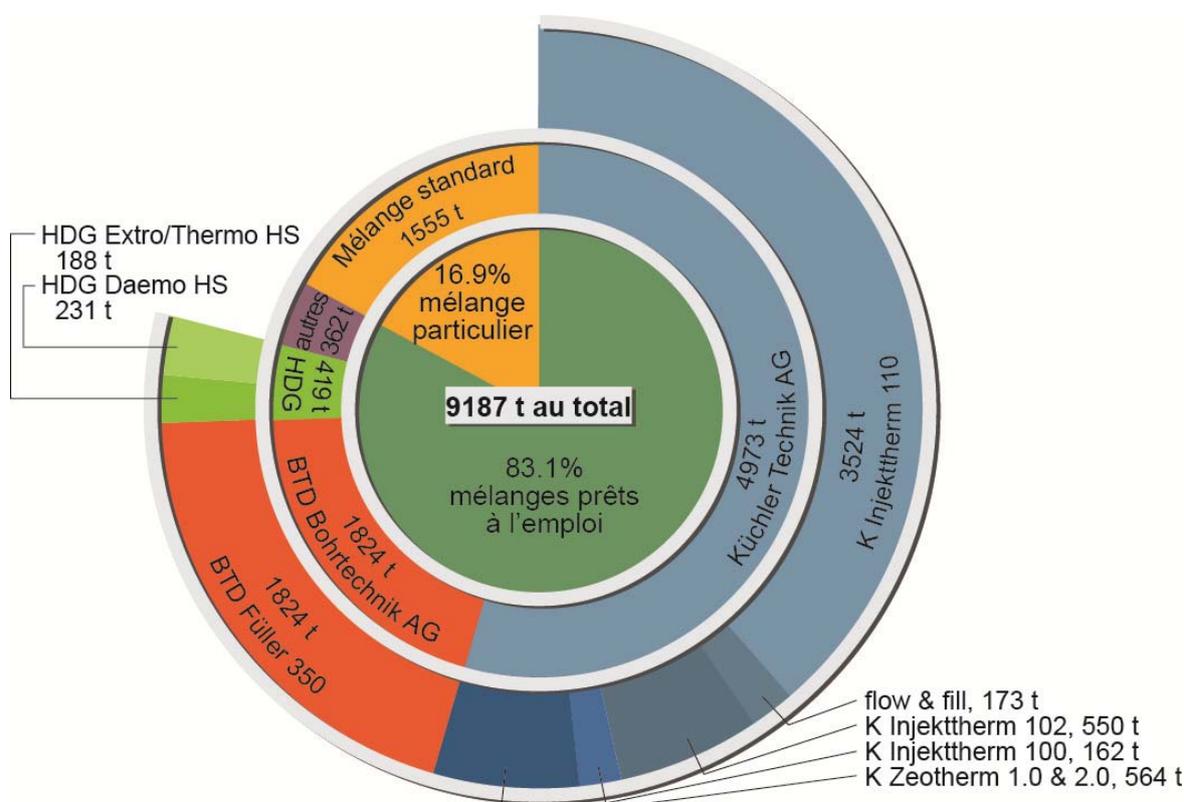


Fig. 13 Les matériaux cimentaires de remplissage utilisés en Suisse selon le sondage

Les produits de Küchler sont utilisés dans plus de la moitié des cas (env. 54%), suivis des produits BTM (env. 20%), des mélanges particuliers (env. 17%) et des ciments spéciaux de HDG-Umwelttechnik Sàrl (env. 5%).

Les paramètres les plus importants sont les contrôles de la pression interne de la sonde et les réponses correspondantes (par exemples cimentation par paliers), ainsi que le choix approprié des matériaux (coulis moins dense et /ou sonde stable à la pression). Dans tous les cas, la cimentation ne doit pas être injectée du haut vers le bas, car dans ce cas, l'obtention d'une cimentation sans vides est quasiment impossible. Les tubes de la sonde doivent toujours être verrouillés de manière étanche et remplis d'eau au cours de la cimentation. Une fois la cimentation effectuée, les tubes de la sonde doivent rester verrouillés jusqu'à ce que le ciment ait pris, afin qu'un écrasement ultérieur puisse être exclu.

Tab. 1 Réponse concernant la mesure de qualité (19 participants donc 19 réponses)

| Mesure de contrôle | Mise en œuvre | Aucune utilisation / aucun contrôle | Type de matériel |
|---|--|-------------------------------------|---|
| Utilisation d'appareils de mesure digitaux pour les essais de débit et d'étanchéité | 14 entreprises de forage utilisent ces appareils, toutefois l'expérience des sites de forages et des réponses collectées montre que les mesures ne sont faites qu'occasionnellement ou lorsqu'elles sont explicitement demandées | 5x | Le Geowatt DPG-C3 est cité 7 fois ; autrement des instruments « faits-maison » sont mentionnés, les mesures sont digitales mais pas entièrement automatiques |
| Utilisation d'appareils de mesure de remplissage digitaux | 6 entreprises de forage installent les instruments, du moins lorsque la demande est faite ; en moyenne la mesure est faite par ces entreprises pour environ 10% des projets. | 13x | Le Geowatt HMG est cité 4 fois ; autrement des instruments „faits-maison“ sont utilisés |
| Comment est contrôlée la densité du coulis | La mesure d'un volume défini avec une balance est mentionnée 11 fois. La plupart la documente. L'expérience des chantiers montre que les mesures de densité réelle sont plutôt rarement réalisées. Les autres données sont le nombre de sacs ou l'estimation de la longueur de forage et le rapport eau/ciment | 3x pas d'utilisation ou de contrôle | Balance et verre gradué |

5 Caractéristiques et comparaison des matériaux mis en œuvre

Comme le montre le chapitre 4, les matériaux de remplissage utilisés en Suisse dans l'ordre croissant sont: K-Injekttherm 110, BTD Füller 350, mélanges standards, K-Zeotherm, K Injekttherm 102, HDG Daemo HS, HDG Extro/Thermo HS, ainsi que le Flow & Fill. Les deux ciments prêts à l'emploi K-Injekttherm 110 et BTD Füller 350 représentent à eux seuls 58% des matériaux utilisés. Ces deux derniers sont régulièrement utilisés par les sociétés de forage.

5.1 Exigences relatives aux matériaux de remplissage

Dans le chapitre 2, les exigences principales concernant les matériaux de remplissage ont été décrites. Il est possible de les séparer en exigences à court terme et en exigences à long terme. Les exigences à court terme concernent majoritairement le mélange, le processus de remplissage et la stabilité initiale du mélange. Les exigences à long terme définissent la durabilité et la stabilité de la cimentation, afin que celles-ci assurent la protection des eaux souterraines et le bon fonctionnement des sondes géothermiques. Certaines exigences sont remplies par des ciments spéciaux, comme p.ex. spécialement la résistance aux sulfates et au gel ou une conductivité thermique plus élevée. La Fig. 14 résume sous forme de tableau les différentes exigences, leurs conséquences et avec quelles propriétés de ciment celles-ci sont atteintes. Cela est décrit de manière détaillée dans le chapitre 2. Le tableau suivant permet de faciliter la comparaison des matériaux utilisés.

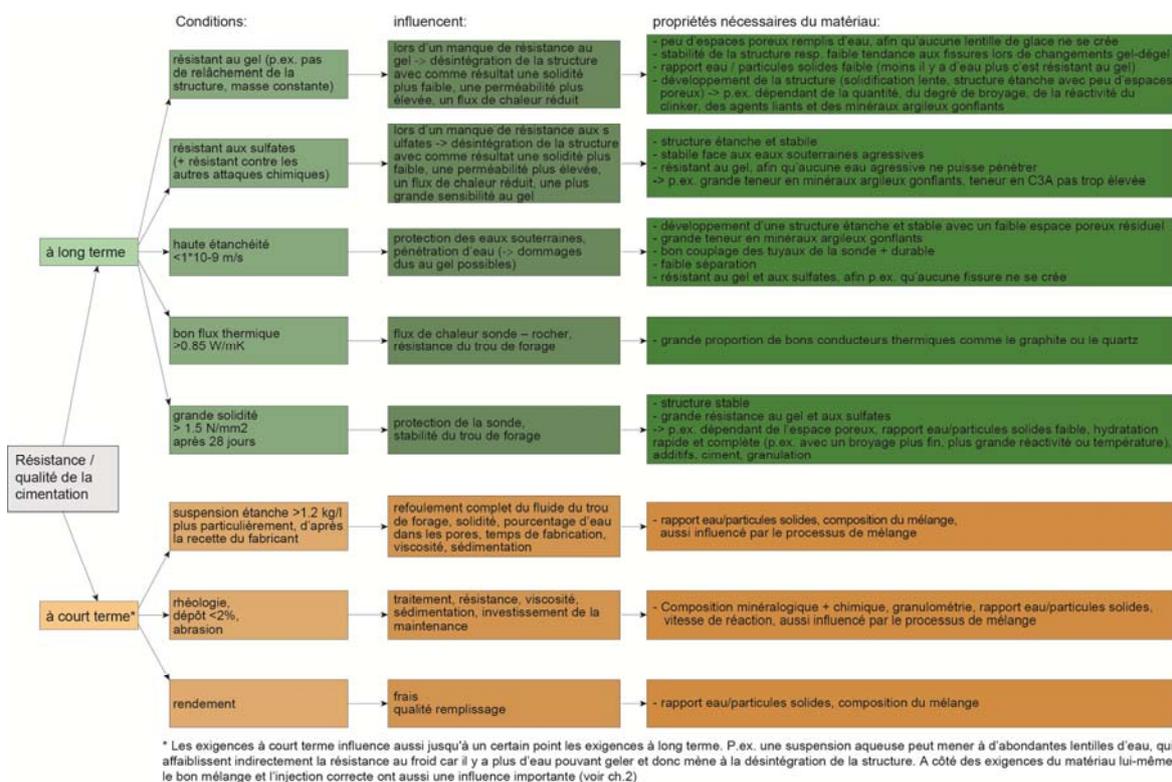


Fig. 14 Exigences à court et long terme des matériaux cimentaires de remplissage

Il est difficile d'évaluer si un matériau de remplissage est bon ou mauvais sur le long terme, car chaque propriété doit remplir une tâche définie. Il est possible que le matériau remplisse parfaitement une exigence, mais au contraire pas une autre. L'évaluation est donc subjective. Plus particulièrement, les exigences à court et à long terme se concurrencent entre elles. Donc p.ex. un rapport eau / particules solides élevé correspond à une maniabilité facilitée et à un rendement élevé. Il s'est au contraire avéré que ces matériaux étaient par la suite moins résistants au gel, amenaient une plus grande décantation et présentaient une solidité plus faible.

Pour un fonctionnement durablement optimal ainsi qu'une cimentation stable et étanche sur le long terme, les minéraux argileux gonflants (p.ex. bentonite), un rapport eau / particules solides faible et une formation de la structure pendant l'hydratation lente et bien faite sont avantageux. Si un bon flux de chaleur est souhaité, il peut être simplement atteint à l'aide de suppléments comme p.ex. du graphite, sans que les autres propriétés en soient préjudicées.

5.2 Caractéristiques des matériaux cimentaires de remplissage et conditions de mélange

Ci-après, les propriétés et caractéristiques les plus importantes des matériaux de remplissage les plus fréquemment utilisés pour assurer une qualité à long terme seront données. A titre comparatif, des valeurs d'échantillons sont aussi données (voir ch. 6). L'évaluation globale est faite dans le chapitre 8.

Tab. 2 Caractéristiques et prescriptions de mélange de la plupart des matériaux cimentaires de remplissage utilisés

| Mortier: | K-Injekttherm 110 | BTD Füller 350 | Mélange standard, sur le chantier ou resp. particulier | K-Zeotherm |
|--|--|--|---|---|
| Pourcentage (Fig. 13) | 38% | 20% | 17% | 6% |
| Total du mortier utilisé | 81% | | | |
| Publicité autour du produit faite par le fabricant | Rentable, bonne conductivité thermique, léger → pour sondes profondes, bonne rhéologie, faible dépôt | Très rentable, grande résistance aux sulfates, écologique selon le droit des eaux, volume stable | Remplit les conditions des directives de l'OFEV 2009 | Mortier spécial, haute conductivité thermique, résistant au gel et aux sulfates, rentable, léger → pour sondes profondes, bonne rhéologie |
| Densité recommandée par le fabricant | 1.45 kg/l | 1.22 kg/dm ³ | Env. 1.2 kg/dm ³ (selon p.ex. Herrmann 2008) | 1.48 kg/l |
| Densité selon les échantillons (ch. 6) | 1.27-1.74 kg/dm ³ 8 échantillons | 1.06-1.26 kg/dm ³ 9 échantillons | 1.48 kg/dm ³ 1 échantillon | 1.16-1.59 kg/dm ³ 4 échantillons |
| Rapport E/PS recommandé (rapport eau / particules solides) | 0.8 (selon le fabricant) | 2.48 (selon le fabricant) | 3 (selon SIA 384/6 F.3) | 0.8 (selon le fabricant) |
| Perméabilité | * | <1*10 ⁻¹⁰ m/s (d'après DIN 18130, après 28 jours) | <6*10 ⁻⁸ m/s (selon Herrmann 2008) | * |
| Solidité après 7 / 28 jours | 0.7 / 1.5 N/mm ² | 1.1 / 2.0 N/mm ² | - / 0.09 N/mm ² (selon p.ex. Niederbrucker & Steinbacher 2007) | * |
| Conductivité thermique | 0.9 W/mK (sec) 2.0 W/mK (humide) | 0.8 W/mK | 0.8 W/mK (humide, selon p.ex. Herrmann 2008) | >2 W/mK |
| Dépôt | -3.5% | Aucune indication | Dépendant du trempage jusqu'à 31% | * |

| | | | | |
|---|---|--|---|---|
| | | | (selon p.ex. Niederbrucker & Steinbacher 2007) | |
| Résistance au gel | Pas de recommandation du fabricant | Pas de recommandation du fabricant | NON (selon Herrmann 2008, Niederbrucker & Steinbacher 2007) | Résistant au gel selon le fabricant |
| Résistance au gel des échantillons (Chapitre 0) | Désintégration granuleuse après 2 cycles de gel-dégel | Fissures après 2 cycles de gel-dégel | Pas testé | Pas de changement de la structure |
| Résistance aux sulfates | Pas de recommandation du fabricant | Haute résistance aux sulfates selon le fabricant | NON | Résistant aux sulfates selon le fabricant |
| Rhéologie (temps de marche / viscosité) | * | Env. 60 s (selon DIN V 4126-100) / $3.2 \cdot 10^{-5}$ m ² /s | Env. 30 s / 400 mPas (selon p.ex. Herrmann 2008) | * |
| Spécificités | | Rapport E/PS très haut | Mélanges divers avec p.ex. de l'opalite, de la bentonite, différents ciments → grande marge | Résistance au gel démontrable et haute conductivité thermique |

(* Une phase de test complète a lieu en ce moment. Les valeurs seront disponibles seulement dès octobre 2018. Les valeurs prédéterminées sont à trouver à la Fig. 14 et au ch. 2)

5.3 Influence du type et du mélange des matériaux de remplissage sur la qualité et la durabilité

Comme le montrent différentes études et le Tab. 2 (p.ex. Herrmann, 2008 et Niederbrucker & Steinbacher, 2007), les caractéristiques des différents matériaux cimentaires de remplissage varient fortement. Généralement, les mélanges standards, et les mélanges particuliers sont les moins bien classés pour la plupart des caractéristiques (p.ex. solidité, décantation, résistance au gel, perméabilité). Selon les argiles gonflantes utilisées, les compositions minéralogiques et chimiques, le processus de mélange et le temps d'hydratation, les mélanges particuliers présentent parfois des valeurs insuffisantes. Il apparaît que le type de ciment ne détermine pas à lui seul les bonnes caractéristiques et la qualité, mais le mélange et l'injection corrects du mortier sont aussi importants (p.ex. homogène, rapport eau/particules solides et densité selon le fabricant, complet de bas en haut ; voir aussi ch. 2 et 8).

Plusieurs caractéristiques sont décisives pour la stabilité durable et le bon fonctionnement de la cimentation (voir aussi ch. 2 et 8). À côté de la résistance au gel et aux sulfates, il y a aussi la stabilité et la solidité de la structure, qui dépendent à leur tour p.ex. du rapport eau/particules solides, de la teneur en minéraux argileux, des agents liants et de la durée de solidification. Si la cimentation n'est pas résistante, resp. n'atteint même pas les exigences minimales, l'étanchéité, le contact, la solidité et le flux de chaleur ne peuvent plus être garantis.

Beaucoup d'études montrent que la résistance au gel est une caractéristique importante. C'est justifié par une multiplication de sondes sous-refroidies et la densité croissante des sondes. Dans le cas où le rapport eau / particules solides est >0.4 , l'eau reste dans les pores même après une hydratation complète (p.ex. préconisation du groupe de travail gouvernement fédéral et des Länder 2015). Plus la teneur en eau est élevée, moins les cimentations sont résistantes au gel et plus la solidité, la conductivité thermique et l'étanchéité sont faibles (p.ex. Herrmann, 2008). Même lorsque le meilleur matériau remplit toutes les exigences nécessaires mais n'est pas résistant au gel, il ne peut assurer à long terme une connexion durable, étanche et stable entre la sonde et le sous-sol. Le prochain chapitre et différentes études montrent que certains matériaux de remplissage mènent à une forte déstabilisation de la structure, déjà après à peine quelques cycles de gel-dégel.

Il faut relever que des rapports d'eau/particules solides faibles sont au contraire plutôt défavorables pour la fluidité et la capacité de pompage de la suspension, tout comme des densités plus élevées peuvent mener à un écrasement des sondes profondes. Il faut trouver un juste milieu concernant la mise en œuvre resp. l'injection et la qualité à long terme de la cimentation. Les statistiques montrent cependant que des bons matériaux de remplissage présentant une qualité durable sont régulièrement utilisés. Ce sont les mortiers spéciaux, comme p.ex. le plus utilisé, le Zeotherm.

5.4 Matériaux de remplissage améliorés

Comme montré dans le chapitre 4, les ciments spéciaux utilisés sont essentiellement ceux de Küchler (Zeotherm 1.0 et 2.0) et ceux de HDG (Extro, Thermo, Daemo HS). Ceux-ci présentent une meilleure conductivité thermique, ainsi qu'une résistance au gel et aux sulfates. Ensemble, ils représentent environ 10% des matériaux de remplissage.

Que ces matériaux soient de meilleure qualité est incontestable. Cependant, se pose la question du rapport coût/bénéfice et de la conformité réelle des produits avec les caractéristiques publicitaires du fabricant.

Concernant **les caractéristiques publicitaires**, la manière dont le matériau a été évalué (p.ex. dans un milieu sec / ouvert ou humide / fermé et avec quel mélange d'eau / particule solide) et dont il est utilisé en réalité est déterminante. Souvent, les données des fabricants se fondent sur des mesures de laboratoire internes, sur la base d'évaluations les plus diverses ou inconnues. Des contre-évaluations de fabricants particuliers avec d'autres méthodes d'évaluation mènent souvent à d'autres résultats. Il n'existe parfois pas de rapports d'évaluation pour certains paramètres, ou ceux-ci n'ont simplement pas été testés (voir tab. 2). La comparaison est par conséquent difficile et on ne peut que faire confiance à la publicité. Comme le montre le chapitre 6, les densités varient tout comme les rapports de mélange. En conséquence, les propriétés particulières varient en fonction de leur utilisation. Comme déjà mentionné plusieurs fois, même le meilleur matériau peut ne pas remplir ses exigences si le mélange ou l'injection son inappropriés. La véritable influence des matériaux et le fait de savoir s'ils peuvent réellement répondre aux exigences de manière durable doivent être systématiquement examinées ou mesurées. Pour que ce soit indépendant, différentes méthodes d'examen adéquates devraient être utilisées. Mais, comme le montrent les mesures comparatives (voir références, chapitre 2), les conductivités thermiques annoncées sont généralement atteintes dans un milieu humide. Fréquemment, l'amélioration de la conductivité thermique est accompagnée d'une emphase sur la résistance au gel et aux sulfates. Comme le montrent les études (voir le chapitre 2) et nos propres investigations simplifiées au chapitre 6, ces matériaux améliorés expliquent également en grande partie la résistance au gel explicitement rapportée.

Pour le **rapport coûts-bénéfices**, des simulations avec le Software des sondes géothermiques de Huber Energietechnik AG ont été menées. Pour ce faire, on a fait varier la conductivité thermique et on a calculé la longueur de mètres de forage nécessaire. Cela s'est fait pour une maison individuelle typique et neuve avec une sonde géothermique, et pour un petit champ de sondes de 4 sondes. En outre, on a fait varier la conductivité thermique du sous-sol (sous-sol standard de 2.2 W/mK et sous-sol avec une conductivité thermique plus haute de 2.8 W/mK comme p.ex. dans le calcaire, la molasse riche en quartz ou en cas de ruissellement souterrain). Comme le montre le tableau 3, des mètres de forage peuvent être économisés dans le cas d'une cimentation thermiquement améliorée par la résistance plus faible du trou de forage. Avec un coût supplémentaire par mètre de forage compris en moyenne entre 2.50 CHF (coûts selon fabricant) et 4.50 CHF (coûts facturés par l'entreprise de forage), les frais supplémentaires du mortier plus cher s'égalisent presque avec les mètres de forage économisés, dans le cas de petits objets. Plus la conductivité thermique du sous-sol est haute, plus les frais supplémentaires du mortier thermiquement amélioré sont faibles, car moins de mètres de forage sont nécessaires. Si l'on considère que la plupart des matériaux de remplissage thermiquement améliorés utilisés ont aussi de plus grandes qualités p.ex. concernant la résistance au gel, l'étanchéité ou l'assurance d'une stabilité de la structure durable, on obtient une nette plus-value pour des coûts presque identiques.

Tab.3 Influence de la conductivité thermique de la cimentation sur les mètres de sonde, resp. frais additionnels

| | Nouvelle construction typique : maison individuelle | | 4 Sondes en série Espacement des sondes 7 m | |
|---|---|--|--|--|
| | Cimentation normale | Cimentation améliorée | Cimentation normale | Cimentation améliorée |
| Energie thermique sans eau chaude | 12'000 kWh | 12'000 kWh | 48'000 kWh | 48'000 kWh |
| Energie thermique | 4'000 kWh | 4'000 kWh | 16'000 kWh | 16'000 kWh |
| Freecooling | - | - | 2'400 kWh | 2'400 kWh |
| COP B0/W35 | 4.5 | 4.5 | 4.5 | 4.5 |
| COP B0/W55 | 2.8 | 2.8 | 2.8 | 2.8 |
| Puissance de chauffage de la pompe à chaleur | 8 kW | 8 kW | 32 kW | 32 kW |
| Conductivité thermique sous-sol standard (conductivité th. plus élevée du sous-sol) | 2.2 (2.8) W/mK | 2.2 (2.8) W/mK | 2.2 (2.8) W/mK | 2.2 (2.8) W/mK |
| Profil de température standard | 3°C/100 m | 3°C/100 m | 3°C/100 m | 3°C/100 m |
| Interprétation | 50 ans, temp. moy. aller-retour -1.5°C | 50 ans, temp. moy. aller-retour -1.5°C | 50 ans, temp. moy. aller-retour -1.5°C | 50 ans, temp. moy. aller-retour -1.5°C |
| Conductivité thermique cimentation | 0.8 W/mK | 2.0 W/mK | 0.8 W/mK | 2.0 W/mK |
| Longueur de forage selon la simulation incl. 10% sécurité | 169 m (147 m) | 156 m (134 m) | 4*197 m (171 m) | 4*184 m (156 m) |
| Frais supplémentaires pour plus de mètres de forage +4.5 CHF / m car mauvaise conductivité thermique resp. cimentation améliorée +4.5 CHF / m car mortier plus cher | (169m-156m) * 45 CHF = 585 CHF (13m * 45 CHF = 585 CHF) | 156m * 4.5 CHF = 624 CHF (134m*4.5 CHF = 603 CHF) | (4*(197m-184m)) * 45 CHF = 2'340 CHF (60m*45 CHF = 2'700 CHF) | 736m*4.5 CHF = 2'944 CHF (624m*4.5 CHF = 2'808 CHF) |
| Remarques | En comparaison avec une cimentation thermiquement améliorée, plus de mètres de forage sont requis (13m) | Les frais suppl. pour une meilleure cimentation (603 CHF) correspondent env. aux mètres de forage économisés (585 CHF) | En raison d'influences thermiques mutuelles, plus de mètres de forage sont nécessaires que pour une maison | Les frais suppl. pour une meilleure cimentation sont plus faibles dans le cas d'un sous-sol avec une conductivité thermique élevée |

| | | | | |
|---|--|--|---------------------------------------|---|
| T a b · s | → coûts de forage plus élevés de 585 CHF | | ind. (197 au lieu de 169 m par sonde) | que dans le cas d'un sous-sol standard (108 CHF au lieu de 604 CHF), en regard des mètres de forage économisés. |
| <p><i>Les matériaux de remplissage avec une conductivité thermique plus élevée (p.ex. Zeotherm 2.0) présentent généralement une meilleure qualité concernant la résistance au gel ou la stabilité durable de la structure. Par le fait qu'une conductivité thermique plus haute permet d'économiser des mètres de forage, on obtient une cimentation de meilleure qualité et plus durable avec pratiquement aucun frais supplémentaire.</i></p> | | | | |

6 Analyse des matériaux de remplissage injectés

6.1 Démarche

Grâce à la collaboration avec les maîtres de forage sur place, 42 échantillons de suspension ont pu être prélevés pendant la cimentation. Conjointement, il y a eu un prélèvement de 35 échantillons dans le mélangeur (généralement pris depuis le tuyau d'injection, rarement directement dans le mélangeur) et de 7 échantillons de la suspension, qui sortait du trou de forage dès que le remplissage avait atteint la surface. Le but était de récolter le plus d'échantillons possible de tous les matériaux cimentaires de remplissage et du plus grand nombre d'entreprises de forage resp. de maîtres de forage. Grâce au suivi sur place de la cimentation, le processus a également pu être analysé.

Les échantillons ont été comparés selon la densité, l'homogénéité, la décantation, le développement de la solidité et en partie la résistance au gel. A cet effet, les suspensions ont été prélevées dans des récipients de 1 ou 1.5 litres et complètement remplis, à quelques exceptions près. Selon la solidification dans le trou de forage / roche, les récipients ont été tenus fermés. Les analyses doivent être considérées comme des premières comparaisons simples, et ne remplacent pas des examens de laboratoire. Elles ne doivent donner qu'une vue d'ensemble et surtout montrer comment les cimentations sont mélangées sur le site de forage. Il était particulièrement intéressant de voir si les suspensions présentaient les densités recommandées par les fabricants. Il s'agit moins de déterminer la qualité effective des produits de mortier. Cela devrait être fait avec des examens de laboratoire dans les normes. Dans le cas de la certification de la résistance au gel, il s'agissait également d'une simple première étude comparative pour voir l'évolution de la structure lors d'une exposition au gel (formation de fissures, changements de volume et de masse). La densité a été déterminée à l'aide d'une balance. L'homogénéité, la décantation et le développement de la structure pendant les expérimentations de gel-dégel ont été établis par un examen visuel. La solidité a été testée à la main, en regardant à quelle vitesse et à quel point la suspension se fige.

6.2 Densités des suspensions échantillonnées

Densité de la suspension

La fig. 15 présente les différentes densités des suspensions mesurées. La densité recommandée par le fabricant est également mentionnée. 8 types de mortier différents ont été mesurés. Le nombre de mélanges de suspension différents par type de mortier va de 1 à 11. Les suspensions peuvent être attribuées à 10 entreprises de forage et 17 maîtres de forage différents.

Les densités des suspensions par type de ciment varient jusqu'à 0.4 kg/l par rapport à la valeur de référence donnée par le fabricant. En moyenne, l'écart est d'env. 0.17 kg/l, celui-ci étant le plus petit avec le BTD-Füller 350 et 0.07 kg/l. Hormis le BTD, le mélange est tendanciellement trop épais, ce qui améliore la qualité de la cimentation (p.ex. solidité, étanchéité, résistance au gel) en comparaison à des mélanges trop liquides. De plus, cela montre qu'apparemment aucune économie sur le matériel n'est faite dans le but de diminuer les coûts. Pour les sondes plus profondes, il faut absolument veiller à ce que la sonde ne soit pas écrasée lorsque la densité est plus élevée. Néanmoins, il faudrait généralement faire le mélange selon les recommandations du fabricant.

Des échantillons provenant de malaxeurs continus et colloïdaux, et un de la cuve ont pu être analysés. Mais il n'y a aucune corrélation claire entre les densités de suspension et les malaxeurs. Il semble y avoir une légère tendance à ce que les densités soient plus proches des valeurs conseillées et varient moins fortement lorsque des malaxeurs colloïdaux sont utilisés. La variabilité de tous les types de mortier montre par ailleurs qu'en général les densités diffèrent selon les équipes de foreurs.

6 échantillons montraient des densités de suspension <1.2 kg/l, donc au-dessous de la valeur indicative du GSP. Ces cimentations sont certainement de moins bonne qualité. Cela concerne particulièrement le matériau BTD-Füller 350, qui de toute façon présente déjà un rapport

eau/particules solides élevé et qui donc atteint encore plus rapidement des densités trop faibles lorsque le mélange n'est pas adéquat.

Il faut noter qu'il est apparu lors du suivi des remplissages que l'homogénéité varie particulièrement chez les malaxeurs continus. Des structures grumeleuses ont été en partie constatées, ou les mélanges étaient déjà visuellement différents, plus épais ou plus liquide. Ce dernier point peut parfois s'expliquer par le fait que la masse brut n'était pas disponible de manière continue, que l'alimentation en eau a dû être réinitialisée à plusieurs reprises ou qu'elle n'était pas constante. Il serait probablement judicieux de déterminer la densité à plusieurs reprises au cours de tout le processus de remplissage et d'en analyser les variations.

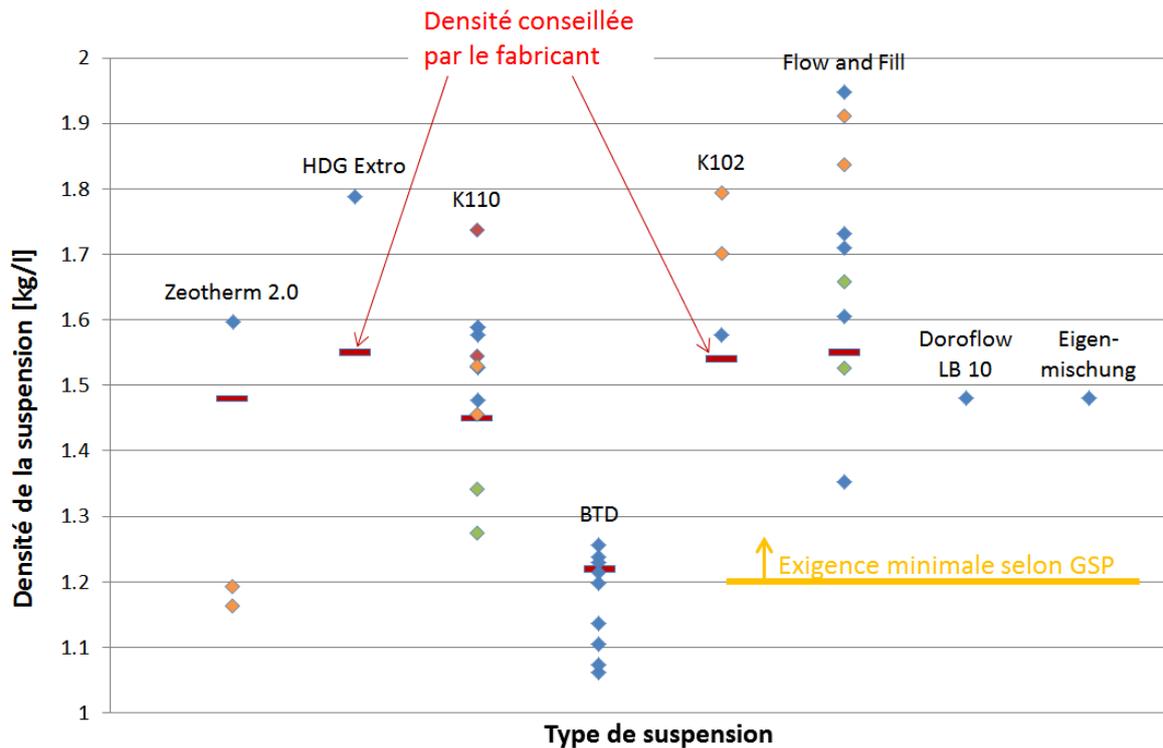


Fig. 15 Densité de la suspension fonction du type de mortier.

La densité recommandée par le fabricant est représentée par les barres rouges. Les échantillons pris avant et après injections sont représentés dans la même couleur (orange, resp. vert). Les exigences minimales sont de 1.1 à 1.3 kg/l (voir chapitre 2.2)

Comparaison de la densité de la suspension à l'entrée et à la sortie du forage

La fig. 16 montre comment s'attendre à des différences de densité de la suspension avant l'entrée et après la sortie du trou de forage. Pendant 7 injections, des échantillons de suspension ont été prélevés avant, donc dans le tuyau d'injection, et également à la sortie du trou de forage. 5 échantillons sur 7 présentent une densité plus faible à la sortie de la tête du trou de forage que l'échantillon d'entrée correspondant. Il n'y a pas de corrélation avec la pénétration d'eau dans le trou de forage. 2 échantillons présentent une densité plus élevée au retour. Cela reflète éventuellement l'homogénéité variable des suspensions pendant le processus de mélange, comme mentionné plus haut. Ces mortiers ont été préparés avec un malaxeur continu. Les densités plus faibles des échantillons de retour s'expliquent en général par le fait que la suspension se dilue avec l'eau présente dans le trou de forage lorsqu'elle remonte.

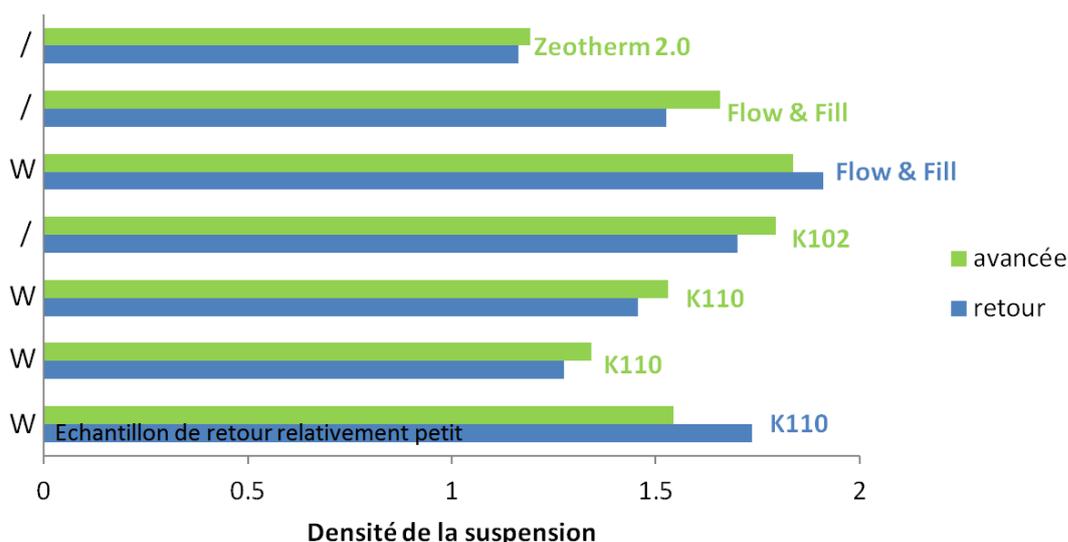


Fig. 16 Comparaison de la densité des suspensions d'échantillons d'aller et de retour.

Les infiltrations d'eau dans le trou de forage sont représentées à gauche avec un „W“.

Densité de la suspension vs. longueur de sonde

Le problème est évidemment lié à des suspensions trop lourdes, ou à des têtes de sondes mal scellées ou rouvertes trop tôt pendant le remplissage. Selon la norme SIA 384/6, la densité de la suspension doit être adaptée à la longueur de la sonde, ou il faut faire une cimentation par paliers, pour éviter une pression excessive.

Il est rare que la pression interne du tuyau de la sonde ne soit pas surveillée avec un manomètre pendant toute la cimentation. Généralement, le tubage de protection est rapidement retiré après la cimentation. Il apparaît dans ce contexte que le fermoir étanche à la pression est régulièrement ouvert ou complètement enlevé. On observe sans cesse qu'ensuite la sonde n'est plus mise sous pression. Néanmoins, toujours plus de maîtres de forage utilisent des raccords rapides permettant de retirer le tubage de protection sans ouvrir les tuyaux de la sonde.

La fig. 17 représente la réalisation effective dans le quotidien. Le graphique montre qu'il n'y a pas de corrélation claire avec la profondeur de la sonde. La densité de la cimentation n'est plutôt pas adaptée à la profondeur de la sonde. On peut observer une tendance uniquement avec K110, selon laquelle une densité de la suspension plus faible s'applique à une longueur de sonde croissante. En plus, les valeurs montrent que toutes les cimentations installées ne dépassent pas les densités maximales admises, à partir desquelles une installation ne serait plus permise. Mais, selon les dires de certains maîtres de forage, le matériau de remplissage est toujours mélangé avec le même rapport d'eau / particules solides. Malgré certains désavantages, le BTF est le mortier avantageux quant à la stabilité de la sonde en raison de sa faible densité.

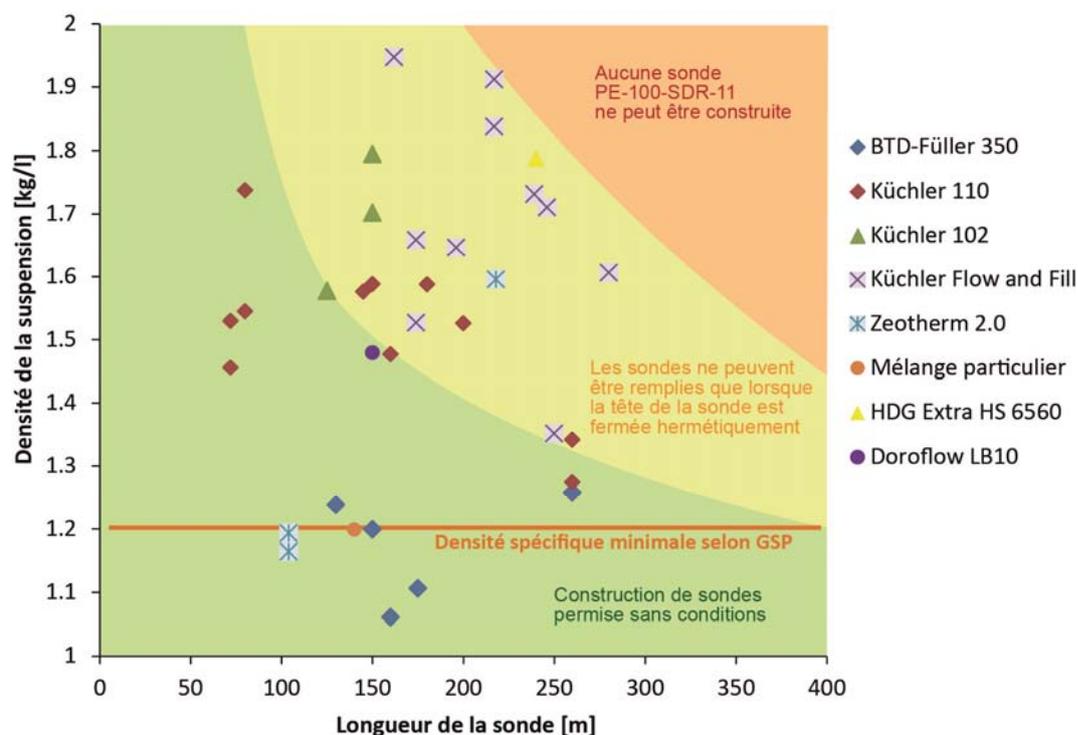


Fig. 17 Densité de la suspension en fonction de la longueur de la sonde

Les fonds colorés représentent les limites selon la norme SIA 384/6 jusqu'auxquelles la tête de sonde doit être ouverte ou fermée de manière étanche à la pression en fonction de la densité de la sonde, resp. auxquelles uniquement une cimentation par palier peut être faite, afin que les tuyaux de la sonde ne soient pas écrasés.

6.3 Résistance au gel des matériaux de remplissage

Dans différentes études et rapports (voir références et ch. 2), la résistance au gel est considérée comme un paramètre très important pour la qualité à long terme de la cimentation. C'est pour cette raison qu'elle a été testée dans le cadre de ce travail sur certains échantillons récoltés in situ. Les types de mortiers choisis sont ceux qui sont le plus souvent utilisés et qui vont du remplissage bon marché à celui de haute qualité : Küchler 110, BTD-Füller 350, Zeotherm 2.0 et Flow and Fill.

Comme décrit dans le chapitre 6.1, seul un examen simple a été mené (des propositions pour des tests sophistiqués sont faites p.ex. dans Anbergen, 2015). Des rondelles larges d'env. 7 cm avec un diamètre de 10 cm ont été sciées dans les bouteilles d'échantillons. Le bord de la bouteille a été laissé sur l'échantillon. Les échantillons ont été emballés hermétiquement et soumis à 5 cycles de gel-dégel, avec pour objectif de reproduire des conditions réelles. Après la 5^{ème} décongélation, les échantillons ont été placés dans de l'eau pendant 2 cycles, puis congelés et décongelés 2 autres fois. Tous les échantillons ont été exposés exactement aux mêmes conditions. Aucun échantillon ne présentait de fissure avant la première congélation.

Après la deuxième phase de gel, les premiers effets notables sont apparus sur les échantillons Flow and Fill et BTD. Flow and Fill présentait plusieurs fissures avec des ouvertures de jusqu'à 0.2 mm, et le BTD avait de nombreux fendillements. Le K110 présentait une sorte d'écaillage granuleux. Lors des cycles gel-dégel suivants, la structure ne se modifie presque plus. L'échantillon Zeotherm ne présente aucun changement de structure, même après plusieurs cycles de gel-dégel.

Si les échantillons sont plongés dans un bain-marie entre les cycles de gel-dégel, on note un affaiblissement de la structure encore plus fort. Déjà après un bain-marie, fait après le 5^{ème} cycle de gel-dégel, une grande perte de masse a été constatée sur l'échantillon K110 et une perte plus faible sur le BTD. Après les deux cycles de gel-dégel suivants, les fissures sur le Fill and Flow se

sont élargies jusqu'à 1.3 mm. De nombreuses fissures d'une largeur allant jusqu'à 0.6 mm sont apparues sur le BTD.

Après un autre bain-marie et un autre cycle de gel-dégel, on remarque que surtout le BTD est fortement attaqué. Les fissures, d'une largeur maximale de 0.6mm, s'étendent à travers tout l'échantillon. Le Flow and Fill présente également une augmentation de fins fendillements. Le K110 a seulement quelques nouveaux fendillements. Une perte de masse est constatée sur le BTD et l'échantillon Küchler 100. Après deux autres cycles de gel-dégel, la qualité du BTD se détériore notablement. Le Zeotherm ne présente toujours pas de fissures ou de perte de masse.

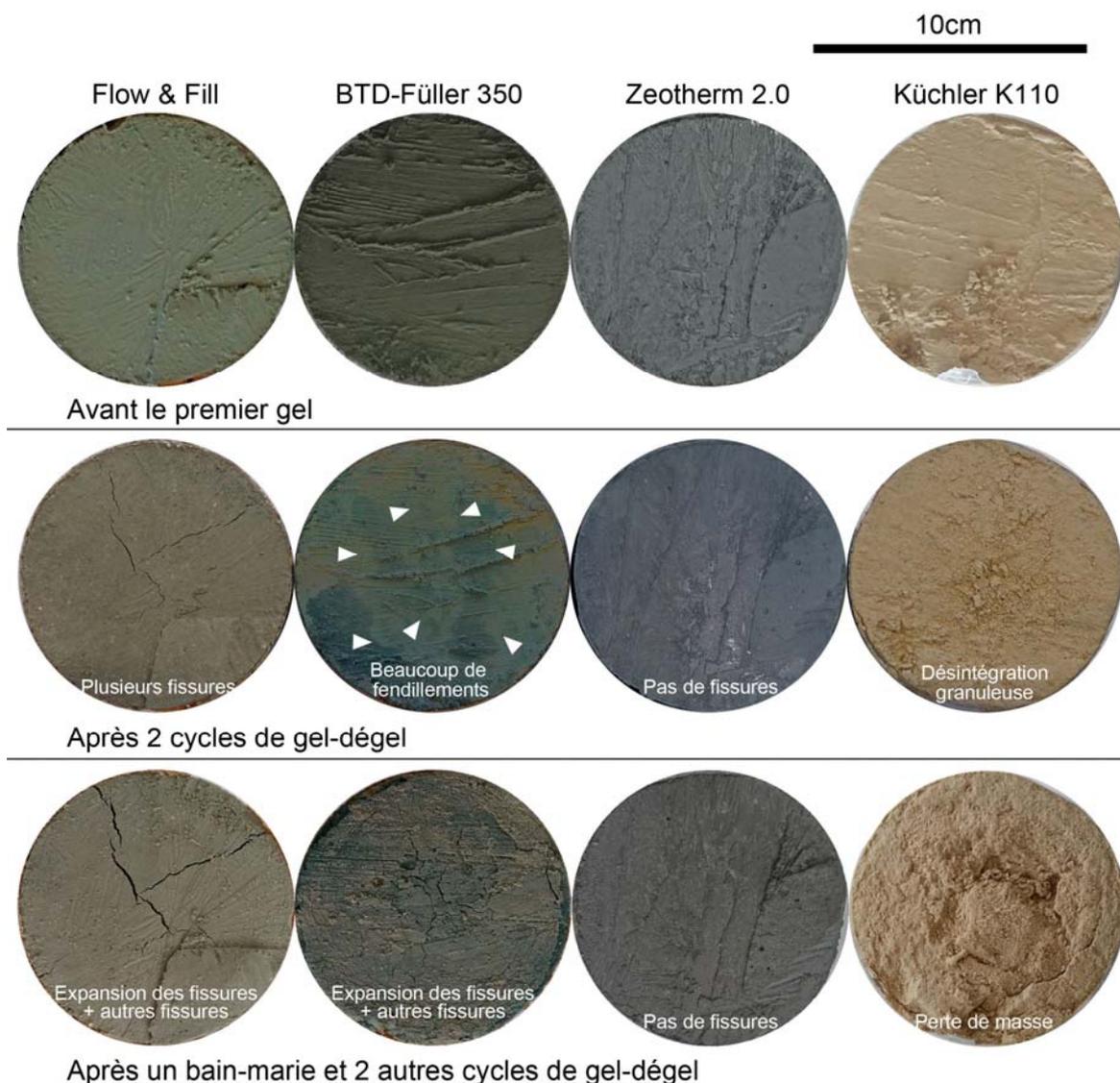


Fig. 18 Changements de structure après quelques cycles de gel-dégel

Chaque colonne reflète un même échantillon resp. type de mortier. La rangée supérieure montre les échantillons complètement durcis, venant d'être sciés, avant le début de l'expérience. Dans la rangée du milieu, les mêmes échantillons présentent des premières fissures ou désintégrations granuleuses considérables après 2 gels, à l'exception du Zeotherm. Après 5 cycles de gel-dégel suivis d'un bain-marie et de deux nouveaux cycles de gel-dégel, tous les échantillons présentent un net affaiblissement de la structure resp. une perte de masse, sauf le Zeotherm.

Résumé:

Comme indiqué par les fabricants, seul le Zeotherm 2.0 de Küchler est résistant au gel. Tous les autres présentent déjà après 1 ou 2 cycles de gel-dégel de nettes fissures, fendillements ou désintégrations granuleuses. Ce n'est pas problématique si les sondes sont installées correctement et s'il n'y a pas de gel notable. Il s'avère cependant que les sondes ne sont pas toujours correctement dimensionnées ou que les sondes voisines ou alors les nouvelles pompes à chaleur avec un meilleur COP ne sont pas prises en compte. Cela mène à un refroidissement plus rapide ou plus fort dans les alentours immédiats de la sonde. Ceci est également démontré par les analyses de Kriesi (2017), ainsi que par l'augmentation des dommages causés par le gel.

S'il y a un gel complet de la cimentation, des fissures et des déstabilisations de la structure apparaissent sur la plupart des matériaux de remplissage utilisés. Il n'y a alors plus d'étanchéité, de solidité, de flux thermique ni connexion avec le sous-sol.

6.4 Autres caractéristiques des matériaux échantillonnés

Sur 8 échantillons homogènes et non-décantés, 3 étaient encore souples après 24 heures. Deux de ces échantillons étaient du K110, et un du BDT. 3 échantillons fortement décantés étaient encore souples après des mois, dans la partie supérieure à la limite entre la suspension et l'eau. Aucun test de charge pour définir l'exacte résistance à la pression n'a été réalisé.

3 des 42 échantillons de suspension présentaient un gros dépôt ou une séparation. La partie aqueuse représentait 15, 20 resp. 35% (2x Flow&Fill resp. 1x K110, fig. 19). Les échantillons décantés ont été mélangés avec un malaxeur continu. 2 venaient de la même entreprise de forage, mais de maîtres de forage différents. Les échantillons restants montraient un dépôt négligeable ou pas du tout de dépôt (types de mortier voir fig. 15). Les échantillons BTD avec le rapport eau/particules solides le plus élevé ne présentaient eux non plus aucune séparation.



Fig. 19 Différence de dépôt des différentes cimentations échantillonnées

A gauche, 2 échantillons de suspension décantés, A droite des échantillons homogènes et non décantés

Lors de la prise d'échantillons, il a été constaté dans certains cas que les suspensions des malaxeurs continus alimentant le trou de forage étaient grumeleuses. Quelques fois, les cimentations ont dû être stoppées, car les malaxeurs continus étaient bouchés ou le tuyau d'injection avait éclaté. Il n'y avait également pas assez de produit brut sur place dès le début pour toutes les cimentations. De plus, l'alimentation en eau n'était pas toujours constante. Certaines suspensions injectées étaient donc au moins temporairement non-homogènes. Il était rare

qu'aucun manomètre ne soit utilisé pour surveiller la pression. Mais, grosso modo, les cimentations ont bien fonctionné et les suspensions étaient homogènes et malléables. Le remplissage a généralement été fait du bas jusqu'à la surface. Dans de rares cas seulement, une quantité importante de suspension a été rajoutée après coup depuis le haut.

7 Procédures de contrôle

Les différentes procédures de contrôle de la cimentation ont déjà été décrites et discutées en détail dans différentes publications. Les plus importantes sont : EnergieSuisse, 2015 (Assurance qualité des sondes géothermiques, aperçu des méthodes de mesures pour le contrôle de la cimentation) et les recommandations du groupe de travail fédéral et cantonal, 2015.

Dans le présent rapport, il s'agit de présenter les possibilités de contrôles, afin qu'une bonne cimentation soit rendue possible et puisse être contrôlée. Il sera moins question d'identifier les vides dans la cimentation. Pour ces dernières, il est possible de mettre en œuvre des mesures **thermiques, radiométriques ou magnétiques**. Celles-ci sont décrites en détail dans le rapport de SuisseEnergie de 2015. Toutes les mesures sont en revanche interprétatives et seule l'expérience permet d'en faire des déductions satisfaisantes. Quelques exemples : les profils de température mesurés peuvent par exemple montrer une circulation d'eau souterraine ou une chaleur de prise homogène, qui permettent à leur tour de déduire que le remplissage est ininterrompu. Un court TRT augmente la valeur informative des profils de température. Alternativement, la sonde géothermique peut être traversée avec une source radioactive et les anomalies de densité dans la cimentation peuvent être découvertes à l'aide de la rétrodiffusion. Cette méthode n'est cependant pas vue d'un bon œil et représente à elle seule une certaine charge douanière, car elle n'est pas proposée en Suisse. Lorsque le matériau de remplissage est doté d'additifs ferromagnétiques, la susceptibilité magnétique peut être mesurée soit lors du processus de cimentation lui-même ou postérieurement dans la sonde géothermique, et la qualité de la cimentation correspondante peut être définie. Là encore, il n'y a pas non plus de fournisseur en Suisse et la marge d'interprétation est grande, en particulier lorsque le sous-sol contient déjà naturellement des composants ferromagnétiques.

La possibilité la plus simple est le **contrôle du matériel utilisé**. Pour les produits Kùchler, environ une tonne de matériel brut est généralement nécessaire pour 100 mètres de forage. Pour le BTD Fùller 350, environ 360 kg pour 100 mètres de forage sont utilisés (fig. 12). Il est facile de contrôler s'il y a assez de sacs de mélange prêt à l'emploi sur place avant que la cimentation ne débute, et combien ont été utilisés. Ce contrôle peut p.ex. être fait par le géologue, le maître d'ouvrage ou l'architecte. L'homogénéité de la suspension et le processus de mélange peuvent également être contrôlés de manière critique, en vérifiant par exemple si les sacs sont déversés de manière continue dans le malaxeur.

La manière la plus importante et la plus simple de vérifier si un mélange est fait correctement est de déterminer la **densité de la suspension mélangée**. La densité peut être simplement déterminée avec une **balance** et un récipient, et le rapport eau/particules solides approprié peut être ajusté. Ceci est particulièrement pertinent pour les malaxeurs continus car, lors d'un mélange dans une cuve ou dans un malaxeur colloïdal, les quantités d'eau fraîche et de mortier brut peuvent être plus simplement dosées et il n'y a pas de dépendance à une alimentation en eau de chantier, rarement constante. Il faut cependant faire attention avec les mélangeurs colloïdaux et les cuves que de l'eau fraîche soit utilisée (pas l'eau du forage !) et que le mélange dure suffisamment de temps. En fait, la détermination de la densité devrait au mieux toujours avoir lieu au début et à la fin du processus de cimentation. Les fabricants de mortiers le conseillent également. Le géologue, le maître d'ouvrage ou l'architecte devrait contrôler qu'une balance adéquate soit sur les lieux et requérir des valeurs consignées. Selon le sondage du chapitre 4, beaucoup d'entreprises de forage indiquent l'utilisation d'une balance. L'expérience montre cependant que cela n'est pas toujours le cas ou alors de manière sporadique, et qu'en général le mélange est fait « au feeling » ou selon des valeurs empiriques. Les valeurs de densité plus que variées présentées dans le chapitre 6 renforcent cette constatation. La problématique est moins grande avec les malaxeurs colloïdaux, car la plupart du temps, les indications des fabricants indiquent toujours la même quantité d'eau et le même nombre de sacs de mortier à mélanger (pour le BTD Fùller 350 p.ex. 2 sacs et 110 litres d'eau). Alternativement, la mesure de densité peut aussi être faite avec un **hydromètre**. Ceux-ci donnent un résultat précis certes plus rapidement, mais ils sont moins robustes.

Si le processus de cimentation doit être mesuré très précisément, il est judicieux de faire des **mesures de cimentation digitales**. Pour cela, on trouve divers instruments sur le marché suisse qui sont proposés par des bureaux de géologie, des fabricants de mortier ou des bureaux métrologiques. Certains types d'instruments permettent de mesurer plusieurs paramètres simultanément. Ceux-ci sont la quantité injectée dans le temps, la pression de l'injection, le débit et la densité de la suspension. De cette manière, la densité de suspension correcte et la quantité de remplissage peuvent être contrôlées pendant tout le processus de remplissage de manière ininterrompue et relativement certaine, et le rapport d'eau/particules solides correct peut être réglé. Les pertes dans des cavités peuvent également être détectées et localisées. Ces mesures instrumentales sont souvent recommandées pour les champs de sondes géothermiques plus importants. Selon l'expérience, ces mesures peuvent être faites par le personnel de forage lui-même ou par des externes. Peu d'appareils de forage en Suisse ont de tels instruments directement intégrés sur la machine pour pouvoir enregistrer la cimentation. Ces mesures sont comparativement chères pour de petits objets et les méthodes de contrôle mentionnées auparavant sont amplement suffisantes, particulièrement parce que la surveillance p.ex. du maître d'ouvrage est souvent plus intensive.

On peut généralement constater qu'on ne donne pas beaucoup de poids à la cimentation. Cela est éventuellement dû à une méconnaissance des conséquences possibles, ou au fait qu'on ne peut pas tout voir et qu'on ne peut de toute manière que faire confiance. De ce fait, la cimentation est peu contrôlée. La méconnaissance commence en partie aussi chez le fabricant, comme le montre une réponse. Celle-ci disait que la résistance au froid n'était pas pertinente puisque la cimentation se trouve toujours au-dessous de la limite de gel (plus profond qu'1m de la surface !). Lors de discussions avec des maîtres de forage, il est apparu que beaucoup ne connaissaient pas les conséquences qu'une cimentation lacunaire ou un mauvais mélange pouvaient avoir. Plusieurs planificateurs et géologues accompagnateurs, voire même les maîtres d'ouvrage ont peu de connaissances sur l'importance du type de ciment, de la suspension correctement mélangée et de la cimentation complète.

8 Conclusions et recommandations

8.1 Exigences générales relatives à la cimentation

Dans le chapitre 2, les exigences les plus importantes sont mentionnées, comme par exemple les valeurs limitent d'un matériau cimentaire. Sont citées entre autres : la densité, le rapport eau/particules solides, la résistance à la compression, la porosité, la stabilité structurale par exemple sous l'effet du gel ou des eaux agressives, la rhéologie et la conductivité thermique. Une fois ces exigences satisfaites, la cimentation peut accomplir son rôle de connexion permanente au sous-sol, de transfert de chaleur, de protection de la sonde et de protection des eaux souterraines. Grâce à ces caractéristiques, la qualité du matériau peut être évaluée.

8.2 Exigences et recommandations cantonales

Dans le chapitre 3, les exigences cantonales par rapport aux matériaux cimentaires ont été explicitées. En principe, les cantons font référence aux exigences de la directive de l'OFEV 2009, qui est aussi citée dans la norme 384/6 de la SIA et par le GSP. Des exigences plus rigoureuses que celles présentes dans ces documents sont quasi inexistantes. Toutefois, il est exigé dans la plupart des extraits cités que le remplissage de l'espace annulaire soit fait du bas vers le haut, sans vides et avec une suspension adaptée pour assurer une liaison étanche, permanente, physiquement et chimiquement stable entre la sonde et le sous-sol. Le choix du produit à utiliser est laissé au maître d'ouvrage, de sorte que les exigences soient remplies en adéquation avec les recommandations.

Des matériaux résistants aux sulfates sont rarement demandés. Ceci ne concerne que les cantons dans lesquels se trouvent des formations de gypse/anhydrite qui peuvent éventuellement être traversées lors de forage (par exemple Bâle Campagne, Argovie, Soleure). Une seule exigence concernant la conductivité thermique a été faite (par exemple mise en œuvre d'un ciment avec une conductivité thermique moindre dans les domaines déjà fortement chauffés par les eaux souterraines). D'autres exigences spéciales peuvent être appliquées dans certaines zones géographiques, comme celles concernant les risques d'artésianisme ou de gaz. Celles-ci concernent toutefois plus la réalisation technique de la cimentation (par exemple mise en place d'un packer et cimentation immédiate) que le type ou la qualité du ciment. Généralement, le contrôle de la cimentation ne se fait pas systématiquement voire même plutôt rarement. Dans un seul canton seulement, la demande de permis exige de renseigner le matériau cimentaire utilisé et ses propriétés.

Comme l'a montré l'expérience, la cimentation se fait dans l'ensemble conformément à la législation, mais des cimentations insuffisantes sont encore régulièrement observées (par exemple, avec des vides, mauvaise densité de coulis, coulis non homogène). Des contrôles et une sensibilisation accrue, que ce soit par les géologues, les fournisseurs ou par le canton lui-même, augmenterait automatiquement la qualité de la réalisation. Dans ce cadre, des frais supplémentaires ne doivent pas être obligatoirement générés. Par exemple, les géologues pourraient réaliser cette mission au cours du suivi géologique habituel et organiser les visites sur chantiers de sorte à ce que l'une d'entre elles ait lieu au cours de la cimentation (par exemple, contrôler si la balance et le nombre de sacs suffisant sont présents sur place, demander la valeur de densité mesurée, voir quel appareil de mélange est utilisé).

Le fait que le canton demande une mise en place d'exigences concrètes concernant les propriétés et la qualité de la cimentation est discutable. Si le canton demande notamment certains matériaux pour une meilleure longévité et une amélioration du système total, il se positionne dans une certaine mesure en tant que planificateur et peut être tenu responsable. En fait, l'exigence la plus souvent citée suffit, c'est-à-dire que la sonde soit cimentée de manière étanche, continue, physiquement et chimiquement stable avec le sous-sol.

Les conditions sont un peu différentes par rapport à la résistance au gel. La question qui se pose est de savoir si elle ne doit pas être systématiquement demandée. Car d'après Kriesi, 2017, environ un tiers des 91 sondes géothermiques étudiées sont sous-refroidies et de plus en plus souvent des cas de sondes gelées sont recensés. Le refroidissement potentiel est renforcé par

l'augmentation constante du nombre de sondes géothermiques, qui n'est souvent pas pris en compte lors du dimensionnement des sondes alentours (Ebert, 2017). Alors que les cycles de gel-dégel endommagent fortement les structures des ciments non résistants au gel (chapitre 2 et 6.3), il serait logique du point de vue du canton de recommander la mise en œuvre de ciments résistants pour assurer la protection des eaux souterraines et la pérennité de la cimentation. Le canton est généralement mieux informé que le maître d'œuvre et connaît tous les projets existants. Par conséquent, il serait favorable à la protection des eaux souterraines et à l'efficacité énergétique, que le canton mette en place les exigences nécessaires (par exemple, résistance au gel et meilleure conductivité thermique) dans les zones où, par exemple, il existe une grande concentration de sondes ou des problèmes géologiques.

8.3 Matériaux de remplissage utilisés, qualité et recommandations

Comme le montre le chapitre 4 sur les **statistiques** des mortiers utilisés, relativement peu de mortiers différents sont utilisés. Des matériaux de remplissage spéciaux sont rarement mis en œuvre, à ne représentant qu'environ 10% des cas. Deux fournisseurs dominent le marché. Il est frappant que les entreprises de forage plus petites misent tendanciellement sur d'autres mortiers et mélangeurs que les entreprises de forage plus grosses.

Les **caractéristiques** des matériaux cimentaires de remplissage les plus utilisés sont décrites dans le chapitre 5. Vu qu'il n'y a pas de tests de contrôle indépendants et uniformes pour ces mortiers, la comparaison est difficile et on est en partie tributaire de promotion des produits, car il n'existe parfois aucun rapport de contrôle sur certains paramètres (voir les paragraphes 5 et suivants). La concurrence est compréhensible si les fabricants ne révèlent pas tous les détails ! Les mélanges prêts à l'emploi sont en principe adéquats, du moins si l'on ne tient pas compte de la résistance au gel (cela est confirmé par diverses études, voir références). Mis à part les mélanges standard (voir chapitre suivant), les mélanges prêts à l'emploi remplissent généralement les exigences minimales, même s'il y a en même temps de nettes différences de stabilité structurelle, solidité, décantation, rhéologie etc. (voir les diverses études au chapitre 2). Comme les demandes et donc les souhaits adressés aux fabricants de matériaux viennent généralement des entreprises de forage en Suisse, vu que ces dernières sont libres d'agir dans la plupart des projets, il n'est pas étonnant que l'accent soit particulièrement mis sur la rentabilité, le prix, la malléabilité et la rhéologie. Suite aux discussions avec les fabricants et les maîtres de forage, il apparaît que des exigences comme p.ex. la densité ou la résistance au gel n'entrent pas en compte, tout comme les valeurs concernant p.ex. le coefficient de perméabilité pour certains mortiers utilisés (tab. 2). Généralement, le rapport eau/particules solides, le type et la proportion de minéraux argileux, la sorte et la qualité du clinker sont importants pour la solidité durable, la stabilité structurelle, la décantation, la résistance au gel et aux sulfates, l'étanchéité et la conductivité thermique. Les mortiers spéciaux présentent à ce sujet de très grandes qualités et peuvent être recommandés pour une stabilité et une qualité à long terme (voir p.ex. chapitre 5.4). Comme montré avec les simulations du chapitre 5.4, les coûts supplémentaires négligeables de mortiers améliorés sont totalement justifiés par la plus-value en qualité et l'économie des mètres de forage. On peut dire que, généralement, les fabricants des matériaux de remplissage tout comme ceux des tuyaux de sonde sont encouragés à augmenter la stabilité structurelle et l'étanchéité du système. Cette dernière est p.ex. souvent clairement plus faible lorsque l'on considère l'ensemble du système de tuyaux et de mortier plutôt que seulement le mortier individuellement. Même lorsque cela s'oppose en partie à la rentabilité et la rhéologie, on devrait plutôt viser des densités hautes et donc des rapports eau/particules solides faibles (voir chapitre 2). Cependant, c'est en contradiction avec les sondes relativement profondes en Suisse, afin d'éviter un écrasement des tuyaux de la sonde à cause d'une suspension trop lourde. La qualité effective dépend aussi fortement du mélange et de l'injection corrects (voir les paragraphes 2 et suivants).

De nombreux paramètres agissent de manière opposée, comme par exemple la décantation et les durées de malaxage, tous deux dépendants du rapport eau/particules solides. Des teneurs en eau élevées résultent sur des temps de marche du malaxeur bas et inversement une décantation plus élevée. Une teneur en eau élevée conduit à une meilleure rhéologie mais au contraire aussi à une densité, une étanchéité, une conductivité thermique et une résistance au gel plus faibles ainsi qu'à une décantation plus importante. Il est particulièrement difficile de définir clairement ce qui est bon ou non. Néanmoins, les éléments suivants peuvent être mentionnés pour la durabilité : pour la qualité à long terme, c'est-à-dire la stabilité structurelle, l'étanchéité et le flux de chaleur, les

mortiers à faibles valeurs eau/particules solides et des exigences plus élevées en matière de conductivité thermique, de résistance au gel et aux sulfates, devraient être utilisés (voir aussi références au chapitre 2). Il convient également d'examiner si les exigences relatives aux valeurs relativement importantes du rapport eau/particules solides sont prises en considération, tel que recommandé dans l'aide à l'exécution de l'OFEV (2009) à l'annexe A7. Selon diverses études, ce rapport devrait être au minimum de 1. Le fournisseur principal de mortier en Suisse recommande une valeur de 0.8 pour ses mortiers. Une telle exigence est applicable. Les mélanges standards critiques ou les mélanges particuliers contenant 100 kg de bentonite, 200 kg de ciment et 900 l d'eau, ne seraient en revanche plus autorisés (voir chapitres suivants)

Les mélanges standards ont généralement les résultats les plus mauvais à chaque test de contrôle. Cela se traduit comme ceci : une solidité insuffisante, pas de résistance au gel, une perméabilité à l'eau généralement plus élevée, une conductivité thermique moindre, une décantation importante, un volume souvent instable, et une désintégration fréquente (voir p.ex. Niederbrucker, R. & Steinbacher, N., 2007). Théoriquement et dans la pratique, des meilleurs mélanges de matériaux permettent de remplir certaines de ces exigences. En comparaison avec les mélanges prêts à l'emploi, la contrôlabilité est problématique, car il y a une très grande marge lors de la fabrication du mortier. Il faut une grande expérience dans le choix du matériel et le mélange (p.ex. type de ciment et de minéraux argileux adéquats). Comme le montrent déjà les différentes approches de mélange des mélanges prêts à l'emploi, on peut supposer que les différences de qualité entre les mélanges standards sont encore plus étendues. De bonnes suspensions avec de bons produits sont certainement parfois mises en œuvre. Toutefois, il faut privilégier les mélanges prêts à l'emploi en raison des meilleurs résultats aux tests, de la meilleure contrôlabilité et de la marge d'erreur plus faible lors de la fabrication.

Les caractéristiques des mortiers sont généralement mesurées différemment, car il n'y a parfois pas de **méthodes de test standardisées et uniformisées**. Les fabricants testent fréquemment les mortiers à l'intérieur dans leurs propres laboratoires, de sorte que la comparaison n'est souvent pas possible en raison d'équipements de laboratoire et de méthodes de test différents. Il est p.ex. pertinent de savoir combien de jours après le mélange le test survient, s'il est fait dans un milieu humide ou sec ou s'il est mesuré dans un système ouvert ou fermé. Dans un milieu humide par exemple, on obtient d'autres conductivités thermiques et solidités que dans un milieu sec. Aussi, la décantation et le développement de la structure sont différents dans un système fermé ou ouvert, duquel l'eau peut s'échapper. De plus, on peut promouvoir un mortier de telle sorte qu'il présente une bonne conductivité thermique (p.ex. testé avec un rapport eau/particules solides faible), mais qui n'est presque pas injectable dans les trous de forage plus profonds. Il sera donc mélangé de manière à ce qu'il soit plus liquide sur le site de forage, afin qu'il puisse être injecté, mais ne peut donc pas tenir la caractéristique promise. C'est similaire pour la décantation ; quand la valeur est-elle définie, directement ou peu après la cimentation ou seulement après le durcissement, et s'agit-il d'un système ouvert ou fermé. En particulier les mortiers avec un rapport eau/particules solides haut ont tendance à prendre plus de temps pour se durcir, surtout lorsque de l'humidité s'introduit dans le sous-sol pendant la phase de durcissement. Concernant la résistance au gel, la problématique des diverses méthodes de contrôle a été décrite dans le chapitre 2. Tous ces points montrent à quel point il serait important qu'il y ait des procédures de contrôle adéquates et standardisées et que les mortiers soient testés selon celles-ci de manière récurrente et indépendante. Les fabricants suisses surtout sont désireux de tester leurs mortiers et de les modifier conformément à ces procédures si nécessaire. Il est éventuellement demandé ici à l'Etat d'organiser une première série de tests, afin que la nécessité de le faire soit présentée de manière transparente.

Dans le chapitre 6 et dans certains autres paragraphes, la **réalité sur le site de forage** est décrite. Il y a généralement beaucoup d'équipes de forage qui procèdent au remplissage de manière minutieuse et correcte. Cependant, on remarque qu'elles ne connaissent souvent pas l'importance p.ex. du type de ciment, de la densité correcte ou d'une cimentation ininterrompue. On observe encore et encore que les mélanges ne sont pas faits selon les directives et que la densité est adaptée au hasard. On remarque également des différences générales entre les entreprises de forage. Il est récurrent que l'injection ne soit pas homogène (concerne surtout les malaxeurs continus, quand la marchandise des sacs n'est pas versée continuellement ou l'alimentation en eau n'est pas constante), que le remplissage n'ait pas lieu en une fois de manière ininterrompue de bas en haut (surtout pour les sondes profondes, on remplit souvent par après depuis le haut à l'aide d'un 2^{ème} tuyau d'injection plus court), ou que la boue / l'eau du forage soit utilisée pour le mélange. En conséquence, le remplissage ne peut pas satisfaire totalement certaines de ses exigences (solidité, étanchéité, connexion avec le sous-sol et conductivité

thermique constantes dans toute la colonne de forage). Il existe un danger à long terme que la cimentation s'abîme plus vite lors des changements de gel-dégel. Mais tous les mélangeurs sont capables de produire des suspensions correctes. L'important est une bonne formation et sensibilisation de chaque employé, éventuellement du fournisseur, avec des preuves appropriées, ainsi qu'un bon entretien. Cela concerne également les contremaîtres des entreprises de forage, qui indiquent aux maîtres de forage les matériaux à utiliser et les standards de qualité à respecter. Il faut absolument prendre une balance sur place et l'utiliser. La densité devrait être mesurée au début et à la fin d'injection, particulièrement avec les malaxeurs en continu, et le rapport de mélange eau/particules solides du fabricant devrait aussi être respecté. Une alimentation constante en eau devrait être assurée. Il devrait toujours y avoir assez de mélange brut sur place avant le début de la cimentation, ce qui n'est parfois pas le cas. Une sensibilisation générale devrait être faite par le GSP, aux fournisseurs et aux géologues. Le type de ciment, la densité ainsi que le rapport eau/particules solides et les problèmes éventuels devraient toujours être consignés. Il ne s'agit pas uniquement de voir du mortier à la surface du trou de forage ! Le ciment doit aussi être capable de tenir ses exigences sur le long terme et remplir complètement le trou de forage. Les maîtres de forage ayant une grande expérience avec toutes les techniques de mélange rapportent qu'il privilégient les malaxeurs colloïdaux, car ils mènent à moins de problèmes techniques (p.ex. obstruction), ils permettent une injection plus rapide et une bonne suspension injectable, et ils ne dépendent pas de l'alimentation en eau qui peut souvent varier fortement sur les chantiers. Ils assurent également une meilleure homogénéité et un meilleur contrôle sur chaque composant du mortier. De plus, ils génèrent moins d'erreurs concernant la densité, car la même quantité de sacs de ciment et d'eau (dont l'ajout est dans certain cas automatisé) est utilisée pour chaque mélange, selon les indications du fabricant. Il est donc conseillé d'utiliser préférentiellement les malaxeurs colloïdaux, malgré leur coût d'acquisition plus élevé.

En général, on constate que la plupart des équipes de forage procèdent au remplissage selon leurs connaissances et les bonnes pratiques, mais ne donnent pas de grande importance à la qualité générale de la cimentation (il s'agit plutôt de simplement remplir le trou !). Cela est éventuellement dû à une méconnaissance des conséquences possibles, ou au fait qu'on ne peut pas tout voir et que par la suite la cimentation ne peut que difficilement être vérifiée. Même les fabricants ne connaissent pas toutes les exigences, comme le montre une réponse. L'un d'eux a déclaré que la résistance au gel n'était pas pertinente, le remplissage étant toujours situé à une profondeur hors gel. Lors de discussions avec des maîtres de forage, il est apparu que beaucoup ne connaissaient pas les conséquences qu'une cimentation lacunaire ou un mauvais mélange pouvaient avoir. Nous avons p.ex. déjà entendu qu'ils utilisaient l'eau du forage pour le mélange, afin d'économiser de la marchandise en sacs et de devoir jeter moins de boue de forage. Souvent, plusieurs planificateurs et géologues accompagnateurs, voire même les maîtres d'ouvrage ont également peu de connaissances sur l'importance du type de ciment, de la suspension correctement mélangée et de la cimentation ininterrompue. Ceci est démontré par le fait que le choix du type de mortier est fait la plupart du temps par l'entreprise de forage, et que celle-ci en utilise un plutôt bon marché, ce qui est compréhensible avec la pression actuelle sur les prix. Une fois de plus, l'importance d'une sensibilisation générale apparaît clairement.

8.4 Matériaux de remplissage améliorés

Dans le chapitre 5.4, le rapport coûts-bénéfices des matériaux améliorés a été exposé. En général, les matériaux de remplissage améliorés présentent une qualité et une stabilité à long terme notablement supérieures. Ils sont habituellement résistants au gel et aux sulfates et ont de meilleures conductivités thermiques. Certes, ils augmentent le prix du mètre de forage de quelques pourcents, mais ils ont pour effet de diminuer le nombre de mètres de forage nécessaires, en raison de la résistance plus faible du trou de forage ; donc, les frais supplémentaires pour le mortier plus cher sont plus ou moins compensés par les mètres de forage économisés. Vu qu'un mortier de meilleure qualité entraînant des coûts supplémentaires moindres et qui remplit toutes les conditions peut être utilisé, on devrait vraiment réfléchir s'il ne devrait pas être utilisé en général.

8.5 Résumé: Comment varie la qualité des mortiers utilisés en Suisse

Le diagramme suivant (fig.18) tente d'illustrer quels mortiers utilisés en Suisse remplissent quelles conditions. Il convient de noter qu'il n'existe pas de données exhaustives et indépendantes sur les méthodes de test appropriées concernant les différentes propriétés du mortier. Les indications doivent donc être comprises comme des tendances. De plus, il faut relever que certaines caractéristiques s'opposent. Différents mortiers font du sens, selon les exigences d'utilisation et les considérations coûts-bénéfices. Ils ont été classifiés en mélanges prêt à l'emploi spéciaux, standards et bon marché, ainsi qu'en mélanges classiques standard ou particuliers. Plus le type de mortier est écrit gros, plus il est utilisé fréquemment en Suisse. La barre grise montre la portée des densités de mortier mesurées sur les sites de forage (pour les mélanges particuliers, une seule valeur a été collectée et la variation est donc inconnue!). Les différents rapports d'eau/particules solides ont une influence sur les propriétés qui sont nommées à droite dans les flèches. Les différentes caractéristiques entre les classes de mortiers sont nommées dans la flèche supérieure.

Il est difficile de faire des séparations claires, car chaque matériau présente différentes propriétés spéciales ou positives. P.ex. le BTD Füller 350 a un rapport d'eau/particules solides très haut, ce qui est mauvais pour la résistance au gel selon certaines études. Mais il est très résistant aux sulfates, facilement injectable et rentable. La classification doit être vue schématiquement et doit être spécialement considérée selon le besoin et les exigences d'utilisation. Généralement, les mélanges particuliers sont critiqués par les études concernant leur résistance au gel et leur contrôlabilité de qualité par les maîtres d'ouvrage. En raison des faits décrits ci-dessus, les matériaux et densités contenus dans la zone verte doivent être conseillés, afin d'assurer la meilleure qualité et durabilité de la cimentation. Comme montré plus haut, les frais supplémentaires des matériaux améliorés sont faibles en comparaison avec l'économie de mètres de forage et la meilleure qualité.

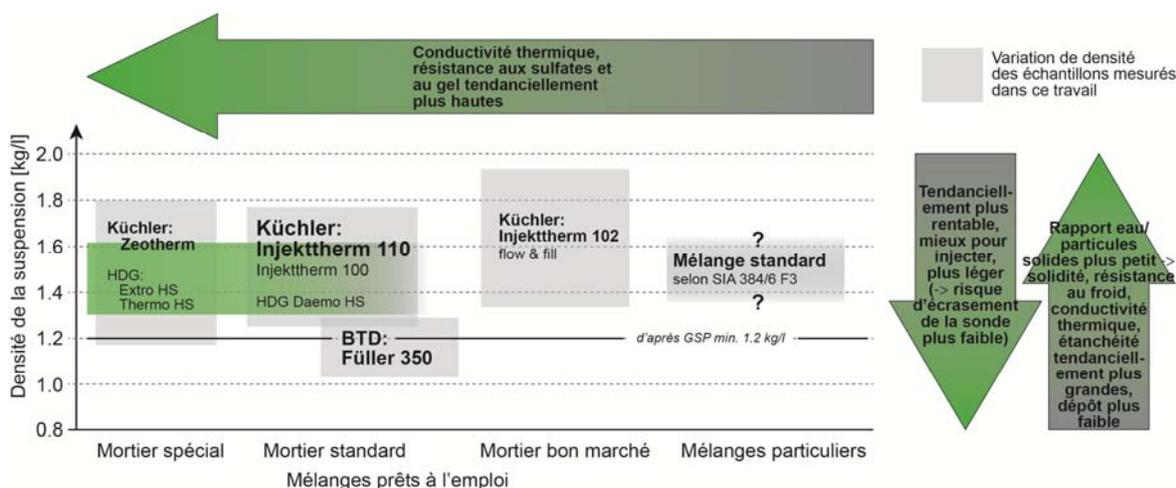


Fig. 20 Qualité des matériaux de remplissage utilisés

Un bon matériau de remplissage doit garantir une haute étanchéité pour la protection des eaux souterraines, être stable durablement et doit permettre un bon contact thermique avec le sous-sol. S'il ne remplit pas ces exigences, des dommages ne peuvent pas être exclus. Ceux-ci peuvent p.ex. être une connexion entre deux nappes phréatiques ou une perte de performance.

8.6 Résumé des recommandations d'amélioration

Déjà lors de la planification, il faudrait réfléchir au mortier approprié qui devrait être utilisé. Dans ce cadre, il faudrait également prendre en compte la qualité et la durabilité, tout comme la conductivité thermique. Les frais supplémentaires pour un meilleur mortier sont négligeables. Il

faut également un dimensionnement correct en prenant en compte les sondes voisines, les paramètres du sous-sol et le remplacement de chauffage, afin que le gel puisse être exclu.

Concernant la qualité des mortiers, ceux-ci doivent être testés à l'aide de méthodes de contrôle normalisées, comparables et adéquates. C'est seulement ainsi que les mortiers pourront être comparés les uns avec les autres, ce qui n'est actuellement pas possible en raison de valeurs et rapports de contrôle en partie incomplets, ou en raison du fait que les mesures sont faites par des particuliers avec leurs propres tests dans leurs propres laboratoires. Cela demande des efforts de la part d'organismes indépendants, par exemple de l'Etat. Les exigences doivent elles aussi être contrôlées de manière critique et être éventuellement complétées. Il serait censé de compléter les exigences de la directive de l'OFEV (2009) avec les rapports d'eau/particules solides, essentiels pour déterminer la qualité.

La qualité de la cimentation pourrait sûrement être améliorée par une sensibilisation complète des maîtres d'ouvrage, planificateurs, géologues accompagnants, mais aussi des entreprises de forage elles-mêmes. Cela concerne le mélange et l'injection corrects tout comme les techniques de mélange resp. les appareils fonctionnels. La densité des mortiers devrait p.ex. surtout être contrôlée sur le chantier, à l'aide d'une balance, dans les malaxeurs continus. Sur le chantier, beaucoup d'éléments sont contrôlés précisément, mais la cimentation, qui se trouve sous le sol et n'est donc pas visible, n'est guère remise en question. Un contrôle accru ne pourrait pas faire de mal, p.ex. pour voir si la cimentation a vraiment été faite de manière ininterrompue de bas en haut, est homogène et a été mélangée et injectée selon les indications du fabricant.

Du côté des autorités cantonales, on pourrait réfléchir si des mortiers spéciaux (p.ex. résistants au gel et aux sulfates ou assurant une grande étanchéité du système) garantissant des exigences précises devraient être utilisés dans les endroits particulièrement critiques (p.ex. dans les zones avec beaucoup de sondes voisines ou les zones d'eaux souterraines étendues).

Il faut prendre en compte que, pour toutes les recommandations, des exigences plus importantes et une augmentation des contrôles engendrent obligatoirement des coûts plus élevés. Il faut donc faire preuve de mesure, afin que la pression sur les prix dans le secteur des sondes géothermiques ne devienne pas plus importante. Toutefois, les normes existantes doivent être respectées et de nombreuses recommandations mentionnées plus haut ne génèrent pas de frais, comme le montre le prix identique des procédés pour de nombreux objets différents.

Chaque fait dommageable nuit au secteur des sondes géothermiques et doit être empêché. De nombreux faits dommageables connus jusqu'alors, comme p.ex. à Baden-Württemberg, sont dûs à des cimentations insuffisantes. Ceux-ci montrent à quel point il est important de faire une injection minutieuse avec de bons matériaux.

9 Observations finales

Il est encore une fois explicitement souligné que, malgré toutes les critiques exprimées dans ce document, de bons matériaux de remplissage sont disponibles sur le marché ainsi que de bonnes équipes de forage suffisamment formées et expérimentées et qui remplissent les normes et les recommandations de manière conforme.

Certains points critiques évoqués se fondent éventuellement sur des connaissances techniques manquantes dans la branche et éventuellement sur une communication trop faible entre les autorités, les services spécialisés qui définissent les exigences, les planificateurs, les entreprises de forage et les fabricants / fournisseurs de mortier. Par conséquent, ce travail peut être vu comme une base de discussion entre les différentes parties concernées, afin que la sonde géothermique, sa cimentation incluse, puisse continuer à être optimisée dans le futur quant à sa qualité, sa durabilité, sa sûreté, son efficacité énergétique et sa rentabilité.

10 Références

- Anbergen, H., 2015. Prüfverfahren zur Bestimmung des Frost-Tau-Wechseleinflusses auf Hinterfüllbaustoffe für Erdwärmesonden. Dissertation, TU Darmstadt, 196 Seiten.
- Arbeitskreis „Geothermie“ der Fachsektion Hydrogeologie und Ingenieurgeologie, 2015. Empfehlungen Oberflächennahe Geothermie – Planung, Bau, Betrieb und Überwachung – EA Geothermie“. Herausgeber Deutsche Gesellschaft für Geowissenschaften e.V., Seiten 163-197.
- Bund/Länderarbeitsgruppe der Staatlichen geologischen Dienste der Deutschen Bundesländer, Ad-hoc Arbeitsgemeinschaft Hydrogeologie, 2015. Empfehlung für die Anforderungen an die hydraulische Durchlässigkeit des Systems Erdwärmesonde, 64 Seiten.
- Bundesamt für Umwelt BAFU, 2009. Vollzugshilfe „Wärmenutzung aus Boden und Untergrund“, 51 Seiten.
- Ebert, A. und Dörner, E., 2017. Bericht «EWS-Umfrage» Ergebnisse zu einer Umfrage zum Vorgehen bei der Dimensionierung von Erdwärmesonden bei Beachtung von Nachbarsonden. Energie Schweiz, Bundesamt für Energie BFE, 55 Seiten.
- Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz FWS, 2013. Reglement für Gütesiegel für Erdwärmesonden – Bohrfirmen, 14 Seiten.
- Herrmann, V.J., 2008. Ingenieurgeologische Untersuchungen zur Hinterfüllung von Geothermie-Bohrungen mit Erdwärmesonden. Dissertation, Universität Fridericiana zu Karlsruhe, 192 Seiten.
- Hess, M., Sommerhalder, M., Burger, F., Badoux, V., 2015. Qualitätssicherung Erdwärmesonden, Übersicht Messmethoden zur Prüfung der Hinterfüllung. Energie Schweiz, Bundesamt für Energie BFE, 38 Seiten.
- Kriesi, R., 2017. Bericht «Analyse von Erdwärmesondenanlagen» Abschätzung des Anteils unterkühlter Erdwärmesonden von Anlagen, die vor Einführung der SIA 384/6 erstellt wurden. Energie Schweiz, Bundesamt für Energie BFE, 42 Seiten.
- Niederbrucker, R. & Steinbacher, N., 2007. Eignungsuntersuchung von Verpressmaterialien für Erdwärmesonden. Technischer Endbericht, Land Oberösterreich, 61 Seiten.
- Rohner, E. und Rybach, L., 2001. Lebensdauer von Erdwärmesonden in Bezug auf Druckverhältnisse und Hinterfüllung. Bundesamt für Energiewirtschaft, 30 Seiten.
- SIA-Norm 384/6, 2010. Erdwärmesonden. 76 Seiten.
- Taylor, H. F. W., 1992. Cement Chemistry, third edition: London, Thomas Telford, 475 Seiten.
- Touzin, M., 2017. Untersuchung der Einflussfaktoren auf die Temperaturverteilung im Tiefenbereich von oberflächennahen Erdwärmesonden in der Nordwestschweiz. Masterarbeit, Universität Basel. 198 Seiten.
- Verbund-Forschungsvorhaben EWS-tech, 2016. Abschlussbericht zu dem Forschungsvorhaben EWS-Tech, Weiterentwicklung der Erdwärmesonden-Technologie. 368 Seiten.

