

Document public



Projet REMEDIA-FOR
Traitement de cas pratiques de travaux
de remédiation, développement et test sur site
de moyens instrumentaux d'investigation
dans les sondes géothermiques défectueuses

Rapport final

BRGM/RP-64904-FR

Juillet 2015

P. Monnot, A.-V. Barras, L. Grabenstaetter

Avec la collaboration de C. Frey (AKWATERRA), L. Glady (GAMEXPLO)

AKWATERRA
Conseils Eau & Sous-Sol

GAMEXPLO



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Étude réalisée dans le cadre des projets de Recherche du BRGM

Ce document a été vérifié par : Mikael Philippe, responsable de la plateforme expérimentale Géothermie du BRGM



Date : 30/07/2015

Approbateur :

Nom : Bernard Sanjuan Fonction : Responsable de l'unité REG

Date : 30/07/2015

Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Mots clés : Risques, Évaporites, Sondes géothermiques, Inspection caméra, Purge sondes géothermiques, Forage, Remédiation, Sinistres, Investigation, Forage d'eau, Température

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Monnot P., Barras A.V., Grabenstaetter L. (2015) – Projet REMEDIA-FOR - Traitement de cas pratiques de travaux de remédiation, développement et test sur site de moyens instrumentaux d'investigation dans les sondes géothermiques défectueuses - Rapport final. Rapport BRGM/RP-64904-FR, 192 p., 27 fig., 13 ann., 1 cd.

Fiche synthèse

1. Contexte

Les enjeux environnementaux et financiers liés aux sinistres récents qui ont été avérés sur plusieurs ouvrages géothermiques sur sondes géothermiques dans l'Est de la France et Outre-Rhin (Hilsprich, Kirchheim, Lochwiller, Staufen), sont de première importance : ils impactent en surface, des lotissements, parfois des villages en entier (gonflement des terrains et fissuration des bâtiments) et peuvent in fine menacer la sécurité des habitants. Ces enjeux s'accompagnent de l'absence d'instrument pour investiguer les sondes une fois le forage réalisé pour préciser l'origine de la malfaçon de l'ouvrage (défauts de cimentations, fuite de fluide caloporteur, écrasement de tube, déviation, profondeur, ...).

2. Objectifs

Les objectifs du projet REMEDIA-FOR ont été d'identifier des **cas spécifiques** de forages géothermiques ayant connu des problèmes pour la mise en œuvre de sondes géothermiques verticales, d'établir des solutions de remédiation et le **développement de nouveaux outils d'investigation** dans le domaine des sondes géothermiques verticales.

3. Description de l'opération

La **première phase du projet** s'est focalisée sur **deux cas spécifiques** (Kirchheim et Storengy). Le BRGM a confié à AKWATERRA la réalisation d'un **état de l'art** en Allemagne et en Suisse, sur les méthodes d'instrumentation de sondes géothermiques verticales et les méthodes de remédiation. Le BRGM a confié à Camexplo, dans la **deuxième phase du projet**, le développement de **deux instruments de mesures miniaturisés**, pour permettre d'investiguer des sondes géothermiques équipées de tubes de diamètre 32 mm (diamètre extérieur).

4. Synthèse des résultats

Concernant le cas de **Kirchheim**, deux hypothèses de cause de la mise en connexion des évaporites avec l'eau souterraine ont été considérées. Concernant le cas de **Storengy**, la solution retenue a été l'injection de billes d'argiles (smectite du Wyoming) enrobées avec une **gomme végétale**. Les conclusions de l'**état de l'art** montrent qu'il reste encore des progrès à faire pour **miniaturiser** les instruments de mesure. Les **deux instruments de mesures développés ont été** :

- une sonde pour mesurer le profil vertical de **température** du fluide caloporteur dans les sondes géothermiques. Les valeurs de température mesurées montrent un écart maximal de température de 0.3 °C avec celles mesurées avec les fibres optiques. **Ce résultat démontre la fiabilité de la sonde développée par Camexplo pour cette gamme de température (9 – 14 °C)**. Le test réalisé sur le site de Kirchheim a permis de mettre en évidence une « anomalie » thermique, visible entre 55 et 75 mètres ;
- une **caméra** pour permettre d'investiguer l'état du tube et de repérer les zones endommagées (fuite). Les essais réalisés sur la plateforme expérimentale du BRGM ont démontré la **très bonne résolution de la caméra non étanche**, mais en revanche **l'impossibilité d'enregistrer des images nettes en présence d'eau glycolée**. Les différents essais réalisés sur le site de Kirchheim ont permis de révéler un écrasement du tube à 50 m de profondeur, à l'origine du blocage de la sonde de température. Ce défaut se matérialise sur l'image par une ovalisation du tube.

5. À retenir

Les solutions de remédiations sont spécifiques au contexte hydrogéologique local. Les deux instruments de mesure développés dans le cadre du projet REMEDIAFOR (sonde de température, caméra) permettent de réaliser des investigations rapides et peu onéreuses dans des tubes de sonde de diamètre intérieur de 25 mm. Dans tous les cas, les anomalies enregistrées devront trouver une interprétation en adéquation avec le contexte hydrogéologique local ou en prenant en compte le régime d'exploitation de l'ouvrage.

6. Valorisation

Une valorisation des instruments développés dans le cadre du projet REMEDIA-FOR peut être envisagée dans le cadre d'expertises scientifiques ou juridiques afin de répondre aux enjeux environnementaux et financiers liés à des sinistres sur sondes géothermiques. Les protocoles de mesure pourraient intégrer la norme NF X10-970 sur la mise en œuvre des sondes géothermiques et être mentionnés dans le décret sur la géothermie de minime importance comme mesures de contrôle et d'inspection.

7. Suite envisageable au projet REMEDIA-FOR

Les perspectives pour la poursuite de ces travaux seraient d'améliorer et poursuivre le développement des deux instruments de mesure afin de les rendre opérationnels pour leur mise en vente sur le Marché. Cette approche implique également l'amélioration des méthodes de diagnostic en réalisant plusieurs tests sur des cas concrets où des problèmes se posent, en France (Lochwiller par exemple) ou en Allemagne (Staufen). Ces différents essais in-situ permettraient d'affiner les protocoles de mesure et d'interprétation des résultats.

Summary sheet

1. Background

The environmental and financial issues related to recent claims that have been proven over several books on geothermal ground probes in the east of France and the Rhine (Hilsprich, Kirchheim, Lochwiller, Staufen) are of primary importance : they impact surface , subdivisions, sometimes entire villages (swelling of land and buildings cracking) and may ultimately threaten the security of the inhabitants. These challenges are accompanied by the absence of instrument to investigate the probes once the drilling conducted to clarify the origin of the workmanship of the structure (defects cementing, coolant leaks, tube crushing, deviation, depth, ...).

2. Objectives

The objectives of REMEDIA-FOR project were to identify specific cases of geothermal wells that have experienced problems in the implementation of vertical geothermal probes, establish remediation solutions and development of new investigative tools in the field of vertical geothermal probes.

3. Description of operation

The first phase of the project focused on two specific cases (Kirchheim and Storengy). BRGM told AKWATERRA achieving a state of the art in Germany and Switzerland, on methods of instrumentation vertical geothermal probes and methods of remediation. BRGM told Camexplo in the second phase of the project, the development of two instruments of miniaturized measures to enable investigate geothermal probes equipped with 32 mm diameter tubes (outer diameter).

4. Summary of results

Concerning the case of Kirchheim, two hypotheses because of the connection setting evaporites with groundwater were considered. Concerning the case of Storengy, the solution was injected ball clays (smectite Wyoming) coated with a vegetable gum. The findings of the state of the art shows that there is still room for improvement to miniaturize measuring instruments. The two instruments developed measures were:

- a probe for measuring the vertical profile of temperature of the cooling fluid in the borehole heat exchangers. Measured temperature values show a maximum temperature difference of 0.3°C with those measured with the optical fibers. This result demonstrates the reliability of the probe developed by Camexplo for this temperature range (9 - 14°C). The test carried out on the site of Kirchheim helped to highlight an "anomaly" heat, visible between 55 and 75 meters;
- a camera to enable the state to investigate the tube and identify the damaged areas (leakage). Tests carried out on the experimental platform of BRGM have demonstrated the very good resolution of the non-waterproof camera, but however unable to record clear images in the presence of brine. The various tests performed on the Kirchheim site have revealed a crushing of the tube 50 m deep, causing the blockage of the temperature sensor. This defect materializes image by ovalization of the tube.

5. To remember

Remediation solutions are specific to the local hydrogeological context. The two measuring instruments developed within the project REMEDIAFOR (temperature sensor, camera) are used to perform fast and inexpensive investigations into probe tube inner diameter of 25 mm. In all cases, the recorded abnormalities will have to find an interpretation consistent with the local hydrogeological context or by taking into account the operating regime of the book.

6. Valuation

A valuation of the instruments developed under the REMEDIA-FOR project can be seen in the context of scientific and legal expertise to meet the environmental and financial issues related to claims on geothermal probes. The measurement protocols could integrate the NF X10-970 standard implementation of geothermal probes and to be mentioned in the decree on geothermal energy as minor as control and inspection measures.

7. Following the possible REMEDIA-FOR project

The prospects for the continuation of this work would improve and further develop the two measuring instruments to make them operational for their sale on the market. This approach also involves the improvement of diagnostic methods in carrying out several tests on concrete cases where problems arise in France (Lochwiller for example) or Germany (Staufen). These in-situ testing would refine the measurement protocols and interpretation of results.

Résumé exécutif

1. Contexte

Suite à une multiplication de sinistres récents qui ont été avérés sur plusieurs ouvrages géothermiques de minime importance sur sondes géothermiques dans l'Est de la France et Outre-Rhin (Hilsprich, Kirchheim, Lochwiller, Staufen), deux enjeux apparaissent aujourd'hui : i) tirer les enseignements de ces situations afin que cela ne se reproduise pas ii) développer des outils et protocoles pour comprendre les phénomènes et y remédier.

Les enjeux environnementaux et financiers liés à ces sinistres sont de première importance : ils impactent en surface, des lotissements, parfois des villages en entier (gonflement des terrains et fissuration des bâtiments) et peuvent in fine menacer la sécurité des habitants. Ces enjeux s'accompagnent de l'absence d'instrument pour investiguer les sondes une fois le forage réalisé pour préciser l'origine de la malfaçon de l'ouvrage (défauts de cimentations, fuite de fluide caloporteur, écrasement de tube, déviation, profondeur, ...). Dans le contexte du développement des énergies renouvelables et de la transition énergétique, le recours à la géothermie de minime importance est encouragé. Cependant, la réalisation de sondes géothermiques peut présenter des risques liés à des phénomènes géologiques et hydrogéologiques.

La synthèse bibliographique précédemment réalisée par le BRGM, en partenariat avec l'ONEMA et l'ADEME, sur les impacts potentiels de la géothermie très basse énergie (BRGM/RP-59837-FR) a fait ressortir que chaque phase de la construction d'une installation géothermique peut être le vecteur d'impacts environnementaux plus ou moins importants. Les actions les plus sensibles sont celles qui affectent des milieux géologiques particuliers, dans lesquels des difficultés techniques majeures sont susceptibles de survenir en phase de réalisation de l'installation (foration). Une fois le sinistre déclaré, il est impératif de neutraliser l'effet de la ou les sondes défectueuses. La problématique émergeant seulement, les méthodes de remédiation ne sont pas encore éprouvées. Le projet REMEDIA-For cofinancé par l'ADEME et le BRGM a donc vu le jour.

2. Objectifs

Les objectifs du projet REMEDIA-FOR ont été, dans la première phase du projet, d'identifier des **cas spécifiques**, en France ou à l'étranger, de forages géothermiques ayant connu des problèmes pour la mise en œuvre de sondes géothermiques verticales ou de forages d'eau à usage géothermique, d'établir des recommandations techniques, à titre préventif et à titre curatif et proposer des solutions concrètes d'investigation et de remédiation reconnues par les professionnels.

Après une année de travail, le BRGM et le comité de suivi ont fait le constat que le nombre de cas concrets proposés notamment par les foreurs se sont avérés être très limités (2 cas : Kirchheim + Storengy) et ont décidé en conséquence, en concertation avec l'ADEME, de limiter cet axe et de réorienter le projet vers un nouvel objectif : **le développement de nouveaux outils d'investigation** (instruments de mesure) dans le domaine des sondes géothermiques verticales qui constituent un préalable obligatoire à tous travaux de remédiation.

3. Description de l'opération

Le projet REMEDIA-FOR s'est focalisé, dans la **première phase du projet**, sur **deux cas spécifiques** de forages géothermiques ayant connus des problèmes pour la mise en œuvre de sondes géothermiques verticales (Kirchheim et Storengy), mettant en avant des recommandations techniques, à titre préventif et à titre curatif et proposant des solutions concrètes d'investigation ou de remédiations reconnues par les professionnels. Les actions suivantes ont été menées en 2014 :

- mise en place par le BRGM d'un comité de suivi regroupant des professionnels du forage, des bureaux d'études sous-sol, des représentants des assureurs et des pouvoirs publics et l'Association Française des Professionnels de la Géothermie (AFPG). La liste des personnes participant au comité de suivi est donnée à l'annexe 1 ;
- établissement d'un protocole pour le traitement de cas spécifiques ;
- recensement de cas spécifiques et sélection de deux cas pour être traités dans le cadre du projet REMEDIA-FOR ;
- traitement de deux cas : Kirchheim, Storengy.

En préalable à tous travaux de remédiation, l'investigation des sondes est nécessaire afin de préciser l'origine de la malfaçon de l'ouvrage, les caractéristiques de l'ouvrage à traiter (profondeur, déviation, etc..) et d'identifier la ou les sondes défectueuses dans le cas d'un champ de sondes. Il a été demandé à AKWATERRA de mener **un état de l'art** en Allemagne et en Suisse, pays équipés plus largement qu'en France de tels ouvrages géothermiques, afin d'établir l'état de l'art sur les méthodes d'instrumentation de sondes géothermiques verticales et les méthodes de remédiation.

En se basant sur les résultats de cette enquête, le BRGM a proposé au comité de pilotage, dans la **deuxième phase du projet**, d'initier le développement **de deux instruments de mesures miniaturisés**, de plus petits diamètres que ceux développés en Allemagne, afin de pouvoir investiguer des sondes géothermiques équipées de tubes de diamètre 32 mm (diamètre extérieur). Ce développement a été confié à la PME Camexplo. Les actions suivantes ont été menées en 2015 :

- développement préliminaire d'outils pour réaliser des investigations à l'intérieur de sondes géothermiques verticales de diamètre 32 mm et notamment :
 - un prototype de sonde température mise au point par la PME CAMEXPLO ;
 - deux prototypes de système caméra miniature de 16 mm de diamètre avec éclairage et en haute résolution, étanche et non étanche, mise au point par la PME CAMEXPLO ;
- mise en place de tests préliminaires pour validation des prototypes (température, caméra) au niveau de la plate-forme expérimentale du BRGM à Orléans par la PME CAMEXPLO ;
- réalisation de tests in-situ sur un cas de sinistre alsacien pour validation des prototypes (température, caméra et état de cimentation).

4. Synthèse des résultats

Le traitement des deux cas spécifiques durant la **première phase du projet** a permis de définir des solutions de remédiation adaptées aux problématiques locales.

Le premier cas traité a été celui du site de **Kirchheim** : mise en contact d'un aquifère avec une couche évaporitique par le biais de sondes géothermiques verticales. Les solutions de remédiation ont été proposées, en considérant **deux hypothèses** de cause de la mise en connexion des évaporites avec l'eau souterraine :

1. l'eau dans le forage provient du déversement de la nappe superficielle et hydrate les couches évaporitiques sous-jacentes : la solution consisterait à tuer le forage en réalisant une multitude de forages d'injection dans le pourtour des sondes, dans un rayon de 5 à 10 m. Ces forages auraient pour objectif de reconstituer la couche de protection constituée par les argiles déstructurées qui

s'intercalent entre la couche aquifère superficielle (vers 6 m) et le toit des évaporites à 35 m environ ;

2. l'eau provient d'un aquifère présent en profondeur : la solution serait de tuer le forage, en réalisant une multitude de forages autour de la sonde à neutraliser. Ces travaux nécessiteraient au préalable la réalisation de piézomètres dans une enveloppe de 25 m autour des sondes pour vérifier à 100 m de profondeur qu'il n'y a pas de nappe captive qui alimente, par drainance, les terrains évaporitiques sus-jacents et la réalisation d'une campagne géophysique (sismique et électrique) pour déceler les éventuelles variations latérales de la structure géologique à proximité des sondes dans un contexte très faillé.

Le deuxième cas traité a été celui de **Storengy** : problèmes d'étanchéité dans des formations peu perméables pour du stockage de gaz sous haute pression avec vannes d'étanchéité défaillantes à 800 m. Ce cas a été proposé par l'entreprise LAVIOSA – MPC, spécialisée dans la production de bentonite de haute technicité comprimée sous très haute pression afin de permettre la reconstitution de formations géologiques étanches. La solution retenue a été l'injection de billes d'argiles (smectite du Wyoming). La pression de confinement est de l'ordre de 18 mpa dans un volume fermé (densité de 2.4 – 2.7). Les billes sont enrobées avec une **gomme végétale** (alimentaire), pour retarder la prise (hydratation). Une solution alternative est l'emprisonnement de billes dans des **huiles végétales** à base de colza (smectite = bentonite sodique). Une troisième solution est d'utiliser des billes d'argiles (hydrogonflants) pour fermer enveloppées par du **caoutchouc (polymères)** pour reconstituer des zones où l'étanchéité des terrains n'est pas parfaite (obturer des petites fractures) et pour permettre de continuer à forer.

Au terme de la première phase du projet, il a été demandé à AKWATERRA de mener un **état de l'art** en Allemagne et en Suisse sur les méthodes d'instrumentation de sondes géothermiques verticales et les méthodes de remédiation. Les conclusions du rapport se trouvent en intégralité en annexe du rapport final (BRGM RP-60904) et sont reprises ci-dessous : « Suite à de nombreux désordres constatés après la réalisation de sondes géothermiques (gonflement de terrains, tassements, tarissement de sources ...), un important programme de recherche a été mené en Allemagne, entre 2007 et 2012, près de Stuttgart (Projet EWSPLUS-Solites), pour développer des procédés de mesure et des outils adéquats. Ces études montrent que les techniques de contrôle des sondes **ne donnent pas toujours des résultats satisfaisants** et que les travaux de reconnaissance puis de remédiation **peuvent être longs, difficiles et très onéreux**. Cet état de l'art montre qu'il reste encore des progrès à faire pour **miniaturiser** les instruments de mesure (sondes de températures) et pour en développer d'autres. En se basant sur les résultats de cet état de l'art, le BRGM a proposé au comité de pilotage d'initier, dans la **deuxième phase du projet**, le développement de **deux instruments de mesures miniaturisés**, de plus petits diamètres que ceux développés en Allemagne, afin de pouvoir investiguer des sondes géothermiques équipées de tubes diamètres intérieurs de 25 mm (32 mm extérieur).

Ce développement a été confié à la PME Camexplo :

- instrument pour mesurer le profil vertical de **température** du fluide caloporteur dans les sondes géothermiques. Cet instrument a été testé et validé sur la plateforme expérimentale du BRGM à Orléans, par des mesures par fibre optique simultanées du profil vertical de température réalisées dans cette même sonde géothermique de 100 m. Les valeurs de température mesurées avec la sonde Camexplo montrent un écart maximal de température de 0.3 °C avec celles mesurées avec les fibres optiques. **Ce résultat démontre la fiabilité de la sonde développée par Camexplo pour cette gamme de température (9 – 14 °C).**

La sonde a ensuite été testée sur le site de Kirchheim dans sept sondes géothermiques. Les résultats montrent dans leur ensemble, que les données enregistrées sont cohérentes et corrélables. Une « anomalie » thermique est visible entre 55 et 75 mètres. Cela correspond aux données acquises lors de la réalisation du forage de reconnaissance en 2013 (Barras & Bruyère, 2013). Le relevé géologique de ce forage a mis en évidence, dans cette zone, la présence d'évaporites. Le gonflement des terrains observé en surface et à l'origine de la fissuration des bâtis est survenu suite à la réalisation des forages sur le site de Kirchheim. L'hypothèse évoquée d'associer ce phénomène à l'hydratation de ces évaporites, par le biais d'un défaut de

cimentation, pourrait expliquer la réaction exothermique mesurée sur l'ensemble des sondages. En revanche, ces mesures ne permettent pas d'en déceler la source ;

- **caméra** pouvant être descendue dans le tube PEHD d'une boucle de sonde de diamètre intérieur de 25 mm pour permettre d'investiguer l'état du tube et de repérer les zones endommagées (fuite). Cinq prototypes ont été développés (deux caméras non étanches et trois caméras étanches). Les 3 prototypes étanches présentent tous un système d'étanchéité différent. Les différents prototypes enregistrent des images en haute définition. Les essais réalisés sur la plateforme expérimentale du BRGM ont démontré la **très bonne résolution de la caméra non étanche**, mais en revanche **l'impossibilité d'enregistrer des images nettes en présence d'eau glycolée**. Ce résultat a impliqué de modifier le protocole d'investigation, en imposant la purge des sondes. Le BRGM a réalisé sur la plateforme un essai de purge d'une sonde géothermique qui s'est avéré positif et qui a permis de préciser le protocole. Au même titre que la sonde de température, les prototypes de caméras non étanches ont été testés in-situ sur le site de Kirchheim. Les différents essais ont démontré **l'efficacité et la pertinence de l'inspection vidéo**. Ils ont notamment permis de révéler un écrasement du tube à 50 m de profondeur, à l'origine du blocage de la sonde de température. Ce défaut se matérialise sur l'image par une ovalisation du tube.

5. Conclusion et perspectives

La première phase du projet REMEDIA-FOR a permis de mettre en place, en 2014, un comité de suivi regroupant 9 entreprises de forage, un bureau d'études sous-sol, un expert dans le secteur des analyses et inspections techniques, l'Association Française des Professionnels de la Géothermie (AFPG), l'ADEME et le Ministère (MEDDE). À travers le traitement des deux cas spécifiques de Kirchheim et Storengy, des solutions de remédiation concrètes ont été traitées en comité restreint, puis en réunion collégiale.

L'état de l'art réalisé en Allemagne et en Suisse par Akwaterra, à la demande du BRGM, a notamment permis de confirmer la nécessité de développer des instruments de mesure miniaturisés, afin de permettre l'investigation dans les tubes de sonde de diamètre intérieur 25 mm.

Le BRGM a confié à la PME Camexplo le développement de deux instruments de mesures miniaturisés, de plus petits diamètres que ceux développés en Allemagne, afin de pouvoir investiguer des sondes de diamètre intérieur de 25 mm : un instrument pour mesurer le profil vertical de **température** du fluide caloporteur dans les sondes géothermiques adapté aux diamètres intérieurs de 25 mm (32 mm extérieur) et deux **caméras** (étanche et non étanche) permettant d'enregistrer des images en haute définition.

Les différents essais de validation réalisés en laboratoire par Camexplo, sur la plateforme expérimentale du BRGM, ainsi que sur le site de Kirchheim montrent que le développement de ces deux instruments de mesure est concluant. La sonde de température permet de mesurer un profil vertical de température en vue de déceler une anomalie. Cette anomalie doit cependant trouver une interprétation qui peut changer selon le contexte hydrogéologique : dans le cas de Kirchheim, l'hypothèse de la présence d'évaporite mis en contact avec de l'eau souterraine par le biais d'un défaut de cimentation a été évoquée. Il s'agit toutefois d'une hypothèse qui doit encore être étayée par des investigations supplémentaires. La caméra permet d'avoir une autre source d'information, sur les anomalies de la surface intérieure des tubes (griffures, fissures) ou de la géométrie (écrasement) : dans ce cas également, il s'agit de trouver une interprétation à ces observations (phénomènes de gonflement, écrasement à la mise en œuvre).

Les perspectives pour la poursuite de ces travaux seraient d'améliorer d'une part ces outils afin de les rendre opérationnels pour leur mise en vente sur le Marché et d'autre part, d'améliorer les méthodes de diagnostic en réalisant plusieurs tests sur des cas concrets où des problèmes se posent, en France (Lochwiller par exemple) ou en Allemagne (Staufen). Ces différents essais in-situ permettraient d'affiner les protocoles de mesure et d'interprétation des résultats.

Synthèse du rapport

Une forte attente des pouvoirs publics consiste à disposer de réponses précises, assises sur des retours d'expérience et validées par un groupe d'experts, pour remédier aux sinistres observés en géothermie très basse énergie lorsqu'ils sont lourds de conséquences comme dans les cas de Staufen, Hilsprich, Kirchheim, Lochwiller. Ces sinistres sont liés en particulier à des problèmes de cimentation dans des forages traversant des formations évaporitiques mises en connexion avec des venues d'eau par le biais des forages. Les répercussions sont de première importance : ils impactent en surface des lotissements, parfois des villages en entier (gonflement des terrains et fissuration des bâtiments) et impliquent également la sécurité des habitants. Ces enjeux s'accompagnent de verrous techniques dans l'identification des solutions d'investigation et de remédiation qui peuvent être mises en œuvre.

La synthèse bibliographique précédemment réalisée par le BRGM, en partenariat avec l'ONEMA et l'ADEME, sur les impacts potentiels de la géothermie très basse énergie (BRGM/RP-59837-FR) a permis de dégager un certain nombre de pistes. L'inventaire des impacts potentiels fait ressortir que chaque phase de la construction d'une installation géothermique peut être le vecteur d'impacts environnementaux plus ou moins importants. Les actions les plus sensibles sont celles qui affectent des milieux géologiques particuliers, dans lesquels des difficultés techniques majeures sont susceptibles de survenir en phase de réalisation de l'installation (foration). Les pistes dégagées par cette étude nécessitent néanmoins de décrire les possibilités de remédiation, au regard de solutions technologiques innovantes susceptibles de faciliter la prévention ou la remédiation des problèmes rencontrés.

Pour répondre à ce besoin, le projet REMEDIA-FOR s'est focalisé, dans la première phase du projet, sur deux cas spécifiques de forages géothermiques ayant connus des problèmes pour la mise en œuvre de sondes géothermiques verticales (Kirchheim et Storengy), mettant en avant des recommandations techniques, à titre préventif et à titre curatif et proposant des solutions concrètes d'investigation ou de remédiations reconnues par les professionnels. En préalable à tous travaux de remédiation, l'investigation des sondes est nécessaire afin de préciser l'origine de la malfaçon de l'ouvrage, les caractéristiques de l'ouvrage à traiter (profondeur, déviation, etc..) et d'identifier la ou les sondes défectueuses dans le cas d'un champ de sondes. Il a été demandé à AKWATERRA de mener une enquête en Allemagne et en Suisse, pays équipés plus largement qu'en France de tels ouvrages géothermiques, afin d'établir l'état de l'art sur les méthodes d'instrumentation de sondes géothermiques verticales et les méthodes de remédiation.

En se basant sur les résultats de cet état de l'art, le BRGM a proposé au comité de pilotage d'initier le développement de deux instruments de mesures miniaturisés, de plus petits diamètres que ceux développés en Allemagne, afin de pouvoir investiguer des sondes géothermiques équipées de tubes de diamètre 32 mm (diamètre extérieur). Ce développement a été confié à la PME Camexplo :

- instrument pour mesurer le profil vertical de **température** du fluide caloporteur dans les sondes géothermiques dans des tubes de diamètres intérieurs de 25 mm (32 mm extérieur). Cet instrument a été testé et validé sur la plateforme expérimentale du BRGM à Orléans, par des mesures par fibre optique simultanées du profil vertical de température réalisées dans cette même sonde géothermique de 100 m. Les valeurs de température mesurées avec la sonde Camexplo montrent un écart maximal de température de 0,3 °C avec celles mesurées avec les fibres optiques. **Ce résultat démontre la fiabilité de la sonde développée par Camexplo pour cette gamme de**

température (9 - 14 °C). Les essais réalisés sur le site de Kirchheim dans sept sondes géothermiques montrent dans leur ensemble, que les données enregistrées sont cohérentes et corrélables. En effet, les mêmes variations sont visibles sur l'ensemble des profils. À savoir des valeurs légèrement inférieures à celles attendues sur le gradient géothermique calculé mais qui restent réalistes compte tenu des bornes d'incertitudes. Les différents relevés mettent en évidence l'influence, sur les premiers mètres du profil de températures, par le fait que les sondes géothermiques ne soient pas enterrées. Entre 20 et 50 mètres de profondeur, les variations du profil de températures sont généralement cohérentes avec le gradient géothermique calculé. Une « anomalie » thermique est visible entre 55 et 75 mètres. Cela correspond aux données acquises lors de la réalisation du forage de reconnaissance en 2013 (Barras & Bruyère, 2013) ;

- **caméra** pouvant être descendue dans le tube PEHD d'une boucle de sonde de diamètre intérieur de 25 mm (correspondant à un diamètre extérieur d'un tube PEHD de 32 mm) pour permettre d'investiguer l'état du tube et de repérer les zones endommagées (fuite). Cinq prototypes ont été développés (deux caméras non étanches et trois caméras étanches). Les 3 prototypes étanches présentent tous un système d'étanchéité différent. Les différents prototypes enregistrent des images en haute définition. Les essais réalisés sur la plateforme expérimentale du BRGM ont démontré la très bonne résolution de la caméra non étanche, mais en revanche l'impossibilité d'enregistrer des images nettes en présence d'eau glycolée. Ce résultat a impliqué de modifier le protocole d'investigation, en imposant la purge des sondes. Le BRGM a réalisé sur la plateforme un essai de purge d'une sonde géothermique qui s'est avéré positif et qui a permis de préciser le protocole. Au même titre que la sonde de température, les prototypes de caméras non étanches ont été testés in-situ sur le site de Kirchheim. Les différents essais ont démontré l'efficacité et la pertinence de l'inspection vidéo. Ils ont notamment permis de révéler un écrasement du tube à 50 m de profondeur, à l'origine du blocage de la sonde de température. Ce défaut se matérialise sur l'image par une ovalisation du tube.

Le développement de ces deux instruments de mesure est donc concluant, au regard des essais de validation réalisés sur la plateforme expérimentale du BRGM et sur le site de Kirchheim. La sonde de température permet de mesurer un profil vertical de température en vue de détecter une anomalie. Cette anomalie doit cependant trouver une interprétation qui peut changer selon le contexte hydrogéologique : dans le cas de Kirchheim, l'hypothèse de la présence d'évaporite mis en contact avec de l'eau souterraine par le biais d'un défaut de cimentation a été évoquée. Il s'agit toutefois d'une hypothèse qui doit encore être étayée par des investigations supplémentaires. La caméra permet d'avoir une autre source d'information, sur les anomalies de la surface intérieure des tubes (griffures, fissures) ou de la géométrie (écrasement) : dans ce cas également, il s'agit de trouver une interprétation à ces observations (phénomènes de gonflement, écrasement à la mise en œuvre).

Les perspectives pour la poursuite de ces travaux seraient d'améliorer d'une part ces outils afin de les rendre opérationnels pour leur mise en vente sur le Marché et d'autre part de réaliser plusieurs tests sur des cas concrets où des problèmes se posent, en France (Lochwiller par exemple) ou en Allemagne (Staufen). Ces différents essais in-situ permettraient d'affiner les protocoles de mesure et d'interprétation des résultats.

Sommaire

1.	Contexte.....	3
2.	Objectifs.....	3
3.	Description de l'opération.....	3
4.	Synthèse des résultats.....	3
5.	À retenir.....	3
6.	Valorisation.....	3
7.	Suite envisageable au projet REMEDIA-FOR.....	4
1.	Background.....	5
2.	Objectives.....	5
3.	Description of operation.....	5
4.	Summary of results.....	5
5.	To remember.....	5
6.	Valuation.....	5
7.	Following the possible REMEDIA-FOR project.....	5
	RÉSUMÉ EXÉCUTIF.....	7
1.	Contexte.....	7
2.	Objectifs.....	7
3.	Description de l'opération.....	8
4.	Synthèse des résultats.....	8
5.	Conclusion et perspectives.....	10
6.	Introduction.....	18
7.	Enjeux.....	18

8. Contexte.....	18
9. Objectifs.....	20
10. Définition du périmètre du projet.....	20
11. Travaux réalisés	21
11.1. PHASE 1 : IDENTIFICATION ET TRAITEMENT DE TRAVAUX SPÉCIFIQUES DE REMÉDIATION	21
11.2. PHASE 2 : DÉVELOPPEMENT D'INSTRUMENTS D'INVESTIGATION, DE PROTOCOLES DE MESURE ET ESSAIS IN-SITU	21
12. Résultats de la phase 1 du projet REMEDIA-FOR	22
12.1. MISE EN PLACE D'UN COMITÉ DE SUIVI.....	22
12.2. ÉTABLISSEMENT D'UN PROTOCOLE D'ACTION POUR LE TRAITEMENT DES CAS SPÉCIFIQUES.....	22
12.3. RECENSEMENT DE CAS SPÉCIFIQUES POUVANT ÊTRE TRAITÉS DANS LE CADRE DU PROJET REMEDIA-FOR	22
12.4. TRAITEMENT DE DEUX CAS SPÉCIFIQUES.....	23
12.4.1. Mise en contact d'un aquifère avec une couche évaporitique – exemple de Kirchheim	23
12.4.2. Storengy	24
12.5. ÉTAT DE L'ART SUR LES MÉTHODES D'INVESTIGATION ET DE REMEDIATION DES SONDES GÉOTHERMIQUES EN ALLEMAGNE ET EN SUISSE.....	25
13. Conception de nouveaux outils d'inspection vidéo et de mesure de la température pour investiguer les tubes de sondes géothermiques de 32 mm de diamètre.....	27
13.1. DÉVELOPPEMENT DE DEUX TECHNOLOGIES DE CAMÉRAS NON ÉTANCHES : ...	27
13.2. DÉVELOPPEMENT DE TROIS TECHNOLOGIES DE CAMÉRAS ÉTANCHES	28
14. Test de validation de la sonde de température et des prototypes de caméras en cours de développement sur la plateforme expérimentale du BRGM – Région Centre.....	30
14.1. PRÉSENTATION DU SITE	30
14.2. OBJECTIFS DES INVESTIGATIONS.....	30
14.3. PROTOTYPES DE CAMÉRAS TESTÉS SUR LA PLATEFORME EXPÉRIMENTALE DU BRGM	30
14.4. PROTOCOLE DE MESURES ÉTABLI POUR LA JOURNÉE DU 17 AVRIL 2015.....	31
14.5. RÉSULTATS	31
14.6. CONCLUSION SUR LES INVESTIGATIONS MENÉES LE 17 AVRIL 2015	36
15. Développement d'un système de purge des sondes sur le site de la plateforme expérimentale du BRGM et élaboration d'un protocole	38

15.1. OBJECTIF DE L'OPÉRATION DE PURGE DES SONDES.....	38
15.2. DISPOSITIF POUR PURGER LES SONDES	38
15.3. RÉSULTAT DE L'OPÉRATION DE PURGE.....	39
16. Test et mise au point des instruments de mesure in-situ – Kirchheim (Alsace)	40
16.1. PRÉSENTATION DU SITE	40
16.2. PROGRAMME D'INVESTIGATION ET DÉROULEMENT	40
16.3. RELEVÉS DE TEMPÉRATURE DANS LES SONDES GÉOTHERMIQUES	40
16.3.1. Présentation du matériel utilisé	40
16.3.2. Étalonnage du matériel	41
16.3.3. Acquisition des données	41
16.3.4. Résultats obtenus	42
16.3.5. Compilations des résultats	50
16.3.6. Conclusion et limites	51
16.4. INVESTIGATIONS PAR CAMÉRA À L'INTÉRIEUR DES SONDES GÉOTHERMIQUES	52
16.4.1. Tests Préalables : remplacement du glycol par l'eau et test caméras	52
16.4.2. Purge des sondes géothermiques.....	53
16.4.3. Passages caméra	56
17. Conclusion et perspectives.....	60

Liste des tableaux

Tableau 1 : Identification pour chaque sonde géothermique des couples de tubes purgés sur les quatre tubes « ABCD ».	53
Tableau 2 : Volume théorique et volume purgé par sonde géothermique.	54

Liste des figures

Figure 1 : Photographie de la tête du prototype de caméra non étanche constituée d'un corps en plastique, d'un verre en plexiglas de 8 mm de diamètre, de 4 leds périphériques et d'un anneau de fils de centrage. On aperçoit également le câble jaune qui permet de guider et de descendre la caméra à jusqu'à 200 m de profondeur.....	28
Figure 2 : Relevé de la température réalisé le 17 avril 2015 sur la plateforme expérimentale du BRGM dans un tube de sonde géothermique de 100 m de profondeur, avec la sonde développée par Camexplo. Mesures réalisées sur le circuit d'eau froide (mesure à la descente). Comparaison avec les valeurs mesurées avec les fibres optiques qui équipent la sonde géothermique de la plateforme.....	33
Figure 3 : Relevé de la température réalisé le 17 avril 2015 sur la plateforme expérimentale du BRGM dans un tube de sonde géothermique de 100 m de profondeur, avec la sonde développée par Camexplo. Mesures réalisées sur le circuit d'eau chaude (mesure à la descente). Comparaison avec les valeurs mesurées avec les fibres optiques qui équipent la sonde géothermique de la plateforme.....	34
Figure 4 : Capture d'écran d'une inspection vidéo avec la caméra non étanche. On aperçoit dans le fond le reflet de l'eau glycolée.	35
Figure 5 : Dispositif pour réaliser les inspections vidéo. En haut à gauche : caméra non étanche avec dispositif de centreur (anneaux en caoutchouc) et dispositif d'éclairage (leds) prête à être insérée dans le tube de sonde. En haut à droite : caméra étanche. En bas à gauche : insertion de la sonde de température avec le câble guide jaune. En bas à droite : vue d'ensemble sur les liaisons horizontales des sondes géothermiques (gainés calorifugées) de la plateforme expérimentale du BRGM.	36
Figure 6 : Photographies du dispositif mis en place le 24 avril 2015 pour purger une sonde double U de 50 m de profondeur sur la plateforme expérimentale du BRGM.	38
Figure 7 : Photographie de la sonde de température.....	41
Figure 8 : La sonde de température est liée à un tire fil (à gauche) puis descendu dans la sonde géothermique (à droite).	42
Figure 9 : Profil de température enregistré sur la sonde S1A.	43
Figure 10 : Profil de température enregistré sur la sonde S2A.	44
Figure 11 : Profil de température enregistré sur la sonde S3A.	45
Figure 12 : Profil de température enregistré sur la sonde S4A.	46
Figure 13 : Profil de température enregistré sur la sonde S5A.	47
Figure 14 : Profils de température enregistrés sur les sondes S6A et S6B.	48
Figure 15 : Profil de température enregistré sur la sonde S7A.	49
Figure 16 : Compilation de l'ensemble des profils de températures réalisés sur les sondes géothermiques à Kirchheim (67).	50
Figure 17 : Profils de température des sondes S1A et S6A qui présentent des variations importantes non cohérentes avec les autres profils enregistrés.	51
Figure 18 : Photographie d'une des caméras étanches.....	52
Figure 19 : Raccordement des tuyaux de purge sur la sonde S7.	54
Figure 20 : Photographie de l'installation de purge sur la sonde S5.	55
Figure 21 : Fûts permettant l'estimation du volume de glycol présent dans les sondes et évacuation dans le système des eaux usées.	55

Figure 22 : Photographie de la caméra étanche 16mm avec les 4 leds supplémentaires et le centreur. ..	56
Figure 23 : Capture d'écran de la vidéo de la descente de la caméra étanche dans la sonde S2A.	56
Figure 24 : Photographie de la caméra 12 mm.	57
Figure 25 : Captures d'écran du tube en bon état et de la partie « ovalisée ».	58
Figure 26 : Capture d'écran du dépôt obturant la sonde à une profondeur de 50,5 mètres.	58
Figure 27 : Capture d'écran de la descente dans la sonde S1D à une profondeur approximative de 50 mètres.	59

Liste des annexes

Annexe 1 Comité de suivi : liste des participants	63
Annexe 2 Compte-rendu de la réunion du comité de suivi du 19.06.14	65
Annexe 3 Compte-rendu de la réunion technique du 05.09.14 Traitement du cas spécifique de Kirsheim : « mise en communication d'un aquifère avec des formations évaporitiques par le biais de sondes géothermiques verticales » MCCF – ACOTEX – BRGM	71
Annexe 4 Compte-rendu de la réunion de comité de suivi du 17.09.14 Présentation des résultats du premier cas traité : « Mise en communication d'un aquifère avec des formations évaporitiques par le biais de sondes géothermiques verticales » Méthodes d'investigation et de remédiation proposées (MCCF – ACOTEX – BRGM)	77
Annexe 5 Présentation du premier cas traité lors de la réunion REMEDIA-FOR du 17.09.14 : « Mise en communication d'un aquifère avec des formations évaporitiques par le biais de sondes géothermiques verticales » Méthodes d'investigation et de remédiation proposées (MCCF – ACOTEX – BRGM)	83
Annexe 6 Compte-rendu de la réunion de comité de suivi du 14.10.14 Discussion du cas spécifique « Storengy » proposé par l'entreprise LAVIOSA - MPC	95
Annexe 7 Compte-rendu de la réunion du comité de suivi du 20.11.14 Discussion de nouveaux instruments de mesure à développer	103
Annexe 8 Compte-rendu de la réunion du comité de suivi du 16.12.14 Bilan des travaux réalisés en 2014 et nouvelles perspectives en 2015	111
Annexe 9 Rapport Akwaterra (2015) Etat de l'art en Allemagne et en Suisse sur les méthodes d'investigation et de remédiation des sondes géothermiques	119
Annexe 10 Compte-rendu de la réunion du comité de suivi du 04.03.15	157
Annexe 11 Rapport Camexplo (2015) Conception de nouveaux outils d'inspection vidéo et de mesure de la température pour investiguer les tubes de sondes géothermiques de 32 mm de diamètre (extérieur)	163
Annexe 12 Compte-rendu des investigations par caméra non étanche menées par Camexplo le 22.05.15 sur le site de Krichheim	181
Annexe 13 Compte-rendu des investigations menées le 17.04.15 sur la plateforme expérimentale du BRGM à Orléans	187

6. Introduction

Le projet de recherche REMEDIA-FOR s'inscrit dans le cadre de la convention ADEME – BRGM n° 1305C0129 notifiée le 12 décembre 2013.

Le présent rapport synthétise les travaux réalisés à fin décembre 2014 (première phase), sur le traitement de cas pratiques de travaux de remédiation dans les sondes géothermiques, ayant fait l'objet d'un rapport d'avancement (BRGM RP-64333-FR) ; ainsi que les travaux réalisés en 2015 (deuxième phase), sur le développement de moyens instrumentaux d'investigation dans les sondes géothermiques défectueuses et test sur site.

7. Enjeux

Suite à une multiplication de sinistres récents qui ont été avérés sur plusieurs ouvrages géothermiques de minime importance sur sondes géothermiques dans l'Est de la France et Outre-Rhin (Hilsprich, Kirchheim, Lochwiller, Staufen), deux enjeux apparaissent aujourd'hui : i) tirer les enseignements de ces situations afin que cela ne se reproduise pas ii) développer des outils et protocoles pour comprendre les phénomènes et y remédier.

Les enjeux environnementaux et financiers liés à ces sinistres sont de première importance : ils impactent en surface, des lotissements, parfois des villages en entier (gonflement des terrains et fissuration des bâtiments) et peuvent in fine menacer la sécurité des habitants.

Ces enjeux s'accompagnent de l'absence d'instrument pour investiguer les sondes une fois le forage réalisé pour préciser l'origine de la malfaçon de l'ouvrage (défauts de cimentations, fuite de fluide caloporteur, écrasement de tube, déviation, profondeur, ...).

8. Contexte

Dans le contexte du développement des énergies renouvelables et de la transition énergétique, le recours à la géothermie de minime importance est encouragé. Cependant, la réalisation de sondes géothermiques peut présenter des risques liés à des phénomènes géologiques et hydrogéologiques.

La synthèse bibliographique précédemment réalisée par le BRGM, en partenariat avec l'ONEMA et l'ADEME, sur les impacts potentiels de la géothermie très basse énergie (BRGM/RP-59837-FR) a fait ressortir que chaque phase de la construction d'une installation géothermique peut être le vecteur d'impacts environnementaux plus ou moins importants. Les actions les plus sensibles sont celles qui affectent des milieux géologiques particuliers, dans lesquels des difficultés techniques majeures sont susceptibles de survenir en phase de réalisation de l'installation (foration). Une fois le sinistre déclaré, il est impératif de neutraliser l'effet de la ou les sondes défectueuses. La problématique émergeant seulement, les méthodes de remédiation ne sont pas encore éprouvées. Le projet REMEDIA-For cofinancé par l'ADEME et le BRGM a donc vu le jour.

L'évolution de la réglementation par le biais de la cartographie des zones à risque représente un autre enjeu que ce document pourra alimenter, notamment pour fixer les prescriptions techniques de mise en œuvre des échangeurs dans les zones à risques, ainsi que les besoins en matière de solutions technologiques innovantes susceptibles de faciliter le diagnostic ou la remédiation des cas rencontrés.

Au préalable à des travaux de remédiation, il est important de définir l'origine de l'anomalie. Pour ce faire, des investigations sur les sondes sont nécessaires et conditionnent les méthodes à suivre (ex : la sur-foration d'une sonde n'est possible que si sa déviation n'excède pas quelques mètres). Une mesure de la température (pour mettre en évidence par exemple un phénomène de réaction exothermique lié à la transformation d'anhydrite en gypse), de la déviation et une inspection par caméra sont autant de paramètres qu'il conviendrait de déterminer pour appréhender une méthode de remédiation.

En Allemagne, un sinistre de grande ampleur – Staufen - a nécessité des travaux de reprise d'un champ de sondes défectueux, mettant en communication des couches évaporitiques et un aquifère captif, provoquant ainsi un gonflement de tout un village historique et la fissuration de plusieurs centaines de maisons. Des investigations préalables ont été menées mais étaient adaptées au contexte et à un diamètre de sonde plus important (40 mm) ne permettant pas de les appliquer directement sur les cas de sinistres en France (conclusions des prises de contact faites par ACOTEX¹ et le BRGM Alsace en 2013).

Une première démarche a été entreprise en 2012 par le BRGM et le LRPC avec la PME Soleo, basée dans l'Allier, pour développer un outil permettant de caractériser l'état de la cimentation dans une sonde géothermique verticale. Cette approche a été menée en vue du montage d'un FUI. Ce projet n'a jamais vu le jour, car il était question de tester au préalable le prototype développé par Soleo (méthode sonique). Ce prototype n'a jamais abouti car la méthode sonique ne permet pas une interprétation fiable de l'état de cimentation. Le BRGM envisage de poursuivre cette approche, dans une perspective de la poursuite des travaux initiés dans le cadre du projet REMEDIA-FOR, par le développement d'une autre méthode d'auscultation de l'état de cimentation.

Une deuxième approche a été menée par l'entreprise Schwenk (Allemande) qui participe à la commission X10-G pilotée par le BRGM sur le projet de norme sur le coulis géothermique (PR NF X10-950). Un prototype d'instrument de mesure breveté permet de mesurer l'état de la cimentation en incorporant un traceur magnétique dans leur propre coulis. Cette approche doit cependant encore faire l'objet de développements complémentaires pour la généraliser sur d'autres coulis ou pour incorporer un autre type de traceur. Un groupe de travail dédié sera mené par le BRGM en 2015 sur ce sujet, dans le cadre du projet sur la normalisation du coulis géothermique.

Une troisième démarche a été initiée avec la PME CAMEXPLO, basée en Alsace pour la mise au point de mesure de température dans les sondes de diamètre 32 mm avec accès difficile (risque de blocage de la sonde importante). Un premier test sur un site en Alsace s'est révélé positif.

En complément du traitement de cas spécifiques sur des travaux de remédiation, il a été proposé, dans la deuxième phase du projet REMEDIA-FOR, de développer un volet « instrumentation » avec pour objet de poursuivre la mise au point d'outils instrumentaux d'investigations dans les SGV en partenariat avec des PME et de mettre en place des protocoles de validation à travers la plate-forme géothermique expérimentale du BRGM située à Orléans.

¹ ACOTEX : société implantée à Schiltigheim (67300), spécialisée dans l'expertise immobilière dans le secteur d'activité des analyses, essais et inspections techniques

9. Objectifs

Les objectifs du projet REMEDIA-FOR ont été, dans la première phase du projet, d'identifier des cas spécifiques, en France ou à l'étranger, de forages géothermiques ayant connu des problèmes pour la mise en œuvre de sondes géothermiques verticales ou de forages d'eau à usage géothermique, d'établir des recommandations techniques, à titre préventif et à titre curatif et proposer des solutions concrètes d'investigation et de remédiation reconnues par les professionnels.

Après une année de travail, le BRGM et le comité de suivi ont fait le constat que le nombre de cas concrets proposés notamment par les foreurs se sont avérés être très limités (deux cas : Kirchheim + Storengy) et ont décidé en conséquence, en concertation avec l'ADEME lors du comité de pilotage du 16 décembre 2014 (annexe 8), de limiter cet axe et de réorienter le projet vers un nouvel objectif : **le développement de nouveaux outils d'investigation** (instruments de mesure) dans le domaine des sondes géothermiques verticales qui constituent un préalable obligatoire à tous travaux de remédiation.

10. Définition du périmètre du projet

Une réunion de lancement a été réalisée le 16 juin 2014 (voir annexe 2) à travers laquelle ont été définis, par décision collégiale, le périmètre et le plan d'action du projet.

Une réunion technique a ensuite été organisée le 26 juin 2014 au BRGM avec l'entreprise JYH-Forage-Assistance afin de préciser et valider les éléments techniques du compte-rendu et le périmètre du projet.

Le périmètre retenu a été le suivant :

- ne pas se limiter sur la profondeur des ouvrages ;
- utilisation des forages uniquement pour l'usage de la **géothermie** basse ou très basse énergie ;
- types d'échangeurs : **sondes** géothermiques verticales (SGV) et forages d'eau² ;
- remédiation : le champ d'étude des méthodes de remédiation se limitera au forage uniquement ;
- sinistre (dysfonctionnement) : focalisation sur les **incidents** et pas uniquement sur les **accidents** (pour lesquels il n'y a pas forcément de réparation).

Il a été également décidé que les résultats du projet REMEDIA-FOR devaient être concrets et, dans la mesure du possible, opérationnels. Il a donc été décidé de travailler sur des cas spécifiques et d'en tirer des enseignements génériques pouvant être applicables et constituer ainsi un recueil de recommandations.

² Identique durant phase foration, différent une fois l'échangeur équipé

11. Travaux réalisés

11.1. PHASE 1 : IDENTIFICATION ET TRAITEMENT DE TRAVAUX SPÉCIFIQUES DE REMÉDIATION

Les actions suivantes ont été menées en 2014 :

- mise en place par le BRGM d'un comité de suivi regroupant des professionnels du forage, des bureaux d'études sous-sol, des représentants des assureurs et des pouvoirs publics et l'Association Française des Professionnels de la Géothermie (AFPG). La liste des personnes participant au comité de suivi est donnée à l'annexe 1 ;
- établissement d'un protocole pour le traitement de cas spécifiques ;
- recensement de cas spécifiques et sélection de deux cas pour être traités dans le cadre du projet REMEDIA-FOR ;
- traitement de deux cas : Kirchheim, Storengy.

11.2. PHASE 2 : DÉVELOPPEMENT D'INSTRUMENTS D'INVESTIGATION, DE PROTOCOLES DE MESURE ET ESSAIS IN-SITU

- Réalisation d'un état de l'Art sur les méthodes d'investigation développées/utilisées par les entreprises en Allemagne, notamment dans le Baden-Wurtemberg, confronté à une demi-douzaine de sinistres ainsi qu'en Suisse ;
- développement préliminaire d'outils pour réaliser des investigations à l'intérieur de sondes géothermiques verticales de diamètre 32 mm et notamment :
 - un prototype de sonde température mise au point par la PME CAMEXPLO ;
 - deux prototypes de système caméra miniature de 16 mm de diamètre avec éclairage et en haute résolution, étanche et non étanche, mise au point par la PME CAMEXPLO ;
- mise en place de tests préliminaires pour validation des prototypes (température, caméra) au niveau de la plate-forme expérimentale du BRGM à Orléans par la PME CAMEXPLO ;
- réalisation de tests in-situ sur un cas de sinistre alsacien pour validation des prototypes (température, caméra et état de cimentation).

12. Résultats de la phase 1 du projet REMEDIA-FOR

12.1. MISE EN PLACE D'UN COMITÉ DE SUIVI

Le BRGM a mis en place début 2014 le comité de suivi regroupant neuf entreprises de forage, un bureau d'études sous-sol, un expert dans le secteur d'activité des analyses, essais et inspections techniques, l'Association Française des Professionnels de la Géothermie (AFPG), l'ADEME et le Ministère (MEDDE). La liste des personnes participant au comité de suivi est donnée à l'annexe 1.

12.2. ÉTABLISSEMENT D'UN PROTOCOLE D'ACTION POUR LE TRAITEMENT DES CAS SPÉCIFIQUES

Le BRGM a demandé aux professionnels (foreurs, bureaux d'étude sous-sol) de sélectionner, à travers leur propre expérience, un ou plusieurs cas d'ouvrages qui les ont amenés à intervenir en termes d'investigation, de diagnostic ou de remédiation.

Les cas sélectionnés ont ensuite été traités en comité restreint avant de les présenter au comité de pilotage pour les valider.

Cette démarche a pu être réalisée pour deux cas spécifiques : Kirchheim (mise en contact d'un aquifère avec des formations évaporitiques), traité en comité restreint le 5 septembre 2014 (MCCF, ACOTEX, BRGM) et présenté lors de la réunion d'avancement du 17 septembre 2014, ainsi que pour Storengy, traité uniquement à travers le comité de pilotage.

12.3. RECENSEMENT DE CAS SPÉCIFIQUES POUVANT ÊTRE TRAITÉS DANS LE CADRE DU PROJET REMEDIA-FOR

Différents cas ont été identifiés et proposés par les professionnels pouvant être traités dans le cadre du projet REMEDIA-FOR :

Sondes géothermiques verticales :

- mise en communication d'un aquifère avec des formations évaporitiques (Kirchheim) : cas proposé par la Direction Régionale Alsace du BRGM, en collaboration avec la société ACOTEX ;
- risque d'artésianisme et difficulté pour la cimentation de SGV en milieu karstique : cas proposé par l'entreprise de forage MANNFOR ;
- phénomène de gel – dégel : expérience associée à l'entreprise suisse AUGSBURGER ;
- techniques de remédiation mis en œuvre sur des sondes en Allemagne suite à plusieurs sinistres, notamment par découpage des sondes suivi d'une injection, en liaison avec les travaux réalisés dans le Baden- Württemberg).

Forages d'eau et autre :

- fermeture de forages profonds et gestion des gaz (Storengy) : cas proposé par l'entreprise de forage LAVIOSA ;
- problèmes de corrosion tubage – casing : cas proposé par l'entreprise MASSE ;
- remontée de nappe ou le contraire (forages géotechniques) : cas proposé par le bureau d'étude sous-sol G2H-Conseils.

12.4. TRAITEMENT DE DEUX CAS SPÉCIFIQUES

Parmi les cas recensés ci-dessus, seuls deux cas ont finalement été traités, en raison du désistement progressif des entreprises de forage au comité de suivi, en raison du coût et de leur disponibilité pour participer à des réunions régulières.

12.4.1. Mise en contact d'un aquifère avec une couche évaporitique – exemple de Kirchheim

Le premier cas traité a été celui de Kirchheim : « mise en communication d'un aquifère avec des formations évaporitiques par le biais de sondes géothermiques verticales ». Ce cas a été proposé par la Direction Régionale Alsace du BRGM, qui mène des investigations sur le site en collaboration avec ACOTEX (expert en charge du dossier pour l'assurance dommage).

Une réunion technique a été réalisée le 5 septembre 2014 (annexe 3) avec l'entreprise de forage MCCF (renommée pour ses interventions de remédiation dans le domaine du sous-sol et du génie-civil) pour discuter des possibilités de remédiation à partir de techniques d'injection de coulis. Une présentation des résultats a ensuite été réalisée le 17 septembre 2014 au comité de suivi (annexes 4, 5).

Il est prévu en 2015 de poursuivre le traitement du cas de Kirchheim en vue d'affiner les possibilités de remédiation qui sont encore à l'étude.

Suite aux discussions menées en comité restreint puis de suivi, les solutions de remédiation ont été établies selon les hypothèses de causes retenues :

1. l'eau dans le forage provient du déversement de la nappe superficielle et hydrate les couches évaporitiques sous-jacentes :

La solution consisterait à tuer le forage en réalisant une multitude de forages d'injection dans le pourtour des sondes, dans un rayon de 5 à 10 m. Ces forages auraient pour objectif de reconstituer la couche de protection constituée par les argiles déstructurées qui s'intercalent entre la couche aquifère superficielle (vers 6 m) et le toit des évaporites à 35 m environ. Pour ce faire, il serait envisagé d'introduire un tubage à manchettes à travers lesquelles passe le coulis d'injection. L'opération se déroulerait de la façon suivante : mise en place d'un coulis frais et d'un obturateur avec suivi des indicateurs de bonne injection : pression et volume indicatif. Les manchettes restent scellées dans le forage.

L'injection est réalisée en trois phases :

- 1) injection coulis ciment bentonite pour remplir les vides importants (première passe) ;
- 2) injection de ciment moulu ou gel de silice (plus fluide) pour colmater les vides de petites ouvertures (deuxième passe). Les injections de la deuxième passe peuvent se répéter selon le degré de remplissage (pour affiner le remplissage) ;
- 3) injection de coulis ciment bentonite (phase dite de serrage) pour juger le résultat. Si le résultat de l'injection est bon, la pression d'injection doit augmenter de suite, ne permettant pas d'injecter le mélange. Tolérance sur l'effet de remontée des terrains sous l'effet de la pression d'injection : env. 3 cm.

Le résultat d'injection peut être reporté sur des graphiques sous la forme de camemberts qui permettent de visualiser le volume injecté et la pression d'injection. Les anomalies d'injection sont décelées.

2. L'eau provient d'un aquifère présent en profondeur :

La solution serait de tuer le forage, en réalisant une multitude de forages autour de la sonde à neutraliser.

Ces travaux nécessiteraient au préalable les investigations suivantes :

- réalisation de piézomètres dans une enveloppe de 25 m autour des sondes pour vérifier à 100 m de profondeur qu'il n'y a pas de nappe captive qui alimente, par drainance, les terrains évaporitiques sus-jacents. Objectif : écarter cette hypothèse ;
- réalisation d'une campagne géophysique (sismique et électrique) pour déceler les éventuelles variations latérales de la structure géologique à proximité des sondes dans un contexte très faillé.

12.4.2. Storengy

Le deuxième cas traité est le cas de Storengy : « problèmes d'étanchéité dans des formations peu perméables pour du stockage de gaz sous haute pression ». Ce cas, bien que sortant du périmètre initialement défini par le projet a été retenu, en raison des solutions techniques transversales qu'il propose et qui peuvent être envisagées pour remédier à des problématiques d'étanchéité rencontrées avec des sondes géothermiques, notamment en présence d'artésianisme ou de nappe captive.

Ce cas a été proposé par l'entreprise LAVIOSA – MPC, spécialisée dans la production de bentonite de haute technicité pour développer des produits d'étanchéité (venues d'eau dans tunnels, forages). Il est a été discuté en comité de suivi lors de la réunion du 14.10.14 (annexe 6).

Un produit phare développé par LAVIOSA est la bille d'argile comprimée sous très haute pression afin de permettre la reconstitution de formations géologiques étanches. Les domaines d'application pour les forages géothermiques peuvent être les nappes artésiennes, les problèmes de mise en communication de formations aquifères, les formations fissurées ou pour refermer une zone défailante de puits (abandon).

1. **Cas Storengy** (stockage de gaz avec vannes d'étanchéité défailantes à 800 m, fuite à isoler). Dans ce cas, il s'agit d'abandon. Procédure : injection de billes d'argiles (smectite du Wyoming), avec une garantie sur la qualité de la bille d'argile dans le temps et sur le volume utilisé. La pression de confinement est de l'ordre de 18 mpa dans un volume fermé (densité de 2.4 – 2.7).

Les billes sont enrobées avec une gomme végétale (alimentaire), pour retarder la prise (hydratation). On peut également les intégrer dans des chaussettes textiles pour les descendre ou les guider dans l'espace annulaire. Retardement de prise de 40 min environ.

Contrôle de puits pour déterminer si les billes sont à la bonne profondeur. Remarque : les billes d'argile ne gonflent pas en présence d'eau salée. Dans ce cas, les billes sont descendues dans la boue de forage sursaturée en gypse, puis « lavées » à l'eau pour qu'elles gonflent.

2. **Utilisation alternative – technique à huile** : emprisonnement de billes dans des huiles végétales à base de colza (smectite = bentonite sodique). Objectif : fluidifiant pour injecter dans des forages déviés. Dans les zones faillées, possibilité de pousser l'huile (idem développement). Dans ce cas, les billes ne sont pas enrobées. Les billes sont moins confinées que dans le cas des billes enrobées.
3. **Utilisation en domaine pétrolier pour fermer des petites fractures** : les billes d'argiles (hydrogonflants) utilisées sont enveloppées par du caoutchouc (polymères) pour reconstituer des zones où l'étanchéité des terrains n'est pas parfaite et pour permettre de continuer à forer.

12.5. ÉTAT DE L'ART SUR LES MÉTHODES D'INVESTIGATION ET DE REMEDIATION DES SONDÉS GÉOTHERMIQUES EN ALLEMAGNE ET EN SUISSE

En préalable à tous travaux de remédiation, l'investigation des sondes est nécessaire afin de préciser l'origine de la malfaçon de l'ouvrage, les caractéristiques de l'ouvrage à traiter (profondeur, déviation, etc.) et d'identifier la ou les sondes défectueuses dans le cas d'un champ de sondes.

Il a été demandé à AKWATERRA de mener une enquête en Allemagne et en Suisse afin d'établir l'état de l'Art sur les méthodes d'instrumentation de sondes géothermiques verticales et les méthodes de remédiation.

L'ensemble de ses résultats est présenté dans un rapport (Akwaterra, 2015) qui se trouve en intégralité en annexe 9 du présent document.

Les conclusions générales du rapport Akwaterra sont reprises ci-dessous :

« Suite à de nombreux désordres constatés après la réalisation de sondes géothermiques (gonflement de terrains, tassements, tarissement de sources ...), de nombreuses recherches ont été effectuées notamment en Allemagne pour développer des procédés de mesure et des outils adéquats. Un important programme de recherche a été mené entre 2007 et 2012 près de Stuttgart (Projet EWSPLUS-Solites). Ces études montrent que les techniques de contrôle des sondes ne donnent pas toujours des résultats satisfaisants et que les travaux de reconnaissance puis de remédiation peuvent être longs, difficiles et très onéreux. Aussi, pour minimiser les risques de désordres, il faut dès le début des travaux de sondes géothermiques, respecter les points suivant :

- bonne formation du foreur (qualification) ;
- documentation complète des travaux à effectuer lors du forage (coupe prévisionnelle, échantillonnage, suivi du niveau d'eau, vitesse d'avancement, ...),
- suivi des travaux par un géologue et diagraphie gamma-ray en trou nu en cas de terrains à risques (zones à évaporites, aquifères superposés, terrains faillés, ...) ;
- pose recommandée de centreurs à intervalles réguliers (1 m) le long des sondes. Cette mesure permet de limiter le vrillage des tubes et d'assurer une cimentation régulière ;
- lors de l'injection du coulis de ciment, enregistrement des pressions et des volumes, suivi de la remontée du ciment à l'aide d'une sonde, utilisation d'un ciment spécifique de type ferromagnétique pour faciliter le suivi et la détection ultérieure.

Cet état de l'art montre qu'il reste encore des progrès à faire pour miniaturiser les instruments de mesure (sondes de températures) et pour en développer d'autres (sonde

ultra-sons, diagraphies électriques à diverses profondeurs d'investigations, gyroscope pour mesure de la déviation horizontale en présence de ciment ferromagnétique, sonde sonique de type CBL-VDL, ...).

Il montre également qu'une technique de remédiation pour étancher des sondes qui a apporté de bons résultats a consisté à couper des tubes de sondes à diverses hauteurs et à injecter un coulis de ciment sous pression. Cette technique n'est cependant pas prescrite en France par la norme NF X10-970 qui impose une cimentation sous pression depuis la base du forage, avec tube d'injection perdu. La norme française n'autorise cette technique qu'en présence de zones de perte où la cimentation en plusieurs phases est autorisée. Le surforage des sondes est délicat et nécessite de gros moyens de forage. Dans certains cas, des pompes de rabattement du niveau d'eau périphérique peuvent s'avérer nécessaire ».

13. Conception de nouveaux outils d'inspection vidéo et de mesure de la température pour investiguer les tubes de sondes géothermiques de 32 mm de diamètre

En se basant sur les résultats de l'état de l'art mené par Akwaterra et présenté au comité de pilotage le 04 mars 2015 (annexe 10), le BRGM a proposé au comité de pilotage d'initier le développement de deux instruments de mesures miniaturisés, de plus petits diamètres que ceux développés en Allemagne, afin de pouvoir investiguer des sondes de diamètre 32 mm (diamètre extérieur).

Deux instruments ont été ciblés :

- instrument pour mesurer le profil vertical de **température** du fluide caloporteur dans les sondes géothermiques (au repos), pouvant être descendu directement dans les tubes et adapté aux diamètres intérieurs de 25 mm (correspondant à un tube PEHD diamètre extérieur de 32 mm). Les anomalies de température pourraient permettre de diagnostiquer par exemple la présence de formations évaporitiques (réactions exothermiques gonflement anhydrite) ou d'écoulements souterrains préférentiels ;
- **caméra** pouvant être descendue dans le tube PEHD d'une boucle de sonde de diamètre intérieur de 25 mm (correspondant à un diamètre extérieur d'un tube PEHD de 32 mm) pour permettre d'investiguer l'état du tube et de repérer les zones endommagées (fuite).

L'étude et la conception de prototypes de sondes de température et de caméras miniatures ont été confiées à la société CAMEXPLO spécialisée dans le développement d'outils d'inspection vidéo et d'exploration robotique, basée à Oberhausbergen (67).

À l'issue du projet, ont été confectionnées et validées par les tests (cf. chapitres suivants) :

- 1 sonde de température de 5 mm de diamètre ;
- 5 caméras de diamètre compris entre 8 et 17 mm (deux prototypes de caméras non étanches et trois prototypes de caméras étanches).

L'ensemble de ses résultats est présenté dans un rapport (Camexplo, 2015) qui se trouve en intégralité en annexe 11 du présent document.

13.1. DÉVELOPPEMENT DE DEUX TECHNOLOGIES DE CAMÉRAS NON ÉTANCHES :

La première caméra présente un diamètre de 16 mm (sans verre saphir). Les spécifications de cette caméra sont les suivantes :

- verre en plexiglas ;
- diamètre de la caméra : 8 mm de corps en plastique renforcé avec des fils de centrages ;
- corps en plastique d'une longueur de 10 cm se terminant par un presse-étoupe en laiton et par une bague de fixation pour accrocher le câble de poussée ;
- images en couleur et en haute définition ;
- éclairage additionnel : quatre leds haute luminosité sur le pourtour de la caméra ;
- fils de centrages.

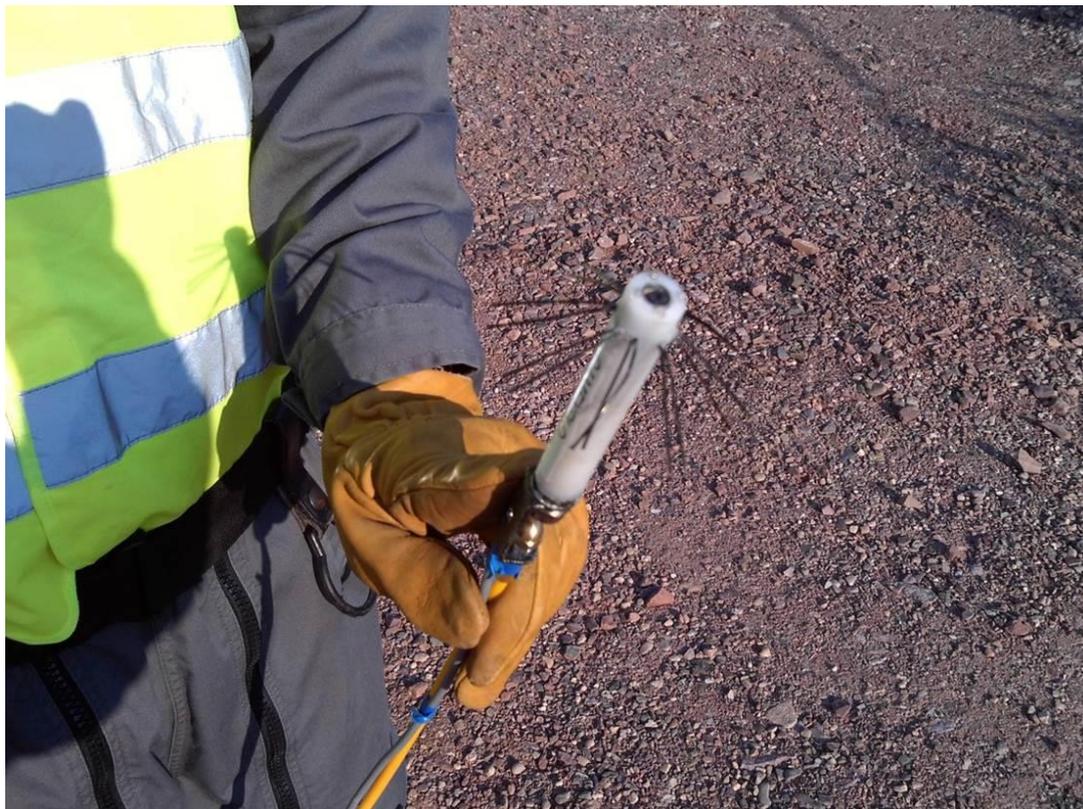


Figure 1 : Photographie de la tête du prototype de caméra non étanche constituée d'un corps en plastique, d'un verre en plexiglas de 8 mm de diamètre, de 4 leds périphériques et d'un anneau de fils de centrage. On aperçoit également le câble jaune qui permet de guider et de descendre la caméra à jusqu'à 200 m de profondeur.

La deuxième caméra non étanche (sans verre saphir) est la suivante :

- verre en plexiglas ;
- diamètre de la caméra 8 mm + un centreur de 9 mm incluant les fils de centrages ;
- ce centreur ne fait que 3 à 4 cm de long, ce qui permet d'avoir un peu de souplesse au niveau de la caméra. La caméra peut se faufiler plus facilement mais restera probablement moins centrée en cas de rétrécissement de la sonde en comparaison avec le modèle en plastique qui lui est rigide ;
- images en couleur et en haute définition ;
- éclairage additionnel.

13.2. DÉVELOPPEMENT DE TROIS TECHNOLOGIES DE CAMÉRAS ÉTANCHES

Le BRGM a poussé le développement d'une caméra étanche miniature pour permettre d'investiguer l'intérieur des tubes de 32 mm sans devoir les purger. CAMEXPLO a répondu au défi en développant trois prototypes de caméras étanches.

La principale difficulté a été de réaliser un système étanche qui résiste à la pression au pied de sonde (20 bars pour une sonde de 200 m de profondeur). Pour se faire, la vitre en

plexiglas de la caméra non étanche a été remplacée sur les derniers prototypes par une vitre en saphir :

1. premier prototype : caméra de 16mm avec un corps en plastique ABS et munie d'une vitre en plexiglas ;
2. deuxième prototype : caméra de 16 mm avec un corps en aluminium et munie d'une vitre en verre de saphir ;
3. troisième prototype : caméra de 12 mm avec un corps en aluminium et munie d'une vitre en verre de saphir.

Le système d'étanchéité étudié a été différent pour chaque prototype. Les bobines pour dérouler les caméras sont équipées d'un câble de 120 m. Les caméras sont en haute définition.

14. Test de validation de la sonde de température et des prototypes de caméras en cours de développement sur la plateforme expérimentale du BRGM – Région Centre

14.1. PRÉSENTATION DU SITE

La plateforme expérimentale du BRGM a été choisie pour tester les instruments en cours de développement, car elle est équipée de deux sondes géothermiques verticales en boucle fermée type « double U » (diamètre extérieur des tubes : 32 mm), l'une de 100 m de profondeur, la deuxième de 50 m de profondeur. Ces deux échangeurs sont équipés de fibres optiques qui permettent de mesurer la température du fluide caloporteur moyennée sur chaque mètre de fibre déroulée. Elles sont reliées à un réchauffeur électrique et un groupe froid permettant respectivement de réchauffer ou refroidir le liquide caloporteur.

Afin de valider la sonde de température et les trois prototypes de caméras en cours de développement par Camexplo, des mesures ont été réalisées le 17 avril 2015 sur la plateforme expérimentale du BRGM à Orléans. Le déroulé de la journée et des observations ont fait l'objet d'un compte-rendu (annexe 13).

14.2. OBJECTIFS DES INVESTIGATIONS

L'ordre du jour prévoyait de faire un relevé de température dans un des quatre tubes de la sonde géothermique verticale de 100 m de profondeur, ainsi que des inspections vidéo en testant les trois prototypes de caméras développés par Camexplo.

Les objectifs visés étaient de :

- tester la précision et la sensibilité de mesure de la température en réalisant une opération de mesure au repos et après réchauffement du liquide caloporteur de la sonde à 30 °C ;
- étalonner et réaliser en parallèle les mesures de température avec les fibres optiques pour permettre par la suite une comparaison (fiabilité) ;
- tester les trois prototypes de caméras développés par CAMEXPLO (une caméra non étanche et deux caméras étanches) et en particulier leur définition d'image et leur résistance à la pression.

14.3. PROTOTYPES DE CAMÉRAS TESTÉS SUR LA PLATEFORME EXPÉRIMENTALE DU BRGM

Quatre prototypes de caméras développés par Camexplo ont été testés :

- ✓ caméra de 16 mm étanche, corps en aluminium, avec une vitre en saphir ;
- ✓ caméra de 16 mm étanche, corps en plastique, avec une vitre en plexiglas ;
- ✓ caméra de 12 mm étanche, corps en aluminium avec une vitre en saphir ;
- ✓ caméra de 8 mm non étanche, haute résolution, avec un corps en aluminium et munie d'une vitre en verre de saphir.

Le système d'étanchéité est différent à chaque fois. Les bobines sont équipées d'un câble de 120 m pour guider et descendre les caméras. Les images sont enregistrées en haute résolution.

14.4. PROTOCOLE DE MESURES ÉTABLI POUR LA JOURNÉE DU 17 AVRIL 2015

Les mesures du protocole sont :

1. les mesures de température ont débuté dans le « circuit d'eau froide » (mesure à la descente). La sonde de température et la fibre optique étaient préalablement étalonnées dans un bain à 0 °C ;
2. descente ensuite de la caméra étanche ;
3. les tubes ont ensuite été obturés pour les chauffer (2 heures environ) avec le module de chauffage. Les mesures de température ont à nouveau été réalisées dans le « circuit d'eau chaude ». L'objectif était de déterminer la sensibilité de la sonde à des écarts de températures, en ayant comme référence, les mesures de la fibre optique ;
4. la caméra non étanche a ensuite été descendue jusqu'au niveau du fluide caloporteur.

14.5. RÉSULTATS

Mesure des températures dans le circuit d'eau froide :

- les températures augmentent progressivement avec la profondeur, ce qui est cohérent avec le gradient géothermique ;
- on aperçoit des fluctuations qui sont interprétées par des zones de mélange en descendant la sonde (on mesure localement des températures plus froides à mesure que l'on descend la sonde en profondeur) ;
- **l'écart maximal des températures mesurées avec la sonde Camexplo et avec les fibres optiques du BRGM sur le circuit d'eau froide est de 0.3 °C, ce qui est très faible³. Ce résultat démontre la fiabilité de la sonde développée par Camexplo pour cette gamme de température (9 – 14 °C).**

Mesure des températures dans le circuit d'eau chaude :

- le circuit d'eau chaude a ensuite été chauffé pendant 2 heures pour atteindre une température en sortie de sonde de 35 °C, soit un écart de 20 °C avec les mesures réalisées sur le circuit d'eau froide ;
- La comparaison entre les valeurs de température mesurées avec la sonde Camexplo et celles mesurées avec les fibres montre un écart nettement plus important : de l'ordre de 7 °C dans les trente premiers mètres de profondeur, de l'ordre de 4 °C de 30 - 60 m de profondeur et de l'ordre de 2 °C de 60 - 85 m de profondeur. Cet écart plus important peut être expliqué par la géométrie des dispositifs de mesure : la sonde Camexplo et la fibre optique sont en effet situés dans 2 tubes différents de la sonde, ils ont sans doute été impactés de manière différentes par le fluide chaud. Les deux tubes ne sont pas forcément centrés de la même manière par rapport au coulis et les températures peuvent donc évoluer à des vitesses différentes, étant ici en présence d'un régime transitoire de

³ Les valeurs se stabilisent à partir de 3 m de profondeur, limite à partir de laquelle l'influence de la surface est négligeable

transferts thermiques. Pour vérifier la qualité effective de la mesure de la sonde de température Camexplo avec davantage de précision et de certitude à différents niveaux de températures, il vaudrait mieux le faire dans un bain thermostaté avec des mesures à différents paliers de température. Cette expérience n'a pas été prise en compte dans le cadre du présent projet pour des raisons de coût et d'échéance. Elle pourrait faire l'objet des perspectives du développement et de l'optimisation de cet instrument de mesure.

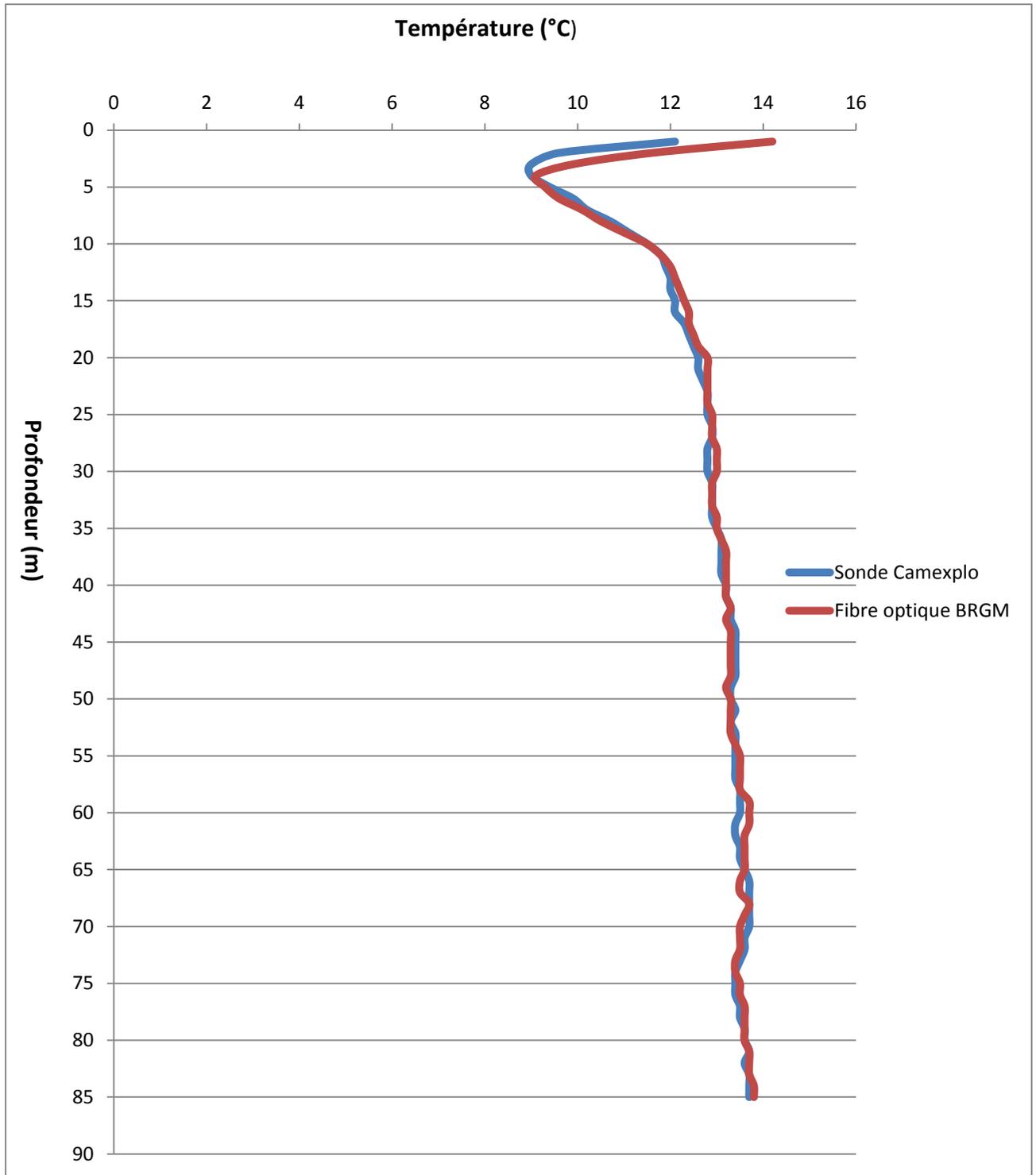


Figure 2 : Relevé de la température réalisé le 17 avril 2015 sur la plateforme expérimentale du BRGM dans un tube de sonde géothermique de 100 m de profondeur, avec la sonde développée par Camexplo. Mesures réalisées sur le **circuit d'eau froide** (mesure à la descente). Comparaison avec les valeurs mesurées avec les fibres optiques qui équipent la sonde géothermique de la plateforme.

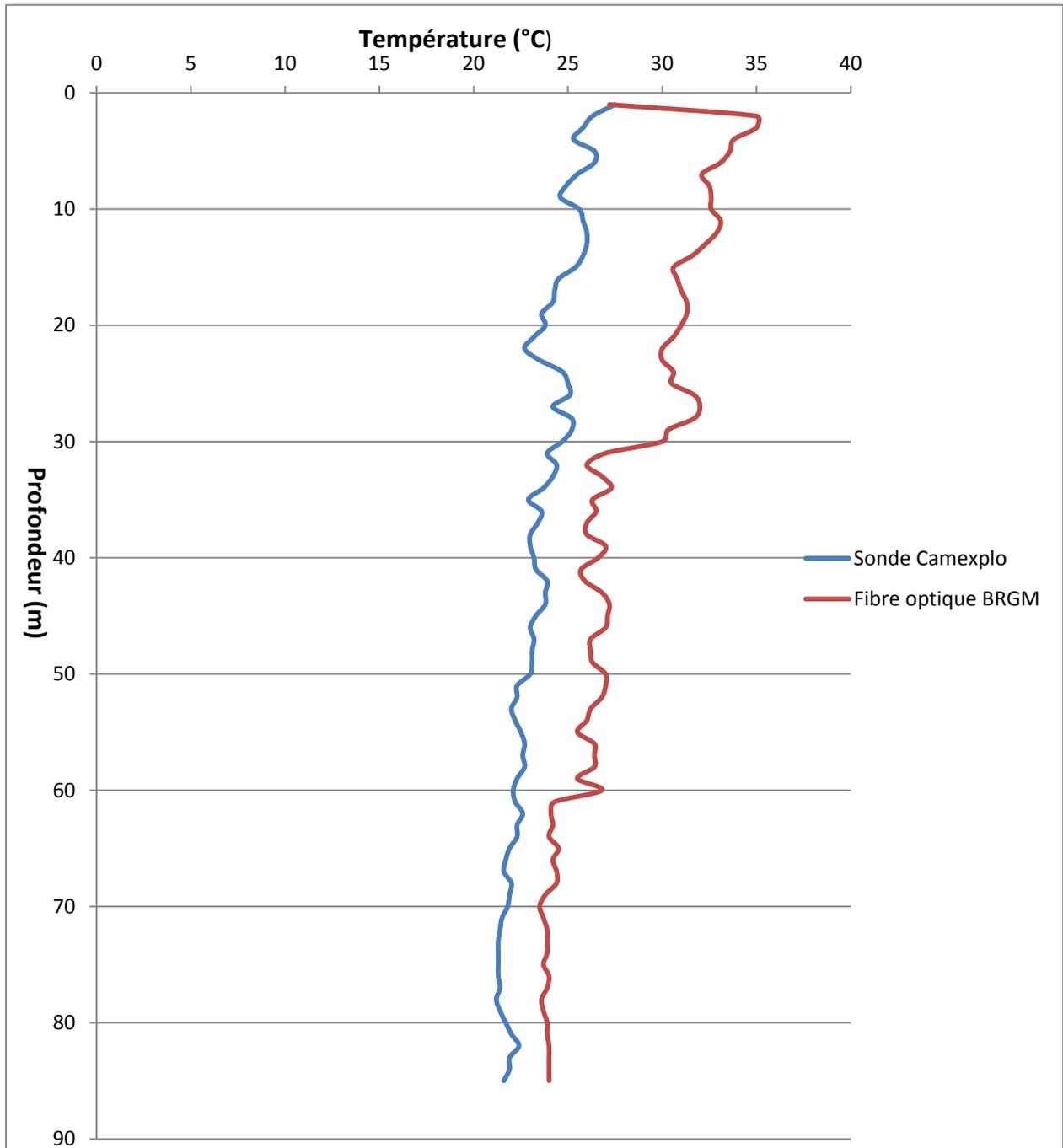


Figure 3 : Relevé de la température réalisé le 17 avril 2015 sur la plateforme expérimentale du BRGM dans un tube de sonde géothermique de 100 m de profondeur, avec la sonde développée par Camexplo. Mesures réalisées sur le **circuit d'eau chaude** (mesure à la descente). Comparaison avec les valeurs mesurées avec les fibres optiques qui équipent la sonde géothermique de la plateforme.

Caméra :

- les trois prototypes de caméra ont **résisté à la pression**. Un essai à la pression a été réalisé durant 2 heures, en laissant la caméra en fond de forage (94 m = 9.4 bars) ;
- les deux caméras étanches ont révélé être **inadaptées à une inspection en présence de glycol**. Dès que la caméra est plongée dans le liquide caloporteur (taux de glycol pour les sondes de la plateforme : 27 %), l'image devient trouble et aucun détail n'est visible. Le glycol étant gras, le verre de la caméra doit se souiller. Une autre hypothèse relevée est la diffraction de la lumière générée par les leds sur le pourtour de la caméra. On peut toutefois noter que l'image est devenue subitement nette à 94 m de profondeur, laissant apparaître les soudures du pied de sonde ;
- un test de la caméra non étanche a révélé une qualité d'image très bonne (haute résolution). On peut également relever que la caméra étanche pourvue du verre saphir fournit une très bonne qualité d'image (dans la partie non immergée de la sonde) ;
- suite à ces essais, le BRGM a proposé à CAMEXPLO de développer un centreur (par exemple à billes) adapté aux diamètres des deux caméras étanches.



Figure 4 : Capture d'écran d'une inspection vidéo avec la caméra non étanche. On aperçoit dans le fond le reflet de l'eau glycolée.



Figure 5 : Dispositif pour réaliser les inspections vidéo. En haut à gauche : caméra non étanche avec dispositif de centrage (anneaux en caoutchouc) et dispositif d'éclairage (leds) prête à être insérée dans le tube de sonde. En haut à droite : caméra étanche. En bas à gauche : insertion de la sonde de température avec le câble guide jaune. En bas à droite : vue d'ensemble sur les liaisons horizontales des sondes géothermiques (gaines calorifugées) de la plateforme expérimentale du BRGM.

14.6. CONCLUSION SUR LES INVESTIGATIONS MENÉES LE 17 AVRIL 2015

- les mesures de températures se sont déroulées sans difficulté, l'outil de mesure étant parfaitement adapté à la géométrie des tubes de sonde en double U. Les mesures réalisées paraissent, avant traitement et comparaison avec les mesures enregistrées par les fibres optiques, cohérentes ;
- les mesures avec les caméras se sont déroulées sans difficultés. Les trois diamètres ont permis l'insertion sans difficulté. Les deux caméras étanches ont résisté à la pression. Par contre, on doit se rendre à l'évidence que les inspections de tubes en présence d'eau glycolée ne sont pas possibles : dès que la caméra pénètre dans le fluide, l'image devient

trouble. En revanche, la caméra non étanche a révélé une image de très bonne définition ;

- ces observations amènent à proposer la solution suivante : adapter le protocole d'inspection dans des tubes préalablement purgé de leur liquide caloporteur (excepté si les tubes sont remplis d'eau claire, auquel cas les caméras étanches se révèlent très efficaces, expérience faite par Camexplo en laboratoire).

15. Développement d'un système de purge des sondes sur le site de la plateforme expérimentale du BRGM et élaboration d'un protocole

Suite aux résultats des inspections vidéo du 17 avril 2015 et afin de répondre à la contrainte imposée par l'impossibilité de réaliser des images nettes avec une caméra étanche en présence d'eau glycolée, il a été décidé de tester sur la plateforme la possibilité de purger la sonde de 50 m de profondeur. L'opération a été réalisée le 24 avril 2015, par Laurent Malizia, technicien en charge de la maintenance de la plateforme expérimentale du BRGM.

15.1. OBJECTIF DE L'OPÉRATION DE PURGE DES SONDES

L'objectif est d'élaborer un protocole simple et non coûteux pour purger les sondes, afin de permettre des inspections vidéo avec une caméra non étanche.

15.2. DISPOSITIF POUR PURGER LES SONDES

Le dispositif était constitué :

- d'un compresseur permettant de souffler de l'air en continu avec une pression de 7 bars (pression suffisante pour une sonde de 50 m de profondeur) ;
- d'un dispositif permettant d'adapter la tête de sonde existante au système de purge (raccord de plomberie)
- de deux bidons de 60 l pour récupérer l'eau glycolée (quantité estimée à ~50 l).



Figure 6 : Photographies du dispositif mis en place le 24 avril 2015 pour purger une sonde double U de 50 m de profondeur sur la plateforme expérimentale du BRGM.

15.3. RÉSULTAT DE L'OPÉRATION DE PURGE

La quantité de liquide caloporteur récupérée a été proche de 50 l, ce qui montre que le dispositif a été efficace. Par contre, il a été fastidieux de récupérer le liquide qui forme rapidement une émulsion et fausse la quantité visuelle récupérée. Cela implique de laisser décanter pour obtenir le volume vrai. Durée de l'opération pour une sonde de 50 m sur les deux U (communiquent au pied de sonde) : 20 minutes.

16. Test et mise au point des instruments de mesure in-situ – Kirchheim (Alsace)

16.1. PRÉSENTATION DU SITE

En Alsace, dans le Bas-Rhin, des dommages sont survenus sur un immeuble résidentiel situé à Kirchheim, disposant d'un champ de sept sondes géothermiques de profondeur moyenne de 100 m. Des investigations géologiques, géophysiques ont été réalisées ces dernières années par le BRGM pour le compte de « l'assurance dommage ouvrage » du bâtiment, en vue de la compréhension des phénomènes responsables du sinistre.

Le BRGM a demandé l'autorisation pour mener des investigations dans ce champ de sondes au titre du projet REMEDIA-FOR. Le dossier faisant aujourd'hui l'objet d'une procédure judiciaire, l'autorisation a été donnée au BRGM par l'Expert judiciaire en charge du dossier.

16.2. PROGRAMME D'INVESTIGATION ET DÉROULEMENT

Les investigations réalisées sur ce site – test se sont déroulées en 4 étapes :

1. réalisation de profils de température avec la sonde développée par Camexplo au sein des sept sondes géothermiques existantes. Dans une sonde, deux profils de température ont été réalisés dans deux tubes différents pour vérifier la répétabilité des mesures ;
2. test des différents prototypes de caméras sur une sonde au sein de laquelle le glycol a été, au préalable remplacé par de l'eau ;
3. purge de toutes les sondes ;
4. inspections caméra de deux sondes géothermiques.

16.3. RELEVÉS DE TEMPÉRATURE DANS LES SONDES GÉOTHERMIQUES

Cette manipulation a été réalisée par la société CAMEXPLO en date du 12 mai 2015.

16.3.1. Présentation du matériel utilisé

La sonde de température confectionnée par la société CAMEXPLO est constituée d'un câble compensé de type K en PVC blindé de 150 m de long et d'une sonde de température SET10 (Hanna Instrument) modifié par remplacement de son câble. Ce système possède la propriété de rester neutre jusqu'à une température de 80 °C. Le diamètre de la sonde de température est de 5 mm (Cf. fig.1).



Figure 7 : Photographie de la sonde de température.

16.3.2. Étalonnage du matériel

L'étalonnage de la sonde utilisée lors des relevés se fait en immergeant la sonde en question, en compagnie d'une sonde de référence (thermomètre étalon) dans le même liquide. L'étalonnage est jugé correct lorsque les deux sondes affichent la même température.

16.3.3. Acquisition des données

Pour assurer une descente correcte à l'intérieur de la sonde géothermique, et afin de pouvoir remonter la sonde sans tirer sur le câble, la sonde de température a été liée à un tire-fil. Une lecture de température a été réalisée à intervalle de 2 mètres.

Lors de la première acquisition (à 2 mètres de profondeur) la sonde nécessite un temps de mise à température. Cette première lecture nécessite 1 à 2 minutes d'attente pour lire une température stabilisée. Les acquisitions suivantes sont plus rapides, la lecture peut se faire après une vingtaine de seconde.



Figure 8 : La sonde de température est liée à un tire fil (à gauche) puis descendu dans la sonde géothermique (à droite).

Les profils de températures ainsi obtenus vont être présentés sous forme de diagramme profondeur/température et comparés au gradient géothermique théorique calculé sur les 100 premiers mètres.

16.3.4. Résultats obtenus

Les résultats sont présentés par rapport aux mesures réalisées sur chaque sonde.

Sonde S1A

La profondeur atteinte par la sonde de température sur la sonde S1A est de 50.5 mètres.

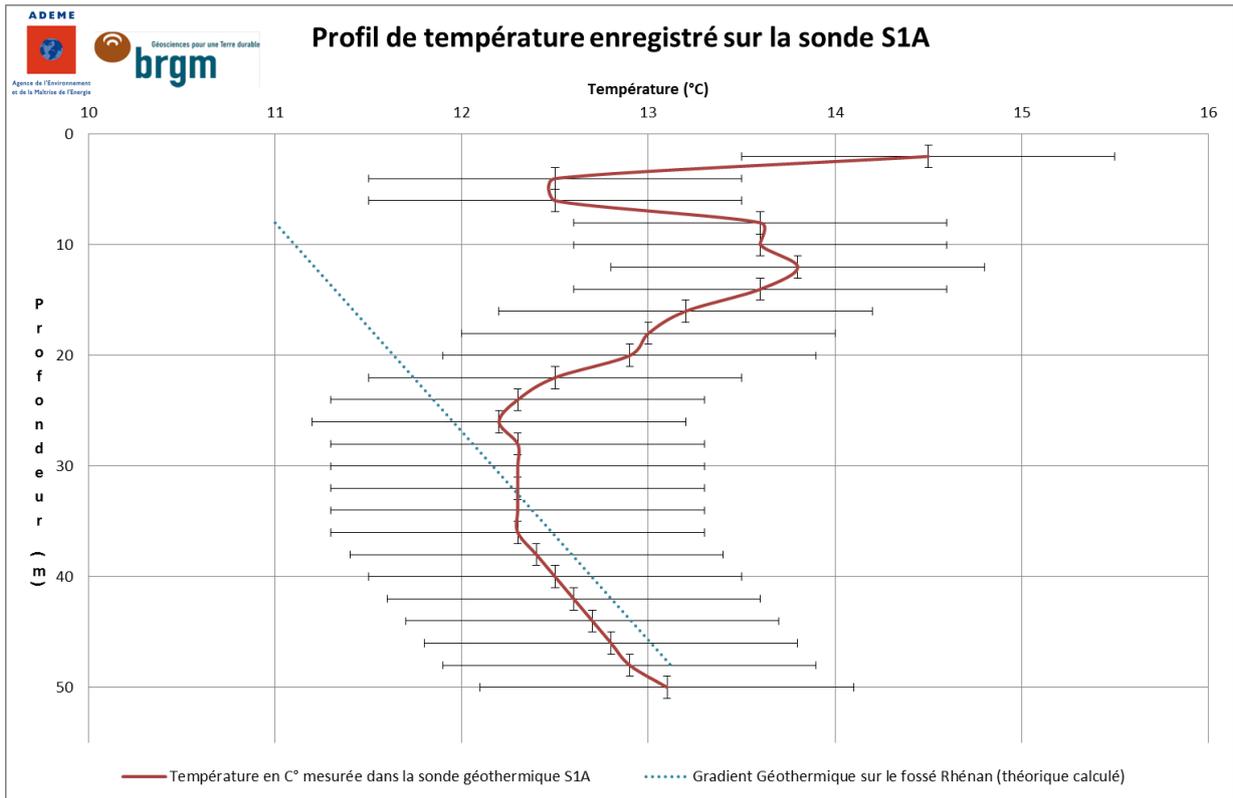


Figure 9 : Profil de température enregistré sur la sonde S1A.

Le profil montre des variations de températures sur la partie supérieure du profil. Cela peut s'expliquer par le fait que les premiers mètres de la sonde géothermique ont été excavés et peuvent donc subir des variations de températures de par leur contact avec l'atmosphère. Le profil semble s'équilibrer à partir d'une profondeur de 20 à 25 mètres. À partir de cette profondeur, le profil de température enregistré sur la sonde géothermique suit la même pente que le gradient géothermique théorique calculé.

Sonde S2A

La profondeur atteinte par la sonde de température sur la sonde S2A est de 98 mètres.

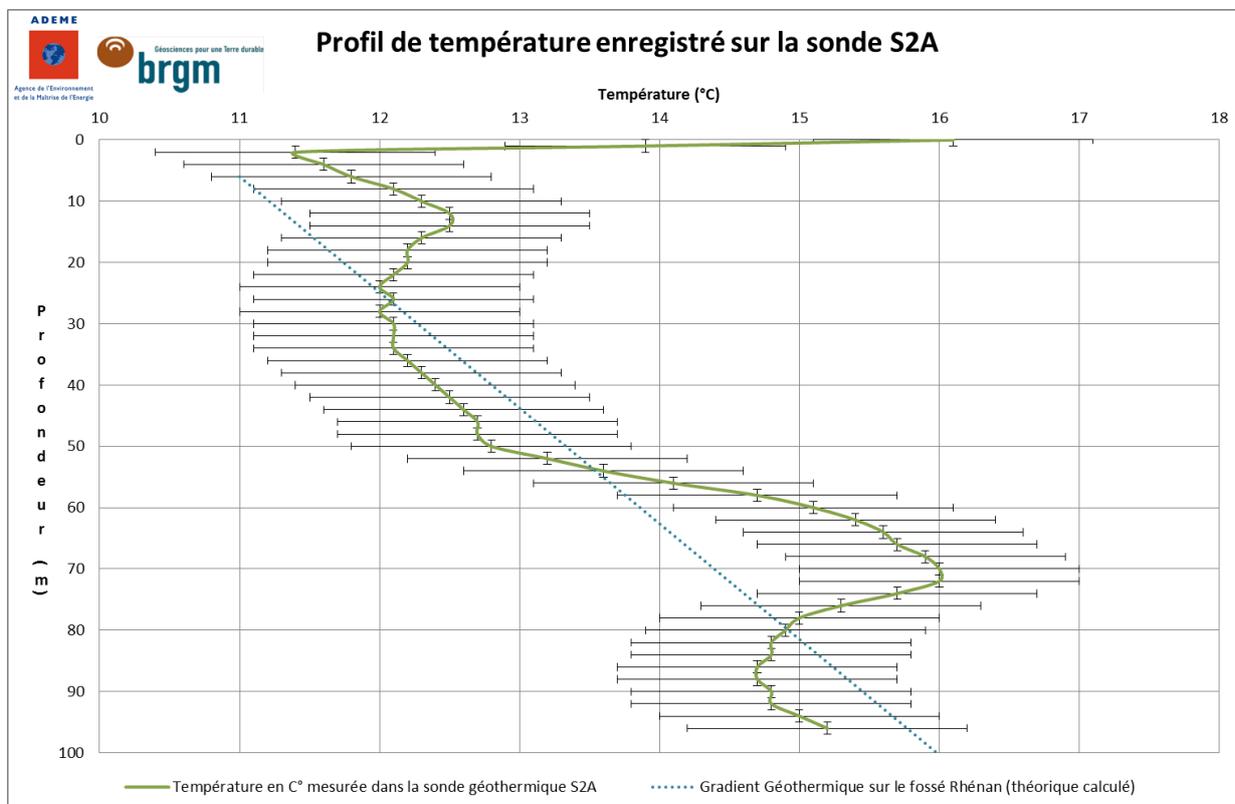


Figure 10 : Profil de température enregistré sur la sonde S2A.

De la même manière que sur le profil S1A, les premiers mètres du profil de températures sont influencés par le fait que les sondes géothermiques ne soient pas enterrées. Entre 20 et 50 mètres de profondeur, les variations du profil de température sont cohérentes avec le gradient géothermique calculé.

Une « anomalie » thermique est visible entre 55 et 75 mètres. Cela correspond aux données acquises lors de la réalisation du forage de reconnaissance en 2013 (Barras & Bruyère, 2013). Le relevé géologique de ce forage a mis en évidence, dans cette zone, la présence d'évaporites. Le gonflement des terrains observé en surface et à l'origine de la fissuration des bâtis est survenu suite à la réalisation des forages sur le site de Kirchheim. L'hypothèse évoquée d'associer ce phénomène à l'hydratation de ces évaporites, par le biais d'un défaut de cimentation, pourrait expliquer la réaction exothermique mesurée sur l'ensemble des sondages. En revanche, ces mesures ne permettent pas d'en déceler la source.

À partir de la profondeur de 85 mètres, les données enregistrées sont à nouveau alignées avec les valeurs comprises entre 20 et 50 mètres sur une droite qui est assimilable à celle du gradient géothermique (compte tenu de l'incertitude de mesure de la sonde de température).

Sonde S3A

La profondeur atteinte par la sonde de température sur la sonde S3A est de 96 mètres.

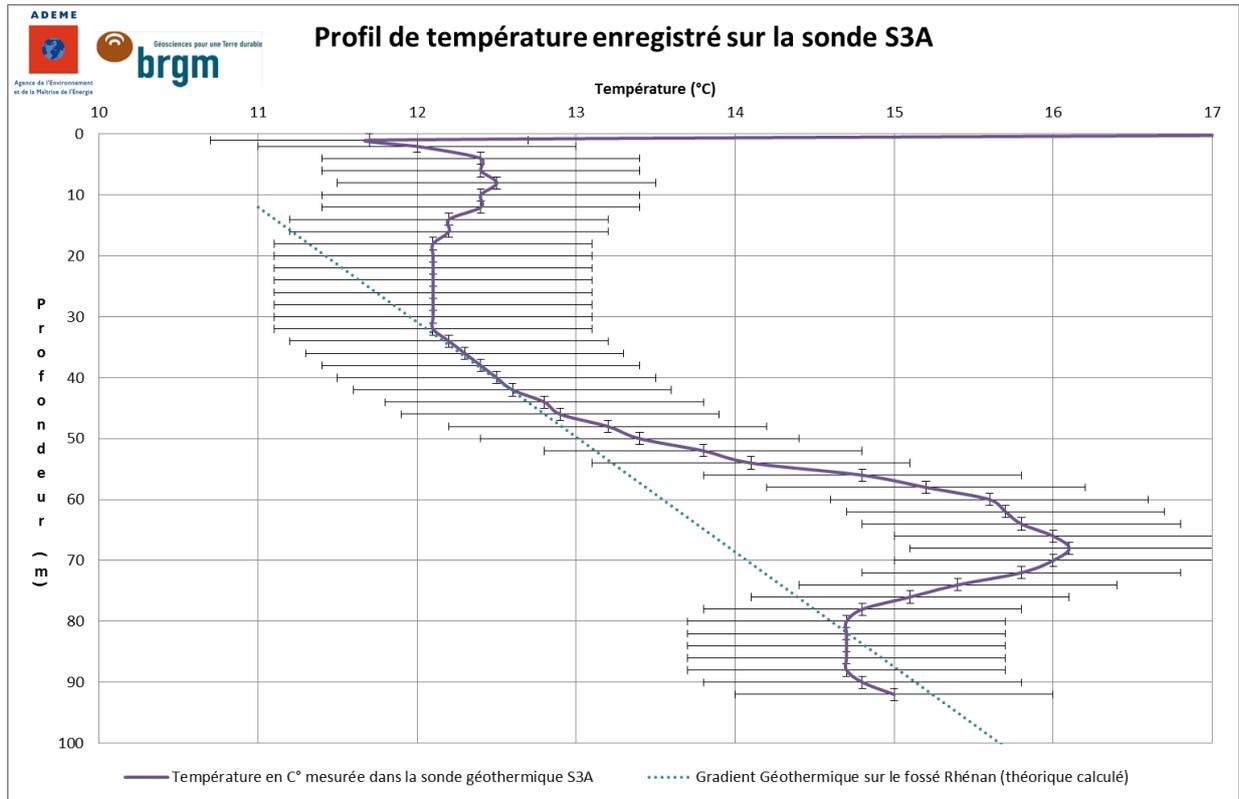


Figure 11 : Profil de température enregistré sur la sonde S3A.

De manière générale, les conclusions établies sur le profil S2A sont reportables sur le profil S3A.

Sonde S4A

La profondeur atteinte par la sonde de température sur la sonde S4A est de 96 mètres.

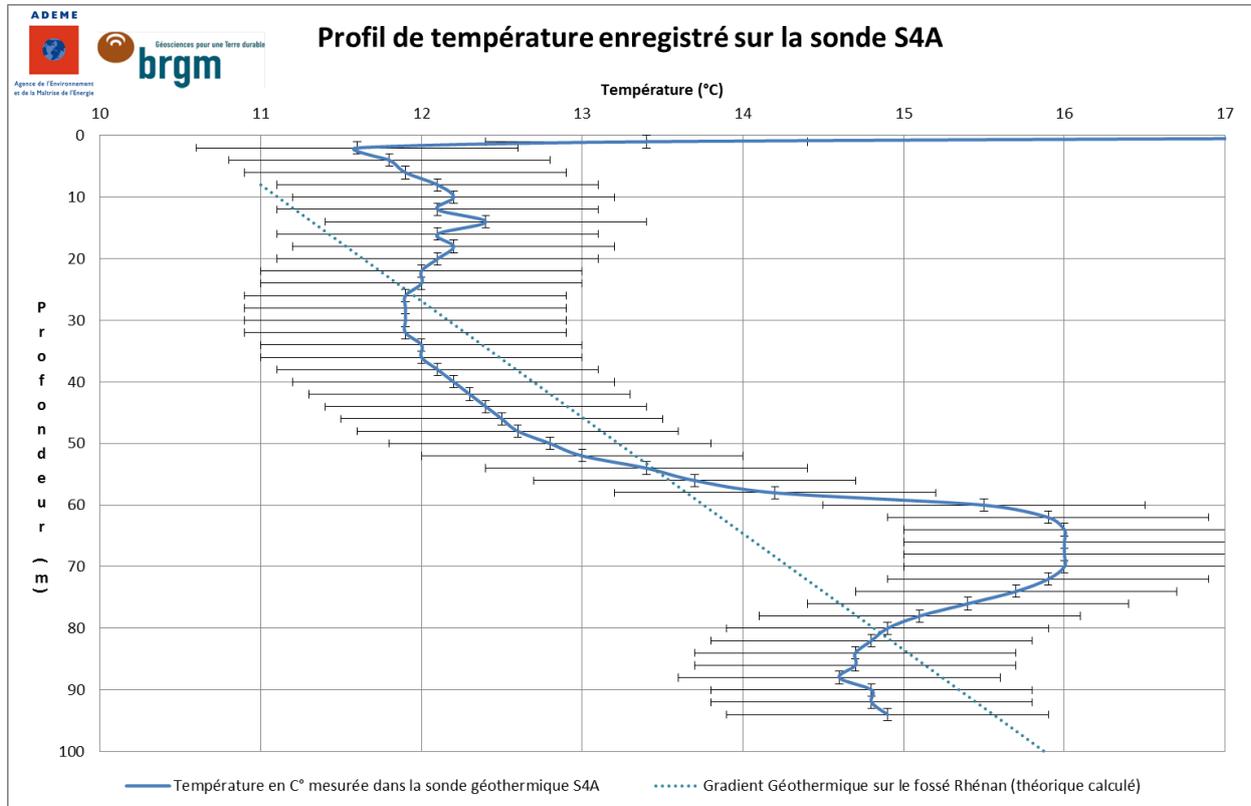


Figure 12 : Profil de température enregistré sur la sonde S4A.

De manière générale, les conclusions établies sur les profils précédents sont reportables sur le profil S4A. L'anomalie thermique est légèrement plus marquée sur ce profil que sur les profils précédents.

Sonde S5A

La profondeur atteinte par la sonde de température sur la sonde S5A est de 60 mètres.

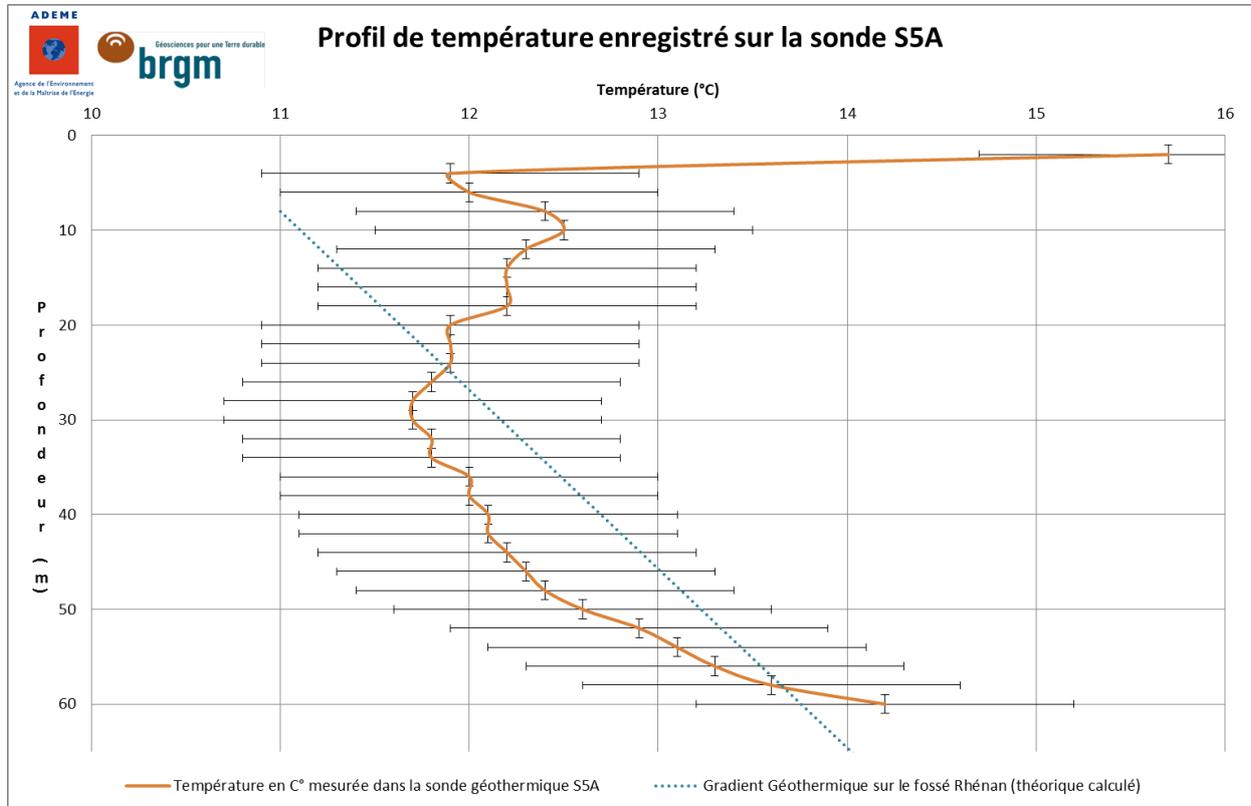


Figure 13 : Profil de température enregistré sur la sonde S5A.

De la même manière que sur la sonde S1A, le profil de température est très éloigné du gradient géothermique sur la partie supérieure du profil. Cela peut s'expliquer par le fait que les premiers mètres de la sonde géothermique ont été excavés et peuvent donc subir des variations de températures de par leur contact avec l'atmosphère. Le profil semble s'équilibrer à partir d'une profondeur de 20 à 25 mètres. À partir de cette profondeur, le profil de température enregistré sur la sonde géothermique suit la même pente que le gradient géothermique théorique calculé. À partir d'une profondeur de 50 mètres, une inflexion du profil de température rappelle l'anomalie thermique déjà enregistrée sur les profils S2, S3 et S4.

Sonde S6A et S6B

La sonde S6 a fait l'objet d'un double levé afin de vérifier la répétabilité des mesures de températures. Les deux sondes sur lesquelles l'acquisition a eu lieu sont les sondes S6A et S6B.

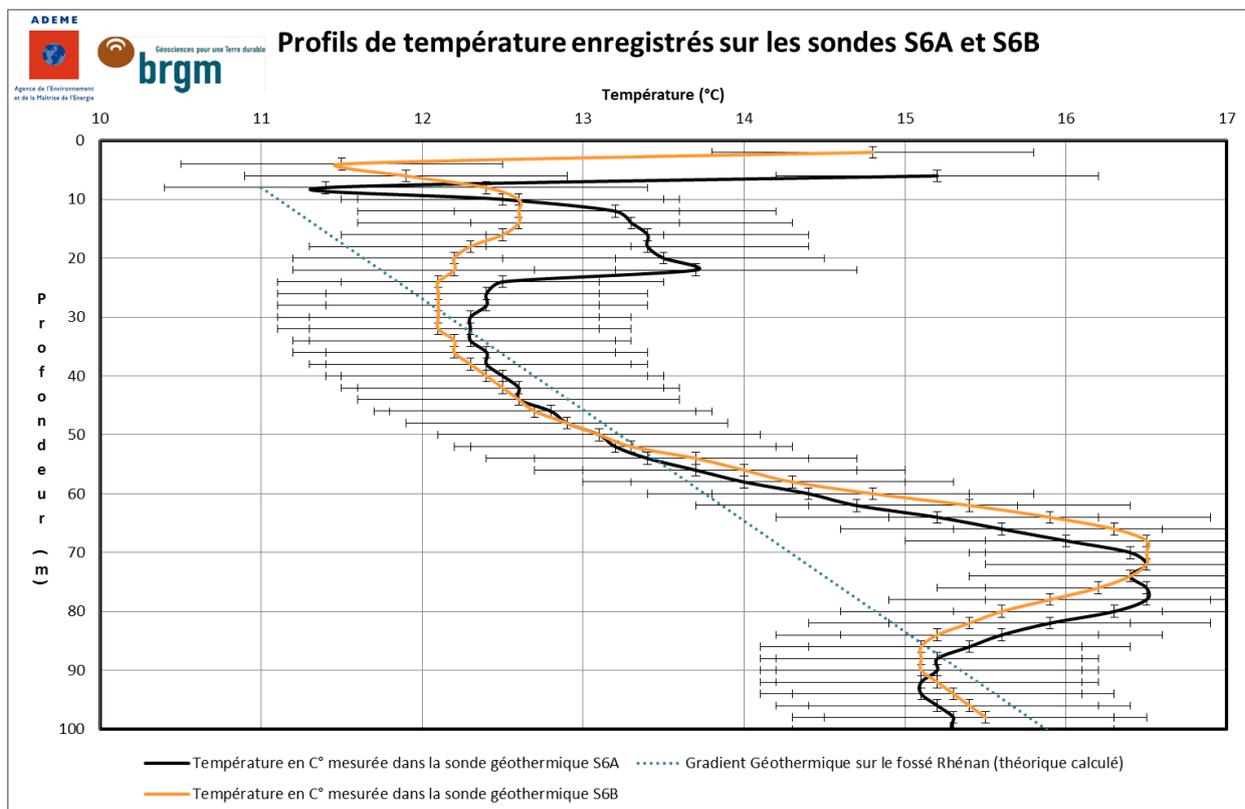


Figure 14 : Profils de température enregistrés sur les sondes S6A et S6B.

La comparaison de ces deux jeux de données montrent que les températures enregistrées sont proches (dans l'intervalle d'incertitude de la sonde, soit $\approx 1^\circ\text{C}$) à l'exception de la partie supérieure du profil. Les profils devront être comparés aux autres acquisitions avant de pouvoir conclure sur la pertinence des levés en partie supérieure.

Après comparaison avec les autres profils, le profil S6B, plus cohérent dans la partie supérieure sera utilisé lors de la compilation des données.

Sonde S7A

Le profil S7A est le profil le plus long réalisé à l'aide de la sonde de température, qui a atteint une profondeur de 116 mètres.

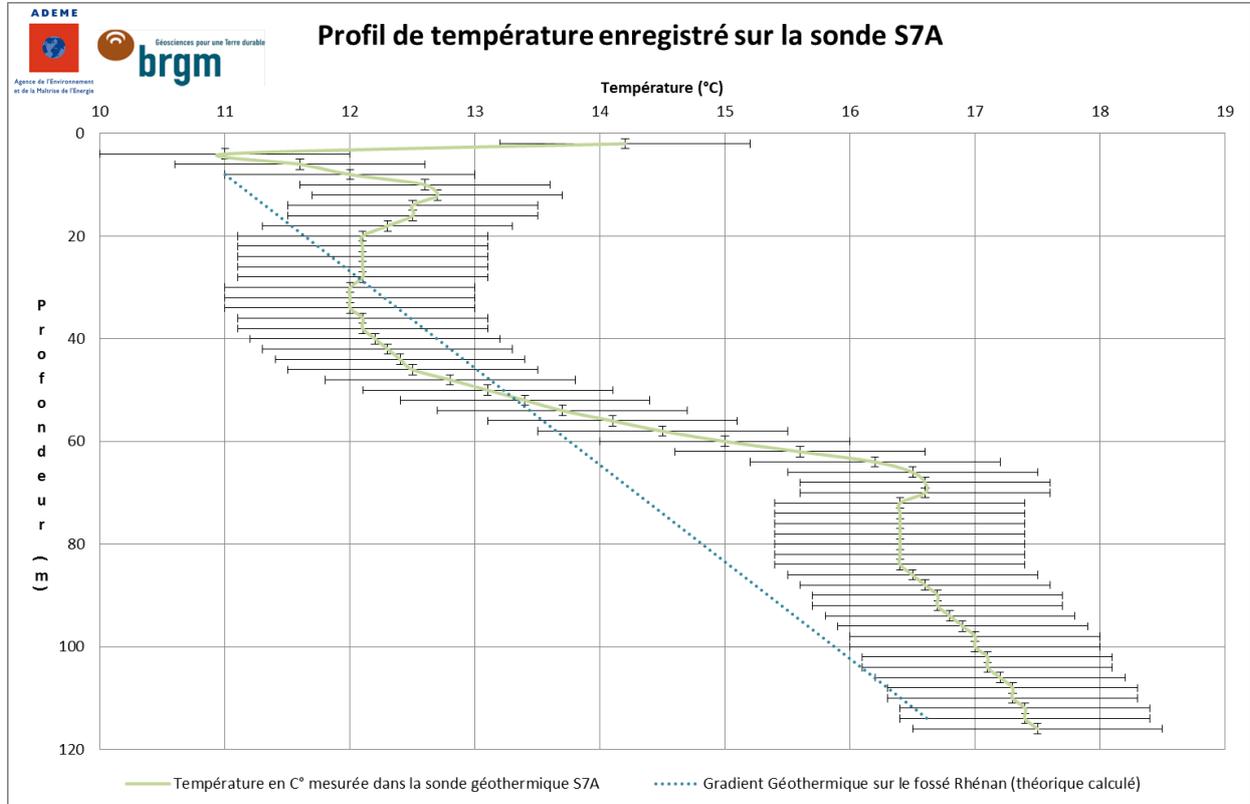


Figure 15 : Profil de température enregistré sur la sonde S7A.

Les conclusions formulées sur les profils S2A, S3A, S4A et S6A concernant la partie supérieure et l'anomalie thermique sont transposable au profil S7A.

Ce profil diffère néanmoins des autres dans la partie inférieure (profondeur supérieure à 80 mètres) où les valeurs de températures enregistrées sont bien supérieures à celles attendues sur le gradient géothermique théorique. C'est également sur ce profil que l'anomalie thermique est la plus importante.

16.3.5. Compilations des résultats

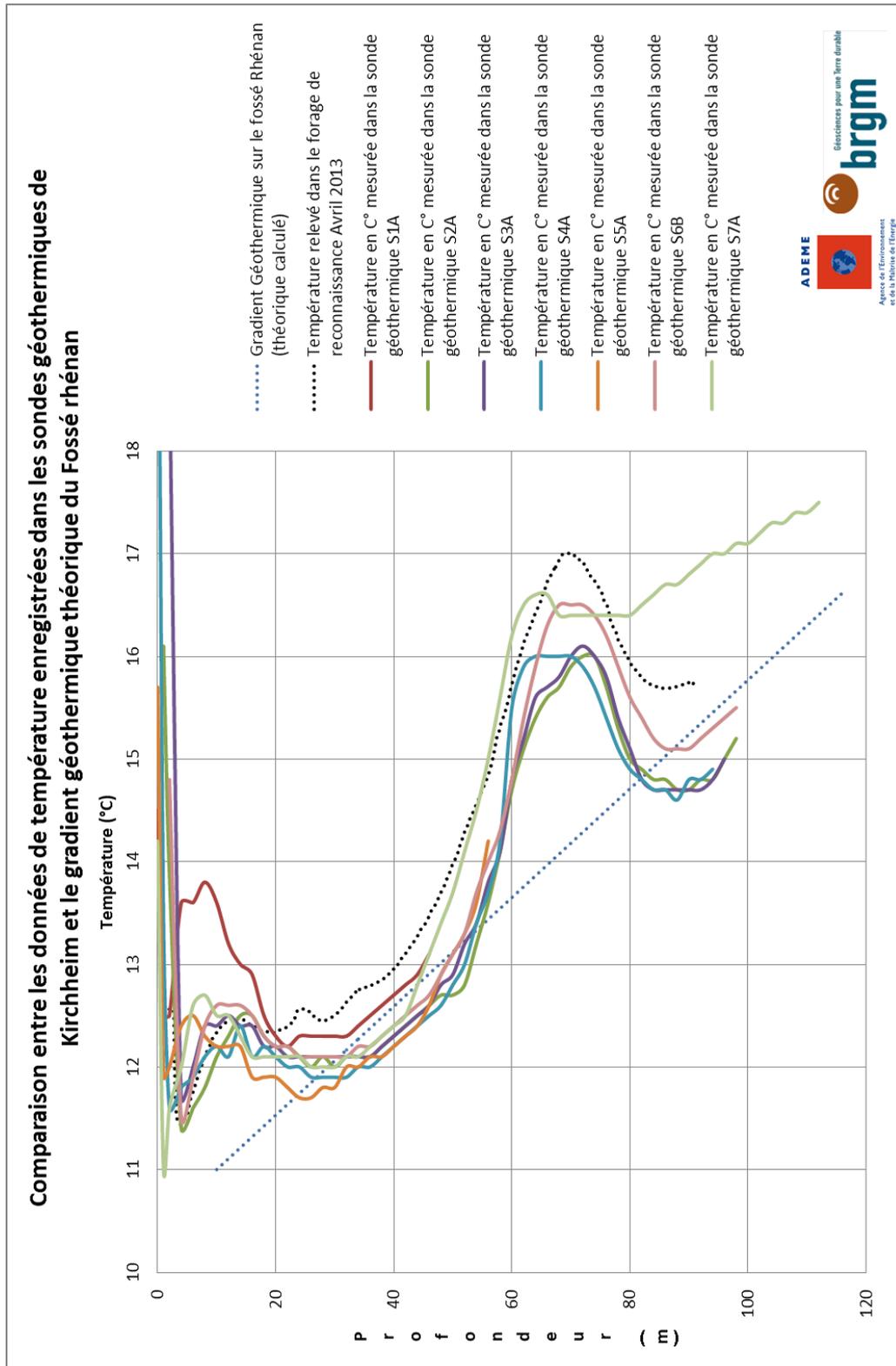


Figure 16 : Compilation de l'ensemble des profils de températures réalisés sur les sondes géothermiques à Kirchheim (67).

16.3.6. Conclusion et limites

L'observation de l'ensemble des courbes sur un seul graphique (Cf. Fig. 11) permet de mettre en évidence deux éléments :

- dans leur ensemble, les données sont cohérentes et corrélables. En effet, les mêmes variations sont visibles sur l'ensemble des profils. Les différents relevés mettent en évidence l'influence, sur les premiers mètres du profil de températures, par le fait que les sondes géothermiques ne soient pas enterrées. Entre 20 et 50 mètres de profondeur, les variations du profil de températures sont généralement cohérentes avec le gradient géothermique calculé. **Une « anomalie » thermique est visible entre 55 et 75 mètres.** Cela correspond aux données acquises lors de la réalisation du forage de reconnaissance en 2013 (Barras & Bruyère, 2013). Le relevé géologique de ce forage a mis en évidence, dans cette zone, la présence d'évaporites. Le gonflement des terrains observé en surface et à l'origine de la fissuration des bâtis est survenu suite à la réalisation des forages sur le site de Kirchheim. L'hypothèse évoquée d'associer ce phénomène à l'hydratation de ces évaporites, par le biais d'un défaut de cimentation, pourrait expliquer la réaction exothermique mesurée sur l'ensemble des sondages. En revanche, ces mesures ne permettent pas d'en déceler la source ;
- le profil S1A présente le même type d'anomalie en partie supérieure que le profil S6A, non présenté sur la figure 11 (Cf. Fig. 12). Hors il s'agit là des deux profils qui ont été réalisés en premier lors des deux interventions sur sites. Il est probable que la sonde de température nécessite un temps d'acclimatation plus important lors du premier profil réalisé.

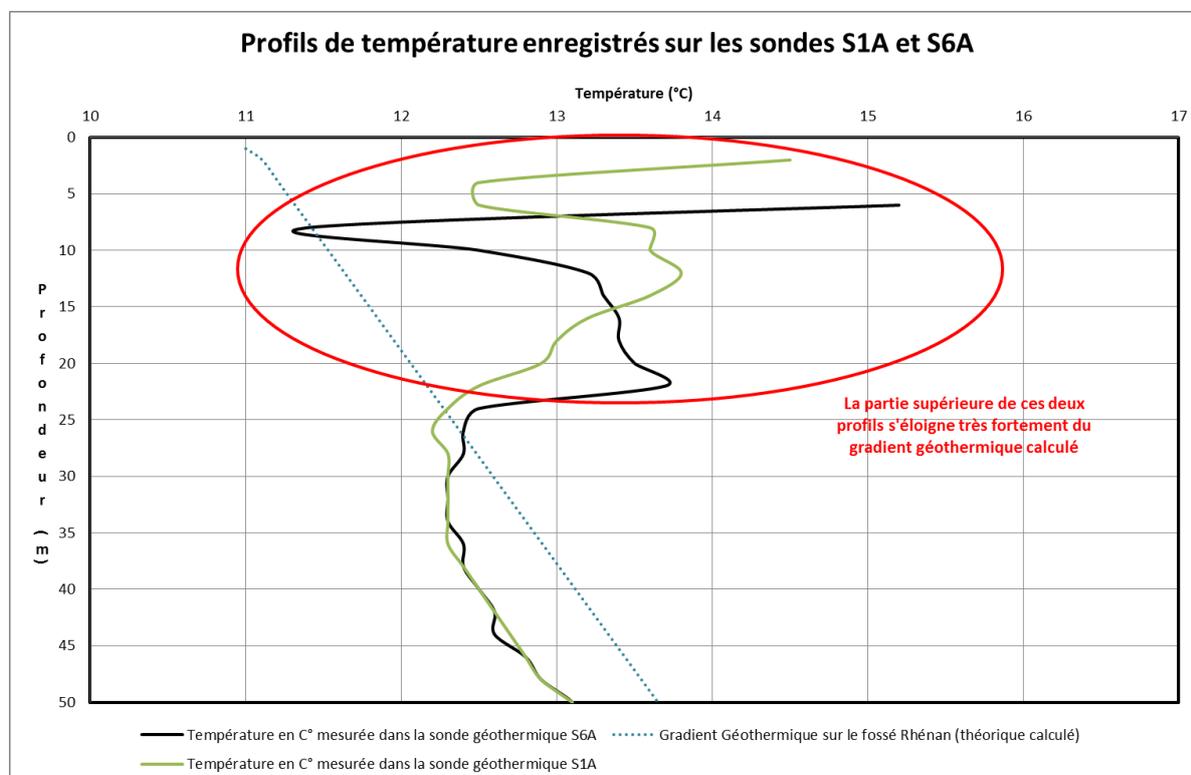


Figure 17 : Profils de température des sondes S1A et S6A qui présentent des variations importantes non cohérentes avec les autres profils enregistrés.

16.4. INVESTIGATIONS PAR CAMÉRA À L'INTÉRIEUR DES SONDES GÉOTHERMIQUES

16.4.1. Tests Préalables : remplacement du glycol par l'eau et test caméras

Compte tenu des expériences réalisées en avril 2015 par la société CAMEXPLO sur la plateforme expérimentale du BRGM qui ont démontré que la caméra étanche n'offrait qu'une très faible visibilité dans une eau contenant du glycol, il a été décidé lors de la rédaction du protocole d'intervention, de remplacer le glycol contenu dans une des sondes géothermiques par de l'eau afin de pouvoir y introduire la caméra étanche.

Cette opération a été réalisée sur la sonde S2A en date du 12 Mai 2015 par l'entreprise AVEA. L'eau claire a été injectée à l'aide d'une pompe de surface et le glycol contenu dans la sonde a été évacuée via le système d'évacuation des eaux usées du bâtiment. En tout 1,200 litres d'eau ont été injectés dans la sonde afin de la purger et de la nettoyer.

Le test réalisé à l'aide de deux caméras étanches envoyées dans le tube ennoyé s'est révélé infructueux. En effet, l'eau était encore trop chargée en glycol pour permettre d'obtenir une image de qualité suffisante. De même il est apparu que l'éclairage fourni par les diodes placées sur les caméras était insuffisant dans les parties dénoyées du tube même si le glycol présent sur le tubage a permis d'améliorer la luminosité en réfléchissant de la lumière.



Figure 18 : Photographie d'une des caméras étanches.

Le même test a été réalisé à l'aide d'une caméra non étanche et il est apparu que la qualité de l'image était bien meilleure dans la partie dénoyée du tubage.

Suite aux résultats de ces différents tests et après discussion avec la société CAMEXPLO, il a été convenu que la meilleure solution en vue des acquisitions vidéo sur les sondes géothermiques est de purger les tubes et de les laisser vides.

16.4.2. Purge des sondes géothermiques

Étant donné les résultats des différents tests de caméra réalisés en date du 12 mai 2015, il a été décidé de procéder à une purge d'un tube en U par couple de sondes géothermiques et de ne pas injecter d'eau par la suite, les tubes restant secs.

Ces opérations de purge ont été réalisées le 20 mai 2015 par l'entreprise AVEA. Pour ce faire, un compresseur d'une puissance de 16 bars a été installé sur site le temps de la manipulation. Le tableau ci-dessous (Cf. Tableau 1) précise quel couple de tube a été purgé pour chaque sonde géothermique.

N° Sonde	Couple de tube purgé
1	AD
2	AD
3	AD
4	AB
5	AD
6	AD
7	BC

Tableau 1 : Identification pour chaque sonde géothermique des couples de tubes purgés sur les quatre tubes « ABCD ».

De manière à estimer le volume de glycol contenu dans chaque tube, le fluide purgé a transité par un fût de 220 litres avant d'être éliminé via le réseau d'évacuation des eaux usées.

La purge des sondes a été réalisée en deux temps. Dans un premier temps, la majorité du fluide a été purgé en injectant de l'air sous haute pression (environ 14 bars). Puis après un temps de repos, une nouvelle injection d'air a été réalisée. Cette seconde injection a permis, en général de récupérer 1 à 2 litres de fluide en plus. Il semble que le temps de repos n'influe pas sur la quantité de fluide récupéré. En effet, les sondes 4 et 7 ont subi la seconde injection d'air plusieurs heures après la première et les volumes récupérés n'ont pas été plus importants que sur les autres sondes où la seconde injection a eu lieu quelques minutes après la première.

Le tableau 2, ci-après présente les volumes purgés sur l'ensemble des 7 sondes :

N° Sonde	Couple de tube purgé	Profondeur atteinte lors des relevés de température (m)	Volume théorique (L)	Volume purgé (L)
1	AD	50.5	49.6	104 Litres
2	AD	97	95.2	102 Litres
3	AD	96.5	94.7	97 Litres
4	AB	95	93.3	97 Litres
5	AD	64	62.8	104 Litres
6	AD	98	96.2	104 Litres
7	BC	116	113.9	104 Litres

Tableau 2 : Volume théorique et volume purgé par sonde géothermique.

Il apparait que les ordres de grandeur des volumes purgés correspondent approximativement aux ordres de grandeur théoriques calculés à partir des profondeurs atteintes lors de la réalisation des profils de températures et du diamètre des tubes PE utilisés lors de l'installation des sondes géothermiques pour les tubes dont la profondeur atteinte avoisine les 100 mètres.

Cependant, sur les deux sondes pour lesquels la profondeur atteinte lors de la réalisation des profils de température est moins importante (S1 et S5) il apparait que les volumes purgés présentent le même ordre de grandeur que les autres sondes. Il est donc probable que ces sondes géothermiques aient été installées à la même profondeur mais qu'un « défaut » dans le tube ait empêché la sonde de température de descendre plus profondément. Le passage caméra devrait permettre de valider ou d'invalidé cette hypothèse. Les photos des opérations de purge sont présentées ci-après (Cf. Fig. 14 à 16).



Figure 19 : Raccordement des tuyaux de purge sur la sonde S7.

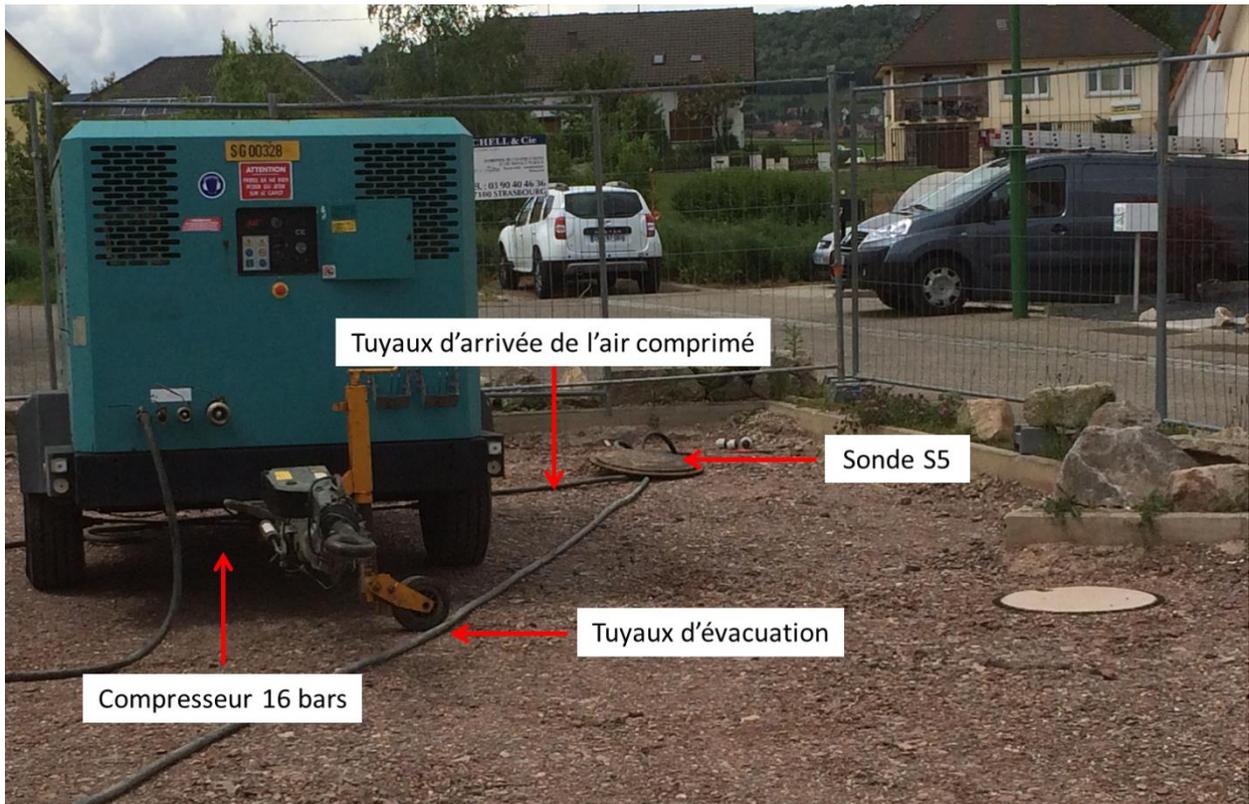


Figure 20 : Photographie de l'installation de purge sur la sonde S5.



Figure 21 : Fûts permettant l'estimation du volume de glycol présent dans les sondes et évacuation dans le système des eaux usées.

16.4.3. Passages caméra

Les inspections caméras ont eu lieu en date du 22 Mai 2015. Elles ont fait l'objet d'un compte-rendu (annexe 12)

Sonde S2A

Un passage caméra a été réalisé dans la sonde S2A à l'aide de la caméra étanche de 16 mm sur laquelle un éclairage supplémentaire de 4 leds de 3mm en haute luminosité a été rajouté suite aux tests du 12 Mai 2015.

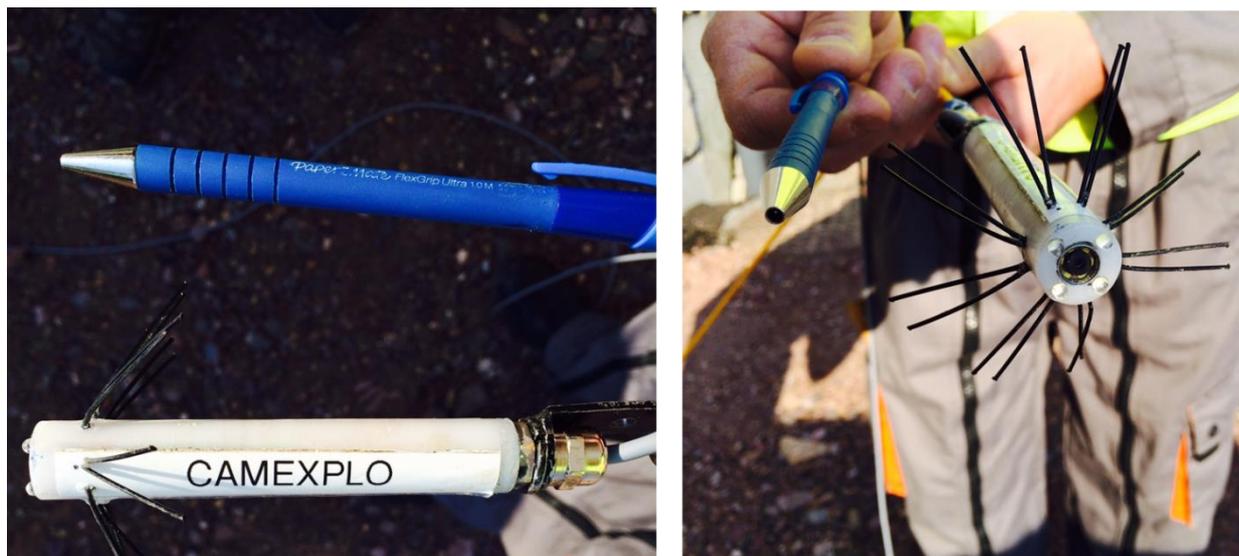


Figure 22 : Photographie de la caméra étanche 16mm avec les 4 leds supplémentaires et le centreur.

L'ajout des leds supplémentaires a été bénéfique puisque les images obtenues permettent une inspection précise du tube (Cf. Fig. 18).

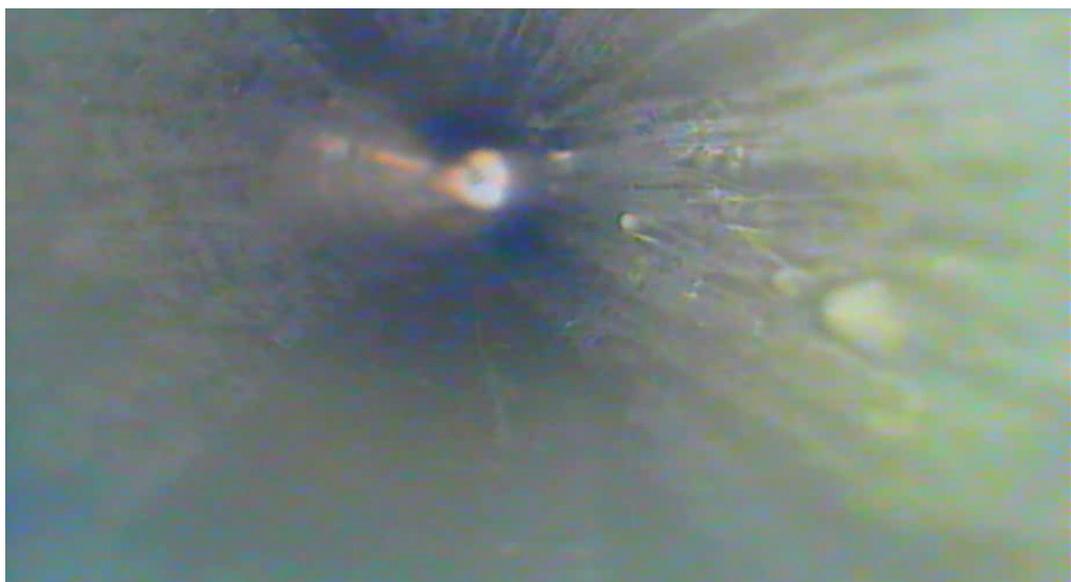


Figure 23 : Capture d'écran de la vidéo de la descente de la caméra étanche dans la sonde S2A.

La profondeur attendue de 96 mètres a été atteinte sans qu'aucune anomalie n'ait été détectée sur cette sonde qui semble être en bon état. Il a néanmoins été remarqué, à plusieurs reprises, que le tube PE est vrillé.

La descente de la caméra a été réalisée sans difficulté. Cependant lors de la remontée, la caméra s'est coincée alors que l'équipe de CAMEXPLO tentait de l'extraire de la sonde. Le câble d'alimentation de la sonde a lâché ce qui a encore amenuisé les chances de récupérer l'instrument. Plusieurs méthodes ont été tentées pour remonter la caméra (utilisation d'un bras de levage artisanal, traction du tire-fil avec une voiture) mais il a été impossible de la remonter à la surface. L'appareil est coincé à une profondeur approximative de 85 à 90 mètres.

Sonde S1A ET S1D

Suite à l'incident de matériel rencontré sur la sonde S2A, un passage caméra a été réalisé sur la sonde S1A à l'aide de la caméra 12 mm sur laquelle un éclairage supplémentaire et un centreur avaient également été ajoutés (Cf. Fig. 19).



Figure 24 : Photographie de la caméra 12 mm.

Pour rappel, la sonde de température avait été bloquée à une profondeur de 50,5 mètres mais le volume de glycol purgé laissait entendre que le linéaire de tube présenterait une profondeur d'une centaine de mètres (de la même manière que toutes les autres sondes).

De la même manière que sur la sonde S2A, la descente de la caméra s'est passée sans encombre. Il semble que le tube PE soit également vrillé. Les images ont montré que le tube **présente bien un défaut à l'endroit où la sonde de température avait été bloquée**. En effet, une « ovalisation » de la sonde géothermique est observable lors de la descente de la caméra et un dépôt dont l'origine et la composition sont difficilement définissables obture la sonde, empêchant de ce fait la progression de la caméra et, antérieurement, de la sonde de température.



Figure 25 : Captures d'écran du tube en bon état et de la partie « ovalisée ».



Figure 26 : Capture d'écran du dépôt obturant la sonde à une profondeur de 50,5 mètres.

La modification de la forme du tubage ne peut être expliquée uniquement sur la base des fichiers vidéo, différentes hypothèses peuvent être émises :

- la modification de la forme du tubage se trouve à la profondeur à laquelle le profil de température se modifie (la température augmente de manière plus forte que prévue). Il est possible que la transformation de l'anhydrite en gypse (réaction exothermique mais

qui entraîne également une augmentation de volume) ait exercé une pression plus forte sur le tube, ce qui l'aurait déformé ;

- un cisaillement, induit par une faille aurait également pu entraîner cette modification de forme.

L'exploration de la sonde S1A ayant montré des défauts sur le tube PE, il a été décidé d'explorer l'autre extrémité du même tube (S1D).

La descente de la caméra s'est également passée sans encombre. Arrivée à la profondeur de 50 mètres, il apparaît que l'intégrité de la sonde n'est pas à remettre en question. Aucune modification de forme du tubage n'a été identifiée. Cependant, il a été constaté que le tube subit également des contraintes importantes car il apparaît très vrillé.



Figure 27 : Capture d'écran de la descente dans la sonde S1D à une profondeur approximative de 50 mètres.

Les investigations réalisées dans les sondes S1A et S1D prouvent que la méthodologie employée afin de réaliser les passages caméras permet d'identifier les éventuelles déformations et/ou défauts dans les sondes géothermiques.

La mésaventure rencontrée lors de la remontée du matériel sur la sonde S2A montre néanmoins que le matériel peut encore être amélioré, notamment via la rigidification du câble d'alimentation de la caméra de manière à ne pas avoir à utiliser de tire-fil. Ceci permettrait d'éviter les risques d'entortillement du câble d'alimentation autour du tire-fil, ce qui est certainement à l'origine du coincement de la caméra dans la sonde S2A.

Les autres sondes (S3 à S7) auraient également dû faire l'objet de passages caméra mais suite à l'incident rencontré sur la sonde S2A et à la rupture du tire-fil lors des tentatives de remontée de la caméra, il a été impossible de réaliser les autres profils car la profondeur atteinte par la sonde de température était trop importante par rapport au métrage restant sur le tire-fil.

17. Conclusion et perspectives

L'objectif initial du projet REMEDIA-FOR était de réaliser un document qui fasse état des solutions de remédiation maîtrisées par les foreurs en France ou à l'étranger sur la base de cas spécifiques, mettant en avant des recommandations techniques, à titre préventif et à titre curatif, et proposant des solutions concrètes d'investigation ou de remédiation reconnues par les professionnels.

Après une année de travail, le BRGM et le comité de suivi ont fait le constat que le nombre de cas concrets proposés par les foreurs est très limité (2 cas : Kirchheim et Storengy). Ce résultat est lié à l'absence progressive des entreprises de forage aux réunions de comité de suivi. En conséquence, le BRGM a proposé, en concertation avec l'ADEME, de réorienter le projet vers une nouvelle phase **de développement de nouveaux outils d'investigation** (instruments de mesure) dans le domaine des sondes géothermiques verticales qui constituent un préalable obligatoire à tous travaux de remédiation.

Afin de déterminer les méthodes connues et éprouvées qui permettent l'investigation des sondes, le BRGM a confié à AKWATERRA de mener une enquête en Allemagne et en Suisse afin d'établir l'état de l'art sur les méthodes d'instrumentation de sondes géothermiques verticales et les méthodes de remédiation. Les résultats de cette enquête montrent que les instruments de mesures spécifiques à l'investigation des sondes sont encore à l'état de prototype et non adaptés aux diamètres de tubes de PEHD généralement utilisés en France (32 mm extérieur).

En se basant sur les résultats de cet état de l'art, le BRGM a confié à la PME Camexplo le développement de deux instruments de mesures miniaturisés, de plus petits diamètres que ceux développés en Allemagne, afin de pouvoir investiguer des sondes de diamètre intérieur de 25 mm (correspondant à un diamètre extérieur d'un tube PEHD de 32 mm) : un instrument pour mesurer le profil vertical de **température** du fluide caloporteur dans les sondes géothermiques adapté aux diamètres intérieurs de 25 mm (32 mm extérieur) et deux **Caméras** (étanche et non étanche) permettant d'enregistrer des images en haute définition.

Les essais de validation réalisés sur la plateforme expérimentale du BRGM ont démontré la bonne fiabilité de la sonde de température Camexplo pour la gamme de température (9 – 14 °C), avec des valeurs mesurées très proches de celles mesurées par les fibres optiques qui équipent la sonde géothermique de la plateforme (écart maximal de température de 0.3 °C). Les inspections vidéo ont démontré la très bonne résolution de la caméra non étanche, mais en revanche l'impossibilité d'enregistrer des images nettes en présence d'eau glycolée.

Les différents prototypes de ces deux instruments de mesures ont été ensuite testés in-situ sur le site de Kirchheim. Les différents essais ont démontré l'efficacité de la sonde de température, avec des valeurs mesurées se rapprochant du gradient géothermique théorique sur une profondeur de 100 m et mettant en évidence une anomalie thermique vers 50 – 60 m de profondeur. Cette anomalie pourrait être interprétée par une réaction exothermique associée à l'hydratation des couches évaporitiques. Le gonflement des terrains observé en surface et à l'origine de la fissuration des bâtis est survenu suite à la réalisation des forages sur le site de Kirchheim. L'hypothèse évoquée d'associer ce phénomène à l'hydratation de ces évaporites, par le biais d'un défaut de cimentation, pourrait expliquer la réaction exothermique mesurée sur l'ensemble des sondages. En revanche, ces mesures ne permettent pas d'en déceler la source. Les inspections vidéo ont permis de révéler un écrasement du tube à 50 m de profondeur, à l'origine du blocage de la sonde de température. Ce défaut se matérialise sur l'image par une ovalisation du tube.

Le développement de ces deux instruments de mesure est donc concluant, au regard des essais de validation réalisés sur la plateforme expérimentale du BRGM et sur le site de Kirchheim. La sonde de température permet de mesurer un profil vertical de température en vue de déceler une anomalie. Cette anomalie doit cependant trouver une interprétation qui peut changer selon le contexte hydrogéologique : dans le cas de Kirchheim, l'hypothèse de la présence d'évaporite mis en contact avec de l'eau souterraine par le biais d'un défaut de cimentation a été évoquée. Il s'agit toutefois d'une hypothèse qui doit encore être étayée par des investigations supplémentaires. La caméra permet d'avoir une autre source d'information, sur les anomalies de la surface intérieure des tubes (griffures, fissures) ou de la géométrie (écrasement) : dans ce cas également, il s'agit de trouver une interprétation à ces observations (phénomènes de gonflement, écrasement à la mise en œuvre).

Les perspectives pour la poursuite de ces travaux seraient d'améliorer d'une part ces outils afin de les rendre opérationnels pour leur mise en vente sur le Marché et d'autre part, d'améliorer les méthodes de diagnostic en réalisant plusieurs tests sur des cas concrets où des problèmes se posent, en France (Lochwiller par exemple) ou en Allemagne (Staufen). Ces différents essais in-situ permettraient d'affiner les protocoles de mesure et d'interprétation des résultats.

Annexe 1

Comité de suivi : liste des participants

Ministère :

- Benoît Spittler Benoit.Spittler@developpement-durable.gouv.fr :
Chargé de mission "géothermie et forages", MEDDE - MRP/ DGALN/DEB/GR

ADEME :

- Norbert Bommensatt (ADEME) : norbert.bommensatt@ademe.fr

BRGM :

- Pascal Monnot (BRGM) : p.monnot@brgm.fr
- Anne-Valérie Barras av.barras@brgm.fr

AFPG :

- Christian Boissavy : christian.boissavy@orange.fr

Expert :

- Jean-Marie Weider : jm.weider@acotex.fr
Expert (ACOTEX)

BE Sous-sol :

- Olivier Grière (G2h-conseils) g2hconseils@sfr.fr

Foreurs :

- Bernard Sustrac (LAVIOSA – MPC) bernard.sustrac@mpcfr.com
- Serge Resnikow (LAVIOSA – MPC) serge.resnikow@mpcfr.com
- Murielle Legrange (CFG) m.grange@cfg.brgm.fr
- Etienne Gatelier (SADE) etienne.gatelier@sade-cqth.fr
- Ludovic Reynaert (MASSE) forages.masse@wanadoo.fr
- Jean-Pierre Cuny jpcuny@wanadoo.fr
- Sebastien Vauthrin sebastien.vauthrin@vauthrin-forages.fr
- Régis Eme (Mannfor) eme@mannfor.eu
- Julien Fabiano (MCCF) julien.fabiano@mccf.fr

Annexe 2

Compte-rendu de la réunion du comité de suivi du 19.06.14

CG 88/10 PM/MP

COMPTE-RENDU	
Opération : REMEDIA-FOR	Numéro : PDR14DGR13
Objet : Réunion de lancement	
Date de la réunion : 19 juin 2014 Rédacteur : P. Monnot	Lieu : Paris (Tour Mirabeau)
<p>Participants :</p> <p>Ministère :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Benoît Spittler Benoit.Spittler@developpement-durable.gouv.fr : <i>Chargé de mission "géothermie et forages", MEDDE - MRP/ DGALN/DEB/GR</i> <p>BRGM :</p> <ul style="list-style-type: none"> - P. Monnot (BRGM) p.monnot@brgm.fr - Anne-Valérie Barras av.barras@brgm.fr <p>Assureurs :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Jean-Marie Weider : jm.weider@acotex.fr <i>Expert Assureur (ACOTEX)</i> <p>BE Sous-sol :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Olivier Grière (G2h-conseils) g2hconseils@sfr.fr <p>Foreurs :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Bernard Sustrac (LAVIOSA – MPC) bernard.sustrac@mpcfr.com - Serge Resnikow (LAVIOSA – MPC) serge.resnikow@mpcfr.com - Murielle Legrange (CFG) m.grange@cfg.brgm.fr - Etienne Gatelier (SADE) etienne.gatelier@sade-cgth.fr - Ludovic Reynaert (MASSE) forages.masse@wanadoo.fr - JP Cuny jpcuny@wanadoo.fr - Sebastien Vauthrin sebastien.vauthrin@vauthrin-forages.fr - Régis Eme (Mannfor) eme@mannfor.eu - Julien Fabiano (MCCF) julien.fabiano@mccf.fr 	
<p>Excusés :</p> <p>BRGM :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Alexis Guttierrez a.gutierrez@brgm.fr <p>BE Sous-sol :</p> <ul style="list-style-type: none"> - H. Lautrette (BURGEAP) h.lautrette@burgeap.fr <p>Foreurs :</p> <ul style="list-style-type: none"> - JY Hervé (Forage assistance) forage.assistance@gmail.com - Joel Sillard (SADE) sillard.joel@sade-cgth.fr - Philippe Lyonnet (Foradour) p.lyonnet@foradour.com 	
<p>Diffusion pour information :</p> <p>Sanjuan Bernard (BRGM) : b.sanjuan@brgm.fr Dominique Midot (BRGM) : d.midot@brgm.fr Eric GARROUSTET (SGEG) : garroustet@sfeg-forages.fr Christian Boissavy (AFPG) : christian.boissavy@orange.fr Eric Lasne (CFG Services) : e.lasne@cfg.brgm.fr Norbert Bommensatt (ADEME) : norbert.bommensatt@ademe.fr Philippe Laplaige (ADEME) : philippe.laplaige@ademe.fr</p>	

25/06/2014

1

ORDRE DU JOUR
<ul style="list-style-type: none">▪ Contexte▪ Objectifs▪ Périmètre du projet▪ Plan d'action▪ Planning et suites des opérations

1. CONTEXTE

Dans le cadre d'un projet de recherche intitulé REMEDIA-FOR, l'objectif est de faire un état de l'art sur les retours d'expérience en matière de forage géothermiques ayant connu des difficultés de réalisation ou d'exploitation.

2. OBJECTIFS

L'objectif est de créer un consortium de foreurs et bureaux d'études, pouvoirs publics et experts afin de faire un état de l'art sur des problématiques ciblées dans le domaine du forage géothermique. L'objectif est d'aboutir à la rédaction d'un document d'aide à la décision, mettant en avant des recommandations techniques et législatives, d'une part à titre préventif et d'autre part à titre curatif et proposant des solutions concrètes de diagnostic ou de remédiations reconnues par les professionnels. Il pointera les situations où le développement de solutions techniques innovantes, plus performantes que l'existant, sont nécessaires. Ce document est destiné à l'égard des pouvoirs publics, des bureaux d'étude, des assureurs et des professionnels dans le domaine de la géothermie très basse énergie.

L'objectif de la réunion est de présenter le contexte et les principaux objectifs du projet REMEDIA-FOR, ainsi que de définir le périmètre du projet, le plan d'action et le planning.

3. PÉRIMÈTRE DU PROJET

Une discussion entre les participants a permis de fixer, par consensus, le cadre et le périmètre du projet :

3.1 Cadre général :

- Gamme de profondeur des forages prise en compte : 0 – 600 m¹;
- Utilisation des forages : usage pour la géothermie
- Types d'échangeurs : sondes géothermiques (SGV) + forages d'eau²
- Se focaliser sur les incidents et non uniquement les accidents
- Confidentialité : les participants au groupe de travail soulèvent ce problème. Il est rappelé que l'objectif est de valoriser les différentes solutions de remédiation et de les valider par le biais du groupe de travail. Les participants jugeront par eux-mêmes leur propre limite de confidentialité.

¹ Au-delà, les techniques et problématiques ne sont plus les mêmes

² Identique durant phase foration, différent une fois l'échangeur équipé

3.2 Différentes phases :

1. Phase amont : connaissance géologie et risque associé : dimensionnement + approche géologique (types de formation) : hors du cadre du projet
2. Phase réalisation du forage + équipement échangeur : incidents, accidents -> diagnostic, remediation
3. Phase exploitation : incidents, accidents -> diagnostic, remediation
4. Impacts sur le long terme : hors du cadre du projet

3.3 Remédiation :

Champ d'étude : forage uniquement. L'impact sur la formation géologique ne sera pas étudié dans le cadre du projet

4. PLAN D'ACTION

4.1 Etat de l'art (recherche bibliographique)

L'objectif est de réaliser dans un premier temps une recherche bibliographique pour recenser les retours d'expérience. Chaque sinistre recensé fera l'objet d'une « fiche de cas » qui sera ensuite passée en revue par le groupe de travail (voir 5.2).

- **Périmètre recherche** : France (= retours expérience participants), Europe, International ;
- **Cas recherchés** : chantiers ou réalisations ayant rencontrés des incidents ou accidents techniques (réalisation ou exploitation), pour lesquels des solutions de remédiation ont été trouvées ou non ;
- **Problématiques ciblées** :
 - Artésianisme
 - Gaz (CO2, méthane,...)
 - Zones de perte (karst)
 - Formations évaporitiques : cas Alsace
 - Comatage
- **Fiche de cas** comprenant :
 - Titre
 - Situation géographique, géologique, hydrogéologique ;
 - Description synthétique (contexte, problème rencontré, solution trouvée, impacts) ;
 - Description entreprise de forage (envergure, technique de foration utilisée) ;
 - Description hydrogéologique ;
 - Incidents ou accidents rencontrés durant phase foration ;
 - Incidents ou accidents rencontrés durant phase post-foration ;
 - Solutions remédiation retenues et impact (efficacité).
 - A compléter svp

• **Répartition des tâches (recherche biblio) :**

a) **Recherche en France :**

Contributeurs pressentis :

- G2h-Conseils (Aquapac, propre retours d'expérience)
- BRGM : sinistres Alsace + Lorraine + Aquapac
- Participants : propres retours d'expérience (par exemple : techniques de remediation sur forages mise en communication aquifères (Poitou Charente - MASSE)

b) **Recherche en Europe et à l'International :**

Contributeurs pressentis :

- LAVIOSA (colmatage, kart, anhydrites tous forages confondus) ;
- G2h-Conseils (liaison EGEC européen)

4.2 Prescriptions et bonnes pratiques (retour expérience, méthodes reconnues) :

Suite à la recherche bibliographique, chaque sinistre recensé fera l'objet d'une « fiche de cas » qui sera ensuite passée en revue par le groupe de travail.

Pour chaque cas traité, il s'agira de décrire :

- Les **problèmes** rencontrés et définition des **impacts** avant remédiation ;
- Les méthodes de **diagnostics** appliquées ou à développer (en cours de foration, après équipement, durant l'exploitation) ;
- Les solutions de **remédiation** appliquées (en cours de foration, après équipement, durant l'exploitation) : par exemple besoin de développer la cimentation et tubage à l'avancement en cours de foration pour éviter la mise en connexion des différentes formations aquifères avec des formations anhydrites (cas Lochwiller) ;
- Le **résultat** sur l'exploitation.

L'objectif sera de réaliser un **tableau récapitulatif** décrivant :

- Les problématiques sources (formations géologiques, le contexte hydrogéologique) ;
- Les impacts associés avant remediation (mise en communication aquifères, potabilité, gonflement, colmater aquifères en domaine karstique...) ;
- Les problématiques liées à la technique de foration ;
- Les problématiques liées à la mise en œuvre de l'échangeur (équipement) ;
- Les problématiques liées à l'exploitation ;
- Les méthodes de diagnostics reconnues (en cours foration, en cours équipement, en cours exploitation) ;
- Les solutions de remediation reconnues (en cours foration, en cours équipement, en cours exploitation) ;
- Les méthodes de diagnostics à développer (R&D) ;
- Les solutions de remediation à développer (R&D).

4.3 Identification de nouvelles méthodes de diagnostic ou de solutions de remédiation (prototypes ou en cours de développement)

- Sonde coaxiale : prototype MASSE (instrumentée cbl) : adaptée pour de plus grandes de profondeurs (géologie, instrumentation) ;
- ...

4.4 Identification des besoins en R&D (diagnostic/remédiation)

- Transversalité des technologies :
 - Forage pétrolier (donner une dimension technique et financière) ;
 - Forage d'eau (retours d'expérience validés)
 - SGV (prospectifs + R&D)
 - Intégrer les connaissances du génie-civil pour travaux d'étanchéité : voir MCCF
- Investigation en cours de foration :
 - Diagnostics de formations évaporitiques
- Investigation a posteriori³ :
 - Diagnostic de l'état de cimentation : développer un outil d'auscultation associé à l'incorporation d'un traceur dans le coulis : questionner des fabricants d'outils de diagraphie (Schlumberger, ...) + voir brevet Schwenk ;
 - Mesure trajectoire forage et boucle de sonde
 - Mesures températures (réactions exothermiques gonflement anhydrite)

5. PLANNING ET SUITE DES OPÉRATIONS

Prochaines réunions (2014) :

- 17 septembre : 10h00
- 14 octobre : 10h00
- 20 novembre : 10h00
- 16 décembre : 10h00

Adresse :

Tour Mirabeau
BRGM – Siège social
39-43, quai André Citroën
75739 Paris cedex 15
01 40 58 89 00

– ³ En Allemagne, pas de méthode développée sur diamètres 26 mm intérieur (32 mm extérieur)

Annexe 3

Compte-rendu de la réunion technique du 05.09.14

**Traitement du cas spécifique de Kirsheim :
« mise en communication d'un aquifère avec des
formations évaporitiques par le biais de sondes
géothermiques verticales »**

MCCF – ACOTEX – BRGM

CG 88/10 PM/MP

COMPTE-RENDU	
Opération : REMEDIA-FOR	Numéro : PDR14DGR13
Objet : Réunion technique – étude de cas : mise en contact d'un aquifère avec des évaporites via des SVG	
Date de la réunion : 5 septembre 2014 Lieu : Paris (Tour Mirabeau) Rédacteur : P. Monnot	
<p>Participants :</p> <p>BRGM :</p> <ul style="list-style-type: none"> - P. Monnot (BRGM) p.monnot@brgm.fr - Anne-Valérie Barras av.barras@brgm.fr <p>Expert d'assurance :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Jean-Marie Weider : jm.weider@acotex.fr <i>Expert construction (ACOTEX)</i> <p>Foreurs :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Julien Fabiano (MCCF) julien.fabiano@mccf.fr - Nicolas Utter nicolas.utter@soletanche-bachy.com 	
<p>Diffusion pour information :</p> <p>Sanjuan Bernard (BRGM) : b.sanjuan@brgm.fr Dominique Midot (BRGM) : d.midot@brgm.fr Norbert Bommensatt (ADEME) : norbert.bommensatt@ademe.fr Philippe Laplaige (ADEME) : philippe.laplaige@ademe.fr</p>	

ORDRE DU JOUR
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Contexte ▪ Objectifs ▪ Périmètre du projet ▪ Plan d'action ▪ Planning et suites des opérations

12/09/2014

1

1. CONTEXTE

Dans le cadre d'un projet de recherche intitulé REMEDIA-FOR, l'objectif de faire un état de l'art sur les retours d'expérience en matière de forage géothermiques ayant connu des difficultés de réalisation ou d'exploitation.

2. OBJECTIFS

L'objectif est de traiter le cas d'une mise en contact d'un aquifère superficiel avec des roches évaporitiques (alternance marnes et anhydrites)

3. PRÉSENTATION DU CAS

Voir document powerpoint annexé.

Profondeur forée non contrôlable. Recommandation : pour contrôler profondeur effective forée : mesurer dans chaque sonde le volume d'eau glycolée.

Toutes les investigations sur les sondes restent à mener.

Le coulis est visible en surface
Caractéristique : ciment – bentonite - sable
Tubes 32 mm (25 mm intérieur)

Géologie : pendage des couches de 20° puis horizontale et failles vers l'ouest (donc pas en direction du soubassement du bâtiment).

Hydrogéologie : nappe superficielle dans les alluvions profondeur vers 5 m. Pas d'arrivées d'eau importantes dans le forage (investigations au micromoulinet rendues impossibles)

Pour mémoire, et concernant les outils MCCF :
MCCF : forage sonore haute fréquence (passe dans tous les types de terrains sans changer d'outil), foration avec tubage

Pour traiter un problème local en cours de forage de perte ou d'éboulement (profondeur voulue non atteinte), MCCF injecte du coulis à l'extérieur du tubage (traitement des terrains) et refore le lendemain à travers le coulis.

INVESTIGATIONS :

Reconnaissance géologique

Réalisation d'un forage carotté

Niveaux évaporitiques des carottes d'argiles rubanées analysées en laboratoire pour déterminer s'il y a des recristallisations d'anhydrite en gypse..

Mise en place de 3 extensomètres dans la formation rubanée : ils se déplacent en même temps.

Mesures de températures pour déterminer les zones de transformation d'anhydrites en gypses (réactions exothermiques) dans le forage carotté. Anomalie de température à 70 m

Absence de niveaux aquifères en profondeur

Le forage de reconnaissance n'a pas été réalisé au droit de l'anomalie géophysique C2 ; il avait pour objectif de déterminer la nature des horizons R1 et R2 (Cf. profils géophysiques)

Investigations sur SGV :

Proposition : faire des piézomètres à proximité des sondes pour mesurer la pression de la nappe superficielle au droit des SGV pour voir s'il y a un cône de dépression qui démontrerait directement une infiltration de la nappe à travers le coulis

Ce qui pourrait être envisagé :

- Pour un déceler la présence d'un éventuel aquifère profond, réalisation de piézomètres profonds avec étanchéité au niveau de l'aquifère supérieur dans un rayon de 25 m des sondes
Trouver les trajectoires des sondes
Traitement des images satellites par interférométrie radar rétroactives sur 10 ans pour voir si les mouvements dataient avant le forage (disponibilité des clichés à lever).

DIAGNOSTIC :

Le gonflement (argile + évaporitiques) est lié à l'eau. D'où vient l'eau : déversement de la nappe superficielle à travers ou par défaut d'étanchéité périphérique du coulis, éventuellement par le biais d'une faille recoupée par le forage (déviation), avec réactivation d'un système hydraulique (éventuellement décolmatage de failles associée). Le deuxième cas est plus difficile à remédier.

SOLUTIONS DE REMÉDIATION SELON LES HYPOTHÈSES DE CAUSES RETENUES :

- **L'eau vient depuis le déversement de la nappe superficielle :**
Tuer le forage en réalisant des forages d'injection dans le pourtour dans un rayon de 5 à 10 m. Objectif : reconstituer la couche de protection au niveau des argiles déstructurées entre 10 et 35 m environ. Introduction d'un tubage à manchettes à travers lesquels passe le coulis d'injection. Les manchettes s'ouvrent dans un sens et se referment dans l'autre (clapet anti-retour). Mise en place dans un coulis frais (coulis de gaine). Mise en place d'un obturateur. Les manchettes restent scellées dans le forage. Les indicateurs de bonne injection : pression injection + volume indicatif. Caractéristiques mécaniques du coulis injection : qq mPa. Première passe : injection coulis ciment bentonite pour remplir les vides important. Deuxième passe qui peut se répéter selon le degré de remplissage (pour affiner le remplissage) : ciment moulu ou gel de silice (plus fluide) pour colmater les vides de petites ouvertures. Troisième phase dite de serrage : injection mélange phase 1 pour voir le résultat (normalement, la pression doit augmenter de suite ne permettant pas d'injecter le mélange). Tolérance sur l'effet de remontée des terrains sous l'effet de la pression d'injection : env. 3 cm (l'injection peut être contrôlée par laser qui vérifie tout soulèvement de terrain).
Possibilité de contrôler le résultat d'injection : graphiques sous la forme de camemberts qui permettent de visualiser le volume injecté et la pression d'injection. Les anomalies d'injection sont décelées dans le cas où la pression est faible et le volume est faible.

Prix du m3 injecté (qui intègre tout) et évaluation sommaire à communiquer (suivant une hypothèse d'injection sur 35 m, toute hauteur ou limitée en hauteur)

Remarque : on peut demander les illustrations – figures du guide pour le projet REMEDIAFOR (demander à Nicolas Utter nicolas.utter@soletanche-bachy.com)

- **L'eau vient depuis le fond (ceci n'est pas l'hypothèse retenue dans le cas présenté):**

La solution serait de tuer le forage, en réalisant une multitude de forages autour du forage à traiter dans le but de le recouper et de l'étancher.

Pour le diagnostiquer :

Faire un piézomètre dans une enveloppe de 25 m autour des sondes pour vérifier à 100 m de profondeur qu'il n'y a pas de nappe captive qui alimente les terrains évaporitiques. Objectif : écarter cette hypothèse.

Réalisation de campagne géophysique (sismique et électrique) pour déceler les changements de géologies et les failles dans un contexte très faillé.

4. PLANNING ET SUITE DES OPÉRATIONS

Prochaines réunions (2014) :

- 17 septembre : 10h00
- 14 octobre : 10h00
- 20 novembre : 10h00
- 16 décembre : 10h00

Adresse :

Tour Mirabeau
BRGM – Siège social
39-43, quai André Citroën
75739 Paris cedex 15
01 40 58 89 00

Annexe 4

Compte-rendu de la réunion de comité de suivi du 17.09.14

Présentation des résultats du premier cas traité :

**« Mise en communication d'un aquifère avec des
formations évaporitiques par le biais de sondes
géothermiques verticales »**

Méthodes d'investigation et de remédiation proposées

(MCCF – ACOTEX – BRGM)

CG 88/10 PM/MP

COMPTE-RENDU	
Opération : REMEDIA-FOR	Numéro : PDR14DGR13
Objet : Réunion technique – étude de cas : mise en contact d'un aquifère avec des évaporites via des SVG	
Date de la réunion : 5 septembre 2014 Lieu : Paris (Tour Mirabeau) Rédacteur : P. Monnot	
<p>Participants :</p> <p>BRGM :</p> <ul style="list-style-type: none"> - P. Monnot (BRGM) p.monnot@brgm.fr - Anne-Valérie Barras av.barras@brgm.fr <p>Expert d'assurance :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Jean-Marie Weider : jm.weider@acotex.fr <i>Expert construction (ACOTEX)</i> <p>Foreurs :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Julien Fabiano (MCCF) julien.fabiano@mccf.fr - Nicolas Utter nicolas.utter@soletanche-bachy.com 	
<p>Diffusion pour information :</p> <p>Sanjuan Bernard (BRGM) : b.sanjuan@brgm.fr Dominique Midot (BRGM) : d.midot@brgm.fr Norbert Bommensatt (ADEME) : norbert.bommensatt@ademe.fr Philippe Laplaige (ADEME) : philippe.laplaige@ademe.fr</p>	

ORDRE DU JOUR
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Contexte ▪ Objectifs ▪ Périmètre du projet ▪ Plan d'action ▪ Planning et suites des opérations

12/09/2014

1

1. CONTEXTE

Dans le cadre d'un projet de recherche intitulé REMEDIA-FOR, l'objectif de faire un état de l'art sur les retours d'expérience en matière de forage géothermiques ayant connu des difficultés de réalisation ou d'exploitation.

2. OBJECTIFS

L'objectif est de traiter le cas d'une mise en contact d'un aquifère superficiel avec des roches évaporitiques (alternance marnes et anhydrites)

3. PRÉSENTATION DU CAS

Voir document powerpoint annexé.

Profondeur forée non contrôlable. Recommandation : pour contrôler profondeur effective forée : mesurer dans chaque sonde le volume d'eau glycolée.

Toutes les investigations sur les sondes restent à mener.

Le coulis est visible en surface
Caractéristique : ciment – bentonite - sable
Tubes 32 mm (25 mm intérieur)

Géologie : pendage des couches de 20° puis horizontale et failles vers l'ouest (donc pas en direction du soubassement du bâtiment).

Hydrogéologie : nappe superficielle dans les alluvions profondeur vers 5 m. Pas d'arrivées d'eau importantes dans le forage (investigations au micromoulinet rendues impossibles)

Pour mémoire, et concernant les outils MCCF :
MCCF : forage sonique haute fréquence (passe dans tous les types de terrains sans changer d'outil), foration avec tubage

Pour traiter un problème local en cours de forage de perte ou d'éboulement (profondeur voulue non atteinte), MCCF injecte du coulis à l'extérieur du tubage (traitement des terrains) et refore le lendemain à travers le coulis.

INVESTIGATIONS :

Reconnaissance géologique

Réalisation d'un forage carotté

Niveaux évaporitiques des carottes d'argiles rubanées analysées en laboratoire pour déterminer s'il y a des recristallisations d'anhydrite en gypse..

Mise en place de 3 extensomètres dans la formation rubanée : ils se déplacent en même temps.

Mesures de températures pour déterminer les zones de transformation d'anhydrites en gypses (réactions exothermiques) dans le forage carotté. Anomalie de température à 70 m

Absence de niveaux aquifères en profondeur

Le forage de reconnaissance n'a pas été réalisé au droit de l'anomalie géophysique C2 ; il avait pour objectif de déterminer la nature des horizons R1 et R2 (Cf. profils géophysiques)

Investigations sur SGV :

Proposition : faire des piézomètres à proximité des sondes pour mesurer la pression de la nappe superficielle au droit des SGV pour voir s'il y a un cône de dépression qui démontrerait directement une infiltration de la nappe à travers le coulis

Ce qui pourrait être envisagé :

- Pour un déceler la présence d'un éventuel aquifère profond, réalisation de piézomètres profonds avec étanchéité au niveau de l'aquifère supérieur dans un rayon de 25 m des sondes
Trouver les trajectoires des sondes
Traitement des images satellites par interférométrie radar rétroactives sur 10 ans pour voir si les mouvements dataient avant le forage (disponibilité des clichés à lever).

DIAGNOSTIC :

Le gonflement (argile + évaporitiques) est lié à l'eau. D'où vient l'eau : déversement de la nappe superficielle à travers ou par défaut d'étanchéité périphérique du coulis, éventuellement par le biais d'une faille recoupée par le forage (déviation), avec réactivation d'un système hydraulique (éventuellement décolmatage de failles associée). Le deuxième cas est plus difficile à remédier.

SOLUTIONS DE REMÉDIATION SELON LES HYPOTHÈSES DE CAUSES RETENUES :

- **L'eau vient depuis le déversement de la nappe superficielle :**
Tuer le forage en réalisant des forages d'injection dans le pourtour dans un rayon de 5 à 10 m. Objectif : reconstituer la couche de protection au niveau des argiles déstructurées entre 10 et 35 m environ. Introduction d'un tubage à manchettes à travers lesquels passe le coulis d'injection. Les manchettes s'ouvrent dans un sens et se referment dans l'autre (clapet anti-retour). Mise en place dans un coulis frais (coulis de gaine). Mise en place d'un obturateur. Les manchettes restent scellées dans le forage. Les indicateurs de bonne injection : pression injection + volume indicatif. Caractéristiques mécaniques du coulis injection : qq mPa. Première passe : injection coulis ciment bentonite pour remplir les vides important. Deuxième passe qui peut se répéter selon le degré de remplissage (pour affiner le remplissage) : ciment moulu ou gel de silice (plus fluide) pour colmater les vides de petites ouvertures. Troisième phase dite de serrage : injection mélange phase 1 pour voir le résultat (normalement, la pression doit augmenter de suite ne permettant pas d'injecter le mélange). Tolérance sur l'effet de remontée des terrains sous l'effet de la pression d'injection : env. 3 cm (l'injection peut être contrôlée par laser qui vérifie tout soulèvement de terrain).
Possibilité de contrôler le résultat d'injection : graphiques sous la forme de camemberts qui permettent de visualiser le volume injecté et la pression d'injection. Les anomalies d'injection sont décelées dans le cas où la pression est faible et le volume est faible.

Prix du m3 injecté (qui intègre tout) et évaluation sommaire à communiquer (suivant une hypothèse d'injection sur 35 m, toute hauteur ou limitée en hauteur)

Remarque : on peut demander les illustrations – figures du guide pour le projet REMEDIAFOR (demander à Nicolas Utter nicolas.utter@soletanche-bachy.com)

- **L'eau vient depuis le fond (ceci n'est pas l'hypothèse retenue dans le cas présenté):**

La solution serait de tuer le forage, en réalisant une multitude de forages autour du forage à traiter dans le but de le recouper et de l'étancher.

Pour le diagnostiquer :

Faire un piézomètre dans une enveloppe de 25 m autour des sondes pour vérifier à 100 m de profondeur qu'il n'y a pas de nappe captive qui alimente les terrains évaporitiques. Objectif : écarter cette hypothèse.

Réalisation de campagne géophysique (sismique et électrique) pour déceler les changements de géologies et les failles dans un contexte très faillé.

4. PLANNING ET SUITE DES OPÉRATIONS

Prochaines réunions (2014) :

- 17 septembre : 10h00
- 14 octobre : 10h00
- 20 novembre : 10h00
- 16 décembre : 10h00

Adresse :

Tour Mirabeau
BRGM – Siège social
39-43, quai André Citroën
75739 Paris cedex 15
01 40 58 89 00

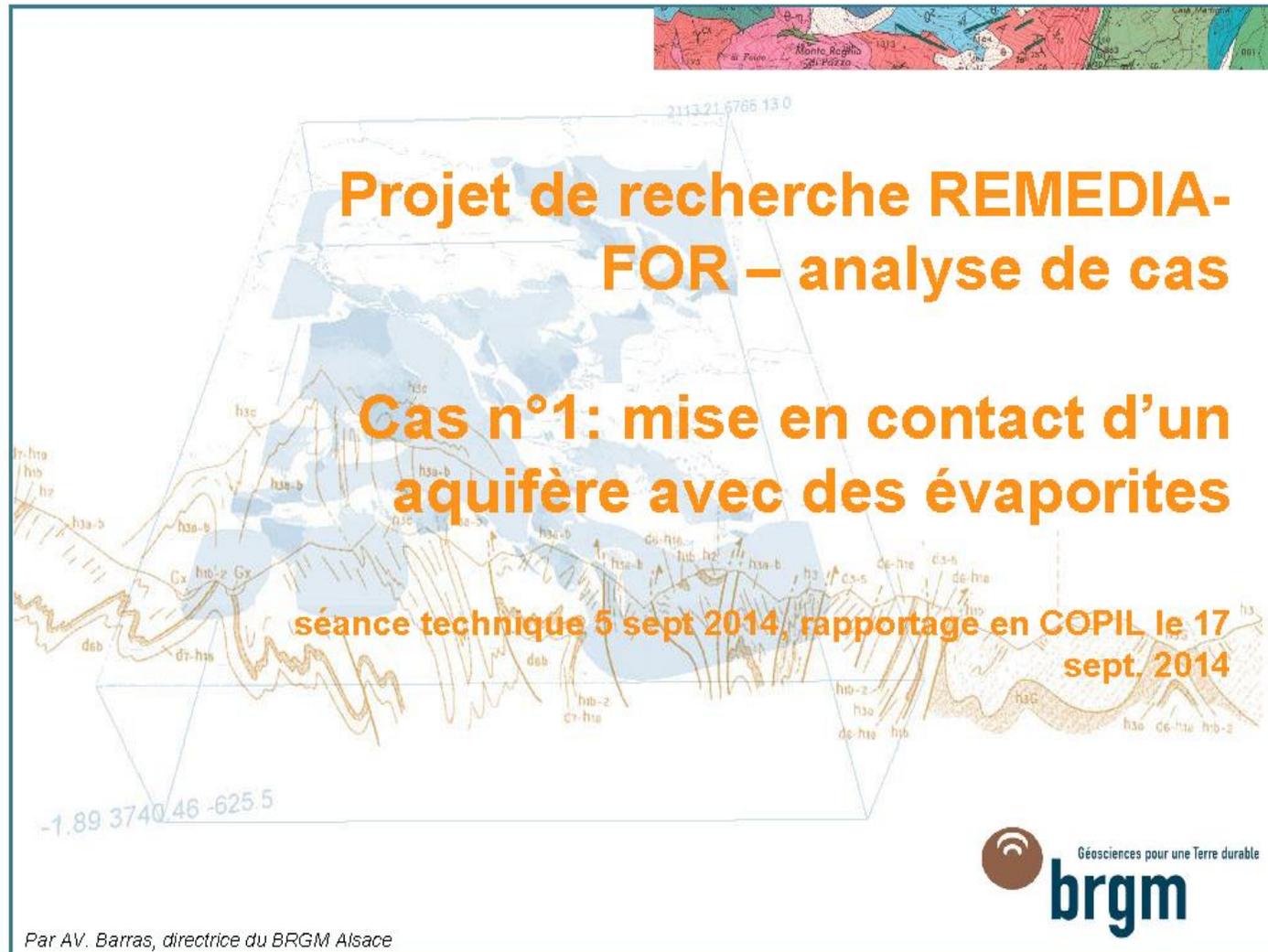
Annexe 5

**Présentation du premier cas traité lors de la
réunion REMEDIA-FOR du 17.09.14 :**

**« Mise en communication d'un aquifère avec des
formations évaporitiques par le biais de sondes
géothermiques verticales »**

**Méthodes d'investigation et de remédiation
proposées**

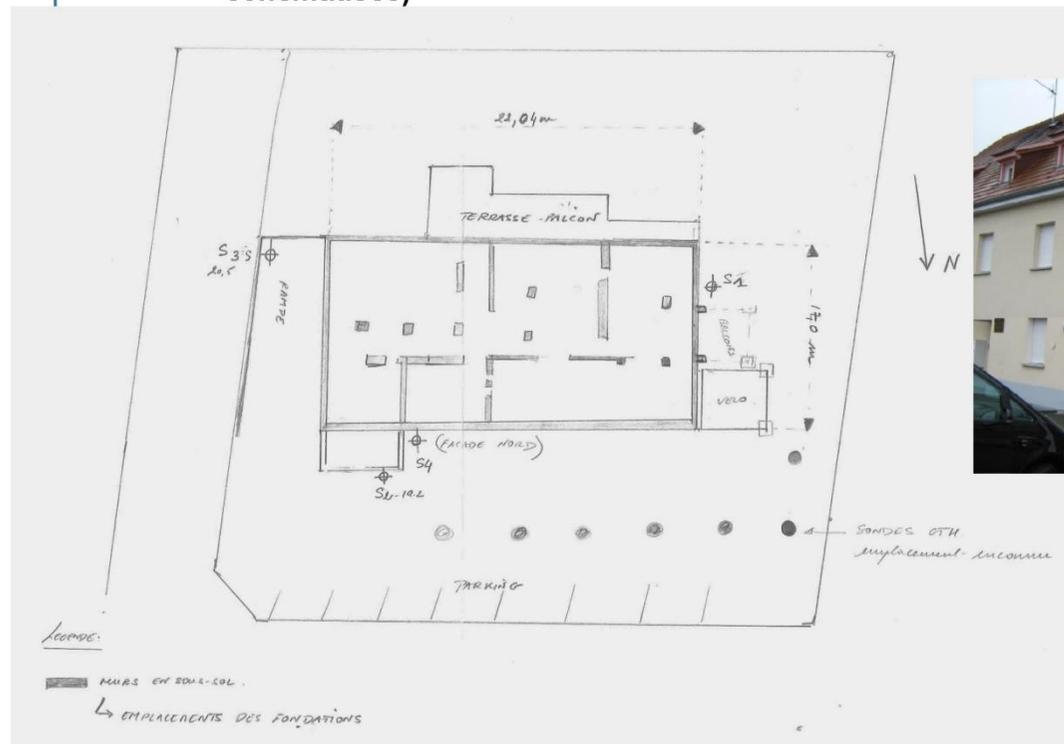
(MCCF – ACOTEX – BRGM)



05/09/2014

Présentation

- 1 bâtiment de 2 étages sur sous-sol (av local à vélo) et rampe d'accès au sous-sol (cf plan ci-dessous et photo de la facade nord avec garage à vélo),
- 7 sondes géothermiques de 100 m (emplacement non connu – uniquement schématisée)

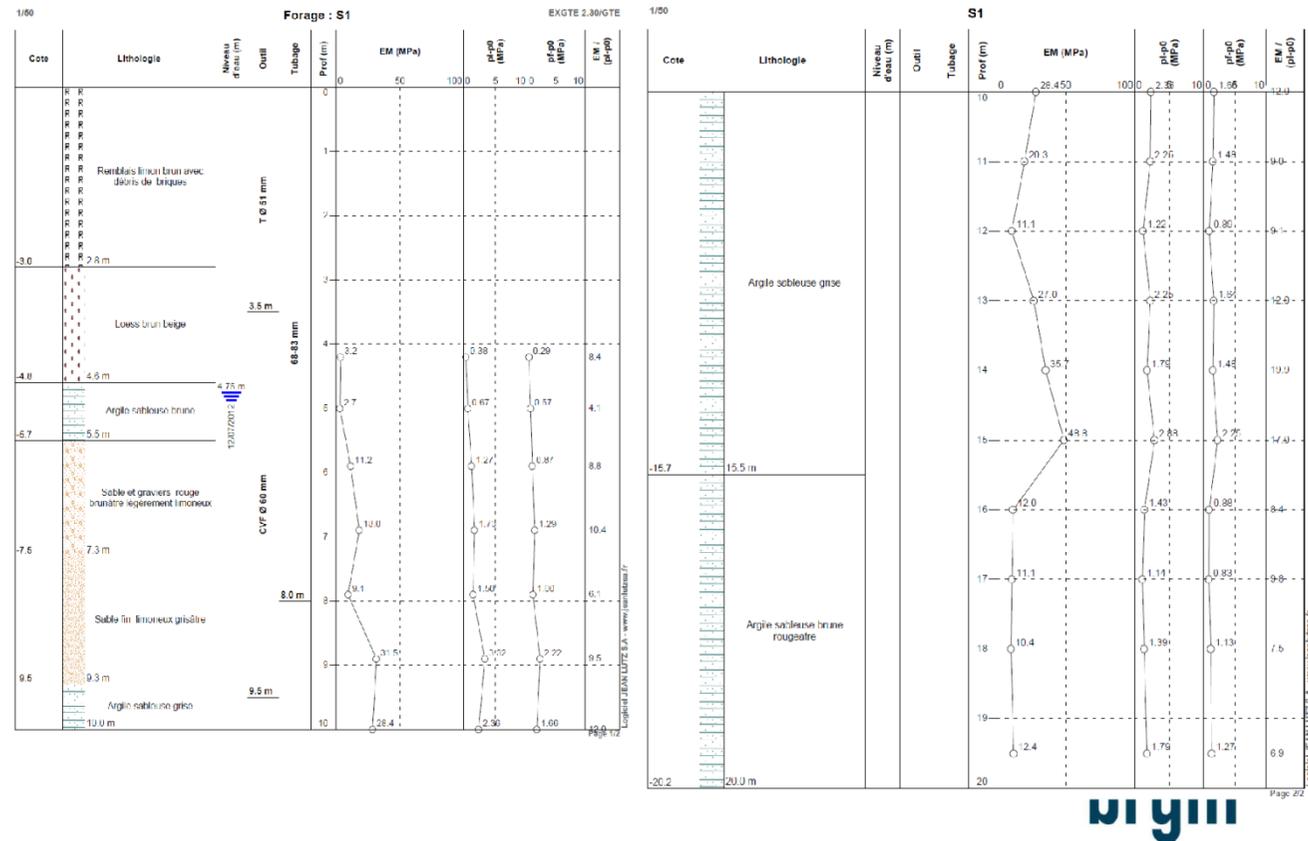


Investigations réalisées

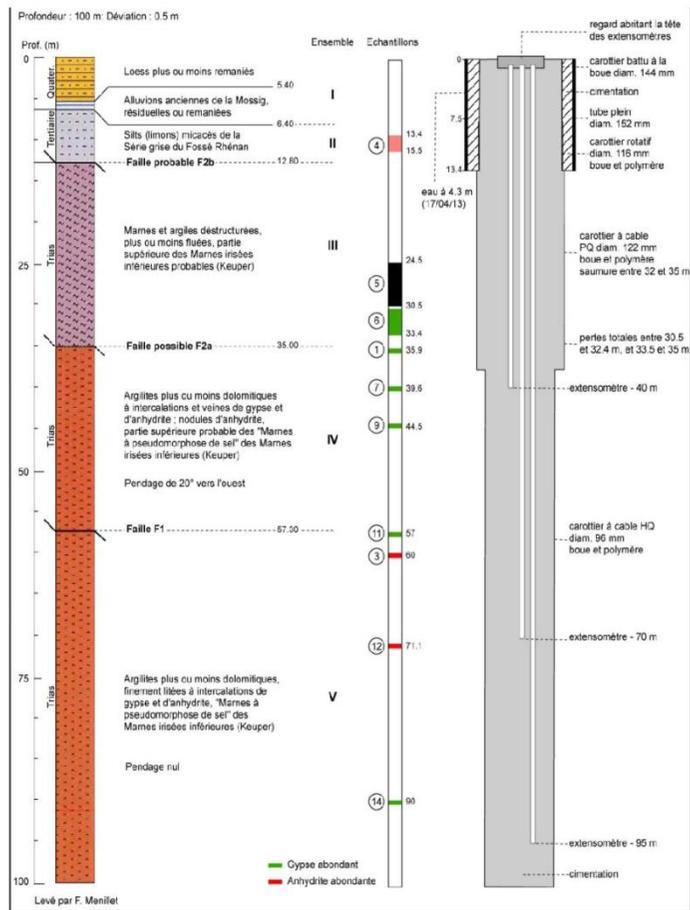
- Levés géométriques : qui montrent des mouvements ascendants du bâtiment et de la parcelle (phénomène de gonflement)
- 4 forages destructifs jusqu'à 20 m
- 1 forage carotté de 100 m (face sud)
- Investigations géophysiques (électrique et sismique)



■ Forage de 20 m (exemple du S1)



■ Forage de 100 m



Argiles déstructurées de 12 à 35 m



A 35 m : argilite évaporitiques
A 35 m : argilite évaporitiques



Jusqu'au fond du forage (100 m)

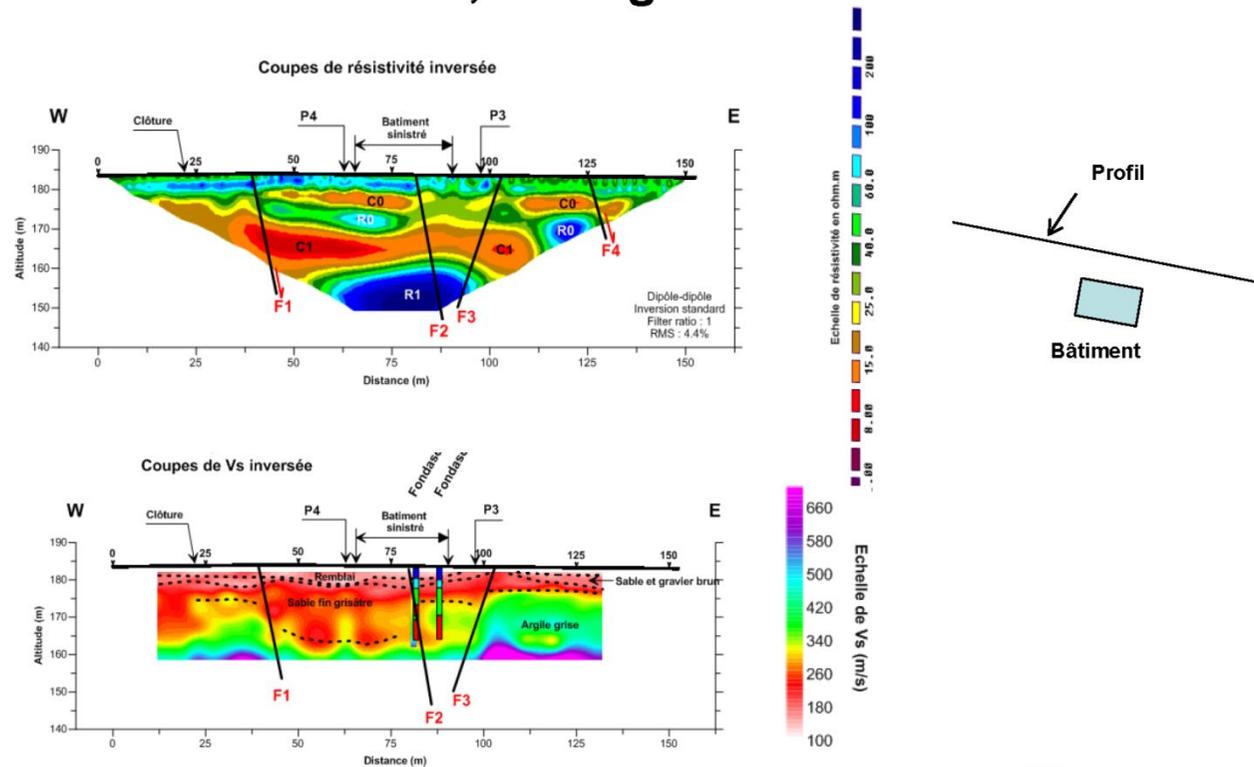
■ Forage de 100 m

- Pertes et mauvaises tenues des terrains - Passe (3 m) : de 24.50 à 30.50 : perte 50 %
- De 30.50 à 32.40 m : perte de 100 % (tiges de forage descendaient sous leur propre poids)
- Correspondrait à la zone de faible vitesse en géophysique sismique

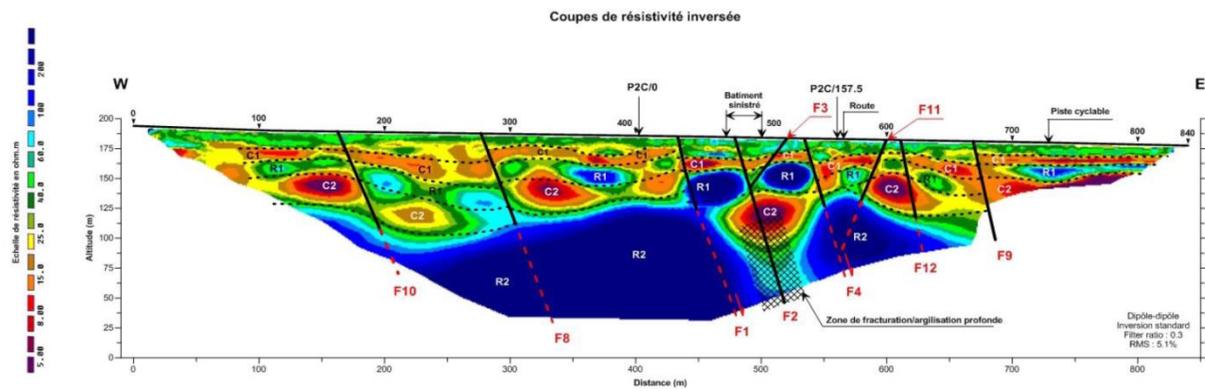


De 13.50 à 18.50 : 40 % de récupération

■ Investigations géophysiques à faible prof. E-W, devant le bâtiment, le long des sondes



■ Investigations géophysiques à grande prof. E-W, derrière le bâtiment



Les sondes

- 7 forages avec un tube de diamètre 150mm, ainsi qu'avec une tige de diamètre 110mm(tiges/tubes de longueur 2m)
- 4 tubes U de diamètre 32 mm extérieur positionnés dans le trou foré et remplissage par un coulis composé de ciment-sable-bentonite
- Pas d'eau sous pression



© Eco-Alternative
Sonde géothermique, constituée de tubes polyéthylène,
destinée à être descendue dans un forage vertical.

- Investigations sur les sondes difficiles à mener dans un diamètre extérieure de 32 mm
- Contrôle d'une des 7 sondes (proche local vélo) : bloquée à 35 m

Problème posé

- Etanchéité des sondes remise en question
- Mise en contact de l'eau contenue dans un aquifère superficiel (vers 4 à 7 m) avec les couches évaporitiques (vers 30 m jusqu'à 100m) à l'origine de mouvements de gonflement des terrains à traiter
- Objectif : neutraliser les 7 sondes
- Inconnues du sous-sol :
 - Aquifère superficiel aux dimensions mal connues ;
 - Pas d'aquifère profond en charge a priori ;
 - Tenues des terrains entre 10 et 35 médiocres
 - Secteur en zone faillée (passage d'une faille régionale majeure et autres failles combinées) : géométrie des failles inconnues dans le secteur des sondes
 - Situation et état des sondes, déviation des sondes

Problème posé

- Quelles sont les méthodes de génie civil envisageables ?
- Quelles inconnues faut-il lever ?

Annexe 6

Compte-rendu de la réunion de comité du suivi du 14.10.14

Discussion du cas spécifique « Storengy » proposé par l'entreprise LAVIOSA - MPC

CG 88/10 PM/MP

COMPTE-RENDU	
Opération : REMEDIA-FOR	Numéro : PDR14DGR13
Objet : Réunion d'avancement	
Date de la réunion : 14 octobre 2014 Rédacteur : P. Monnot	Lieu : Paris (Tour Mirabeau)
<p>Participants :</p> <p>Ministère :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Benoît Spittler Benoit.Spittler@developpement-durable.gouv.fr : <i>Chargé de mission "géothermie et forages", MEDDE - MRP/ DGALN/DEB/GR</i> <p>BRGM :</p> <ul style="list-style-type: none"> - P. Monnot (BRGM) p.monnot@brgm.fr <p>Assureurs :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Jean-Marc Weider : jm.weider@acotex.fr <i>Expert Assureur (ACOTEX)</i> <p>Foreurs :</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Bernard Sustrac (LAVIOSA – MPC) bernard.sustrac@mpcfr.com 	
<p>Excusés :</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Anne-Valérie Barras av.barras@brgm.fr ✓ Serge Resnikow (LAVIOSA – MPC) serge.resnikow@mpcfr.com ✓ Julien Fabiano (MCCF) julien.fabiano@mccf.fr ✓ Ludovic Reynaert (MASSE) forages.masse@wanadoo.fr ✓ Eric Gerardin (COFOR) eric.gerardin@cofor.com ✓ Olivier Grière (G2h-conseils) g2hconseils@sfr.fr ✓ Alexis Gutierrez a.gutierrez@brgm.fr ✓ JP Cuny jpcuny@wanadoo.fr ✓ Régis Eme (Mannfor) eme@mannfor.eu ✓ Sebastien Vauthrin sebastien.vauthrin@vauthrin-forages.fr ✓ Etienne Gatelier (SADE) etienne.gatelier@sade-cgth.fr ✓ Joel Sillard (SADE) sillard.joel@sade-cgth.fr 	
<p>Diffusion pour information :</p> <p>JY Hervé (Forage assistance) forage.assistance@gmail.com Sanjuan Bernard (BRGM) : b.sanjuan@brgm.fr Dominique Midot (BRGM) : d.midot@brgm.fr Eric GARROUSTET (SGEG) : garroustet@sfeg-forages.fr Christian Boissavy (AFPG) : christian.boissavy@orange.fr Norbert Bommensatt (ADEME) : norbert.bommensatt@ademe.fr Philippe Laplaige (ADEME) : philippe.laplaige@ademe.fr</p>	

ORDRE DU JOUR
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Contexte ▪ Confirmation du nouveau plan d'action ▪ Propositions et discussion de cas spécifiques ▪ Planning et suites des opérations

Actions	Responsable	Délai
Contacteur Augsburg (problèmes gel – dégel)	P. Monnot	
Proposer au BRGM les cas spécifiques à traiter	Mannfor Cofor G2H-Conseils	Deadline : 20 novembre 2014
Recevoir traitement du cas spécifique sur fermeture de forages profonds – gaz, artésianisme	Laviosa	Deadline : 20 novembre 2014
Recevoir traitement du cas spécifique sur problèmes de corrosion tubage – casing	Masse	Deadline : 20 novembre 2014
Techniques de remédiation sur SGV en Allemagne. Reprendre contact avec M. Wansen (proposer de se réunir soit en Allemagne, soit en France)	AV. Barras	
Réaliser une fiche type de description et traitement des cas	BRGM	
Prochaine réunion de groupe de travail		20 novembre 2014

1. CONTEXTE (RAPPEL)

Dans le cadre d'un projet de recherche intitulé REMEDIA-FOR, le BRGM regroupe un consortium de foreurs et bureaux d'études, assureurs, pouvoirs publics et experts afin de faire un état de l'art sur des problématiques ciblées dans le domaine du forage géothermique.

L'objectif est de réaliser un document qui fasse état des solutions de remédiation maîtrisées par les foreurs en France ou à l'étranger sur des cas spécifiques de forages géothermiques ayant connus des problèmes, mettant en avant des recommandations techniques et législatives, d'une part à titre préventif et d'autre part à titre curatif et proposant des solutions concrètes d'investigation ou de remédiations reconnues par les professionnels. Il pointera les situations où le développement de solutions techniques innovantes, plus performantes que l'existant, sont nécessaires.

2. OBJECTIFS (RAPPEL)

L'objectif est de traiter des cas concrets d'ouvrages spécifiques ciblés en fonctions de leur difficultés de réalisation, de remédiation et d'impact potentiel sur leur environnement, afin de déterminer des moyens d'investigation avant, pendant et après foration, d'établir un diagnostic de la problématique et de trouver des moyens techniques de remédiation.

Il ne s'agit pas de faire un état de l'art spécifique sur toutes les problématiques rencontrées dans le cadre du forage, mais de pointer des cas qui ont un impact important sur l'environnement et/ou sur le bâti, ou des cas qui nécessitent un développement de moyens d'investigation et de remédiation (R&D).

3. PÉRIMÈTRE DU PROJET (RAPPEL)

- On ne se limite pas en profondeur. L'objectif est de s'intéresser aux sinistres et solutions de remédiation qui peuvent s'adapter aux problématiques de la géothermie tbe (transversalité) ;
- ~~Gamme de profondeur des forages prise en compte : 0 – 600 m¹;~~
- Utilisation des forages : usage pour la géothermie
- Types d'échangeurs : sondes géothermiques (SGV) + forages d'eau²
- Remédiation : le champ d'étude des méthodes de remédiation se limitera au forage uniquement.
- Sinistre (dysfonctionnement) : se focaliser sur les incidents et non uniquement les accidents (il n'y a pas forcément de réparation).

¹ Au-delà, les techniques et problématiques ne sont plus les mêmes

² Identique durant phase foration, différent une fois l'échangeur équipé

4. PLAN D'ACTION (RAPPEL)

Le BRGM propose au groupe de travail le nouveau plan d'action suivant :

1. Sélection des cas spécifiques

Le BRGM demande aux foreurs ou BE de sélectionner, à travers leur propre retour d'expérience, un ou plusieurs cas d'ouvrages problématiques à travers lesquels ils ont été amenés à intervenir en termes d'investigation, de diagnostic ou de remédiation. Les foreurs peuvent également choisir un cas trouvé à travers une recherche bibliographique (France ou étranger).

2. Traitement des cas spécifiques en petit comité

Les foreurs/BE proposent au BRGM le/ les cas à traiter. Le BRGM définira ensuite une enveloppe financière et organisera avec le foreur/BE une réunion de travail en petit comité afin de traiter dans le détail le cas.

L'objectif sera de remplir au terme de la réunion une fiche descriptive du cas traité (le modèle sera réalisé par le BRGM) comprenant les éléments suivants :

- Titre ;
- Situation géographique, géologique, hydrogéologique ;
- Description de la **problématique** (problème rencontré, incidents ou accidents rencontrés durant /post phase foration, problématiques liées à l'exploitation, impacts avant remédiation) ;
- Description entreprise de forage (envergure, technique de foration utilisée) ;
- Méthodes d'**investigation** appliquées ou à développer
- Diagnostic retenu (selon résultats investigation) ;
- Solutions **remédiation** appliquées (en cours de foration, après équipement, durant l'exploitation) ;
- Solutions remédiation alternatives ou à développer en R&D (recherche biblio) ;
- **Impact** après remédiation (efficacité).

3. Validation des cas en groupe de travail

Les cas traités en petit comité seront ensuite présentés devant le groupe de travail collégial qui regroupera l'ensemble des intervenants du projet REMEDIA-FOR, afin de valider les solutions d'investigation ou de remédiation.

Note : à titre d'exemple, le cas « de la mise en contact d'un aquifère avec des formations évaporitiques » a été traité en petit comité (MCCF, ACOTEX, BRGM) le 5 septembre 2014 et présenté lors de la présente réunion d'avancement. Il s'agit du premier cas spécifique traité. Une fiche de cas sera prochainement envoyée aux membres du groupe de travail.

4. Tableau récapitulatif des cas traités

A partir des fiches de cas, un **tableau récapitulatif** sera réalisé.

5. CAS SPECIFIQUES A TRAITER (NOUVEAU)

Sondes géothermiques verticales :

- ✓ **Cas proposé en cours de traitement**
 - MCCF : mise en communication d'un aquifère avec des formations évaporitiques
- ✓ **Cas à développer :**
 - MANNFOR : Artésianisme – cimentation - Karst (SGV)
 - AUGSBURGER : gel – dégel (SGV) : prendre contact avec Augsburg : comment le diagnostiquer (si aucunes anomalies visibles en surface), comment le réparer
 - Techniques de remédiation sur SGV en Allemagne. Bömlingen (techniques de remédiation - éclatement tubes – injection. M. Wansen (directeur LGRB)

Forages d'eau et autre :

- ✓ **Cas proposé en cours de traitement**
 - MASSE : problèmes de corrosion tubage – casing (voir ci-dessous)
 - LAVIOSA : fermeture de forages profonds – gaz, artésianisme (voir ci-dessous)
- ✓ **Cas à développer :**
 - G2H-Conseils : remontée de nappe ou le contraire (forages géotechniques) :
 - COFOR : ...

6. DISCUSSION DES CAS SPECIFIQUES (NOUVEAU)

Problèmes de corrosion tubage – casing (forage eau) : MASSE

- ✓ Qualité des aciers
- ✓ Réalisation des soudures
- ✓ Problèmes de piles : étanchéité – corrosion
- ✓ Cimentation
- ✓ A préciser : est-ce que l'on se situe au niveau des préconisations ou de la remédiation (développer un cas de réparation réellement traité)

Fermeture de forages profonds – gaz, artésianisme (LAVIOSA)

Entreprise LAVIOSA – MPC spécialisée en production de bentonite pour développer des produits d'étanchéité (venues d'eau dans tunnels, forage).
Développement de billes d'argile confinées (comprimées) : reconstitution de formations géologiques étanches.

Domaine d'application : pour refermer des puits (surpression gaz, artésianisme).
Utilisation de billes d'argiles confinées pour refermer une zone défailante de puits (abandon).

1. **Cas Storengi** (stockage de gaz avec vannes d'étanchéité défailantes à 800 m, fuite à isoler). Dans ce cas, il s'agit d'abandon. Procédure : injection de billes d'argiles (smectite du Wyoming), avec une garantie sur la qualité de la bille d'argile dans le temps et sur le volume utilisé. La pression de confinement est de l'ordre de 18 mpa dans un volume fermé (densité de 2.4 – 2.7).

Les billes sont enrobées avec une gomme végétale (alimentaire), pour retarder la prise (hydratation). On peut également les intégrer dans des chaussettes textiles pour les descendre ou les guider dans l'espace annulaire. Retardement de prise de 40 min environ.

Contrôle de puits pour déterminer si les billes sont à la bonne profondeur.
Remarque : les billes d'argile ne gonflent pas en présence d'eau salée. Dans ce cas, les billes sont descendues dans la boue de forage sursaturée en gypse, puis « lavées » à l'eau pour qu'elles gonflent.

2. **Utilisation alternative – technique à huile** : emprisonnement de billes dans des huiles végétales à base de Colza (smectite = bentonite sodique). Objectif : fluidifiant pour injecter dans des forages déviés. Dans les zones faillées, possibilité pousser l'huile (idem développement). Dans ce cas, les billes ne sont pas enrobées. Les billes sont moins confinées que dans le cas des billes enrobées.
3. **Utilisation en domaine pétrolier pour fermer des petites fractures** (étanchéité non parfaite pour continuer à forer) hydrogonflant (polymères) enveloppées par du caoutchouc.

7. IDENTIFICATION DE NOUVELLES MÉTHODES D'INVESTIGATION OU DE SOLUTIONS DE REMEDIATION (RAPPEL)

- Sonde coaxiale : prototype MASSE (instrumentée cbl) : adaptée pour de plus grandes de profondeurs (géologie, instrumentation) ;
- Intégrer les connaissances du génie-civil pour travaux d'étanchéité : voir MCCF
- Diagnostics de formations évaporitiques
- Diagnostic de l'état de cimentation : développer un outil d'auscultation associé à l'incorporation d'un traceur dans le coulis : questionner des fabricants d'outils de diagraphie (Schlumberger, ...) + voir brevet Schwenk ;
- Mesure trajectoire forage et boucle de sonde
- Mesures températures (réactions exothermiques gonflement anhydrite)

8. PLANNING ET SUITE DES OPÉRATIONS

Prochaines réunions (2014) :

- 20 novembre : 9h30
- 16 décembre : 9h30

Adresse :

Tour Mirabeau
BRGM – Siège social
39-43, quai André Citroën
75739 Paris cedex 15
01 40 58 89 0

Annexe 7

Compte-rendu de la réunion du comité de suivi du 20.11.14

Discussion de nouveaux instruments de mesure à développer

CG 88/10 PM/MP

COMPTE-RENDU	
Opération : REMEDIA-FOR	Numéro : PDR14DGR13
Objet : Réunion d'avancement	
Date de la réunion : 20 novembre 2014 Lieu : Paris (Tour Mirabeau) Rédacteur : P. Monnot	
<p>Participants :</p> <p>BRGM :</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ P. Monnot (BRGM) p.monnot@brgm.fr ✓ Anne-Valérie Barras av.barras@brgm.fr <p>Assureurs :</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Jean-Marc Weider : jm.weider@acotex.fr <i>Expert Assureur (ACOTEX)</i> <p>Foreurs :</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Bernard Sustrac (LAVIOSA – MPC) bernard.sustrac@mpcfr.com ✓ Régis Eme (Mannfor) eme@mannfor.eu ✓ Julien Fabiano (MCCF) julien.fabiano@mccf.fr 	
<p>Excusés :</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Benoît Spittler Benoit.Spittler@developpement-durable.gouv.fr : <i>Chargé de mission "géothermie et forages", MEDDE - MRP/DGALN/DEB/GR</i> ✓ Serge Resnikow (LAVIOSA – MPC) serge.resnikow@mpcfr.com ✓ Ludovic Reynaert (MASSE) forages.masse@wanadoo.fr ✓ Eric Gerardin (COFOR) eric.gerardin@cofor.com ✓ Olivier Grière (G2h-conseils) g2hconseils@sfr.fr ✓ Alexis Gutierrez a.gutierrez@brgm.fr ✓ JP Cuny jpcuny@wanadoo.fr ✓ Sebastien Vauthrin sebastien.vauthrin@vauthrin-forages.fr ✓ Etienne Gatelier (SADE) etienne.gatelier@sade-cqth.fr ✓ Joel Sillard (SADE) sillard.joel@sade-cqth.fr 	
<p>Diffusion pour information :</p> <p>JY Hervé (Forage assistance) forage_assistance@gmail.com Sanjuan Bernard (BRGM) : b.sanjuan@brgm.fr Dominique Midot (BRGM) : d.midot@brgm.fr Eric GARROUSTET (SGEG) : garroustet@sfeg-forages.fr Christian Boissavy (AFPG) : christian.boissavy@orange.fr Norbert Bommensatt (ADEME) : norbert.bommensatt@ademe.fr Philippe Laplaige (ADEME) : philippe.laplaige@ademe.fr</p>	

Annexé au présent compte-rendu : présentation du cas spécifique traité par Laviosa - MPC

ORDRE DU JOUR

- Contexte
- Propositions et discussion de cas spécifiques
- Planning et suites des opérations

Actions	Responsable	Délai
Monter une fiche action décrivant le développement des méthodes d'investigation des SGV défectueuses avec PME et test sur la plateforme gth du BRGM (réunions techniques, investigation terrain, achat matériel). Le soumettre à l'ADEME (besoin d'un avenant ?). Mettre en contact SOLEO et CAM EXPLO.	AVB	16/12/14
Techniques de remédiation sur SGV en Allemagne. Reprendre contact avec M. Watzel (proposer de se réunir soit en Allemagne, soit en France)	AVB	Janvier 2015
Contacteur Augsburg (problèmes gel – dégel)	P. Monnot	16/12/14
Envoyer au BRGM les cas spécifiques à traiter : <ul style="list-style-type: none"> - Mannfor : Artésianisme – cimentation - Karst (SGV) - MASSE : problèmes de corrosion tubage – casing - G2H-Conseils : 	Mannfor Masse G2H-Conseils	Deadline : 16/12/14
Recevoir traitement du cas spécifique sur fermeture de forages profonds – Cas Storengi	Laviosa	Deadline : 16/12/14
Réaliser une fiche type de description et traitement des cas	BRGM	16/12/14
Prochaine réunion de groupe de travail		16/12/14

1. CONTEXTE (RAPPEL)

Dans le cadre d'un projet de recherche intitulé REMEDIA-FOR, le BRGM regroupe un consortium de foreurs et bureaux d'études, assureurs, pouvoirs publics et experts afin de faire un état de l'art sur des problématiques ciblées dans le domaine du forage géothermique.

L'objectif est de réaliser un document qui fasse état des solutions de remédiation maîtrisées par les foreurs en France ou à l'étranger sur des cas spécifiques de forages géothermiques ayant connus des problèmes, mettant en avant des recommandations techniques et législatives, d'une part à titre préventif et d'autre part à titre curatif et proposant des solutions concrètes d'investigation ou de remédiations reconnues par les professionnels. Il pointera les situations où le développement de solutions techniques innovantes, plus performantes que l'existant, sont nécessaires.

2. OBJECTIFS (RAPPEL)

L'objectif est de traiter des cas concrets d'ouvrages spécifiques ciblés en fonctions de leur difficultés de réalisation, de remédiation et d'impact potentiel sur leur environnement, afin de déterminer des moyens d'investigation avant, pendant et après foration, d'établir un diagnostic de la problématique et de trouver des moyens techniques de remédiation.

Il ne s'agit pas de faire un état de l'art spécifique sur toutes les problématiques rencontrées dans le cadre du forage, mais de pointer des cas qui ont un impact important sur l'environnement et/ou sur le bâti, ou des cas qui nécessitent un développement de moyens d'investigation et de remédiation (R&D).

3. PÉRIMÈTRE DU PROJET (RAPPEL)

- On ne se limite pas en profondeur. L'objectif est de s'intéresser aux sinistres et solutions de remédiation qui peuvent s'adapter aux problématiques de la géothermie tbe (transversalité) ;
- ~~Gamme de profondeur des forages prise en compte : 0 – 600 m¹;~~
- Utilisation des forages : usage pour la géothermie
- Types d'échangeurs : sondes géothermiques (SGV) + forages d'eau²
- Remédiation : le champ d'étude des méthodes de remédiation se limitera au forage uniquement.
- Sinistre (dysfonctionnement) : se focaliser sur les incidents et non uniquement les accidents (il n'y a pas forcément de réparation).

¹ Au-delà, les techniques et problématiques ne sont plus les mêmes

² Identique durant phase foration, différent une fois l'échangeur équipé

4. PLAN D'ACTION (RAPPEL)

Le BRGM propose au groupe de travail le nouveau plan d'action suivant :

1. Sélection des cas spécifiques

Le BRGM demande aux foreurs ou BE de sélectionner, à travers leur propre retour d'expérience, un ou plusieurs cas d'ouvrages problématiques à travers lesquels ils ont été amenés à intervenir en termes d'investigation, de diagnostic ou de remédiation. Les foreurs peuvent également choisir un cas trouvé à travers une recherche bibliographique (France ou étranger).

2. Traitement des cas spécifiques en petit comité

Les foreurs/BE proposent au BRGM le/ les cas à traiter. Le BRGM définira ensuite une enveloppe financière et organisera avec le foreur/BE une réunion de travail en petit comité afin de traiter dans le détail le cas.

L'objectif sera de remplir au terme de la réunion une fiche descriptive du cas traité (le modèle sera réalisé par le BRGM) comprenant les éléments suivants :

- Titre ;
- Situation géographique, géologique, hydrogéologique ;
- Description de la **problématique** (problème rencontré, incidents ou accidents rencontrés durant /post phase foration, problématiques liées à l'exploitation, impacts avant remédiation) ;
- Description entreprise de forage (envergure, technique de foration utilisée) ;
- Méthodes d'**investigation** appliquées ou à développer
- Diagnostic retenu (selon résultats investigation) ;
- Solutions **remédiation** appliquées (en cours de foration, après équipement, durant l'exploitation) ;
- Solutions remédiation alternatives ou à développer en R&D (recherche biblio) ;
- **Impact** après remédiation (efficacité).

3. Validation des cas en groupe de travail

Les cas traités en petit comité seront ensuite présentés devant le groupe de travail collégial qui regroupera l'ensemble des intervenants du projet REMEDIA-FOR, afin de valider les solutions d'investigation ou de remédiation.

Note : à titre d'exemple, le cas « de la mise en contact d'un aquifère avec des formations évaporitiques » a été traité en petit comité (MCCF, ACOTEX, BRGM) le 5 septembre 2014 et présenté lors de la présente réunion d'avancement. Il s'agit du premier cas spécifique traité. Une fiche de cas sera prochainement envoyée aux membres du groupe de travail.

4. Tableau récapitulatif des cas traités

A partir des fiches de cas, un **tableau récapitulatif** sera réalisé.

5. CAS SPECIFIQUES A TRAITER (NOUVEAU)

Sondes géothermiques verticales :

- ✓ **Cas proposé en cours de traitement**
 - MCCF : mise en communication d'un aquifère avec des formations évaporitiques
- ✓ **Cas à développer :**
 - MANNFOR : Artésianisme – cimentation - Karst (SGV)
 - AUGSBURGER : gel – dégel (SGV) : prendre contact avec Augsburg : comment le diagnostiquer (si aucunes anomalies visibles en surface), comment le réparer
 - Techniques de remédiation sur SGV en Allemagne. Böblingen (techniques de remédiation - éclatement tubes – injection. M. Watzel (directeur LGRB)

Forages d'eau et autre :

- ✓ **Cas proposé en cours de traitement**
 - MASSE : problèmes de corrosion tubage – casing (voir ci-dessous)
 - LAVIOSA : fermeture de forages profonds – gaz, artésianisme (voir ci-dessous)
- ✓ **Cas à développer :**
 - G2H-Conseils : remontée de nappe ou le contraire (forages géotechniques) :
 - COFOR : ...

6. DISCUSSION DES CAS SPECIFIQUES (NOUVEAU)

Problèmes de corrosion tubage – casing (forage eau) : MASSE

- ✓ Qualité des aciers
- ✓ Réalisation des soudures
- ✓ Problèmes de piles : étanchéité – corrosion
- ✓ Cimentation
- ✓ A préciser : est-ce que l'on se situe au niveau des préconisations ou de la remédiation (développer un cas de réparation réellement traité)

Fermeture de forages profonds – gaz, artésianisme (LAVIOSA)

(Voir présentation annexée au compte-rendu)

Entreprise LAVIOSA – MPC spécialisée en production de bentonite pour développer des produits d'étanchéité (venues d'eau dans tunnels, forage). Développement de billes d'argile confinées (comprimées) : reconstitution de formations géologiques étanches.

Domaine d'application : pour refermer des puits (surpression gaz, artésianisme). Utilisation de billes d'argiles confinées pour refermer une zone défailante de puits (abandon).

1. **Cas Storengi** (stockage de gaz avec vannes d'étanchéité défailantes à 800 m, fuite à isoler). Dans ce cas, il s'agit d'abandon. Procédure : injection de billes d'argiles (smectite du Wyoming), avec une garantie sur la qualité de la bille d'argile dans le temps et sur le volume utilisé. La pression de confinement est de l'ordre de 18 mpa dans un volume fermé (densité de 2.4 – 2.7).

Les billes sont enrobées avec une gomme végétale (alimentaire), pour retarder la prise (hydratation). On peut également les intégrer dans des chaussettes textiles pour les descendre ou les guider dans l'espace annulaire. Retardement de prise de 40 min environ.

Contrôle de puits pour déterminer si les billes sont à la bonne profondeur.
Remarque : les billes d'argile ne gonflent pas en présence d'eau salée. Dans ce cas, les billes sont descendues dans la boue de forage sursaturée en gypse, puis « lavées » à l'eau pour qu'elles gonflent.

2. **Utilisation alternative – technique à huile** : emprisonnement de billes dans des huiles végétales à base de Colza (smectite = bentonite sodique). Objectif : fluidifiant pour injecter dans des forages déviés. Dans les zones faillées, possibilité pousser l'huile (idem développement). Dans ce cas, les billes ne sont pas enrobées. Les billes sont moins confinées que dans le cas des billes enrobées.
3. **Utilisation en domaine pétrolier pour fermer des petites fractures** (étanchéité non parfaite pour continuer à forer) hydrogonflant (polymères) enveloppées par du caoutchouc.

7. IDENTIFICATION DE NOUVELLES MÉTHODES D'INVESTIGATION OU DE SOLUTIONS DE REMEDIATION (RAPPEL)

- Mesures températures (réactions exothermiques gonflement anhydrite) : voir derniers résultats site Kirscheim
- Caméra
- Mesure trajectoire forage et boucle de sonde
- Diagnostic de l'état de cimentation ; développer un outil d'auscultation associé à l'incorporation d'un traceur dans le coulis : questionner des fabricants d'outils de diagraphie (Schlumberger, ...) + voir brevet Schwenk ;
- Sonde coaxiale : prototype MASSE (instrumentée cbl) : adaptée pour de plus grandes de profondeurs (géologie, instrumentation) ;
- Intégrer les connaissances du génie-civil pour travaux d'étanchéité : voir MCCF
- Diagnostics de formations évaporitiques

8. PLANNING ET SUITE DES OPÉRATIONS

Prochaine réunions :
- 16 décembre : 9h30

Adresse :
Tour Mirabeau
BRGM – Siège social
39-43, quai André Citroën
75739 Paris cedex 15
01 40 58 89 0

Annexe 8

Compte-rendu de la réunion du comité de suivi du 16.12.14

Bilan des travaux réalisés en 2014 et nouvelles perspectives en 2015

CG 88/10 PM/MP

COMPTE-RENDU	
Opération : REMEDIA-FOR	Numéro : PDR14DGR13
Objet : Réunion d'avancement	
Date de la réunion : 16 décembre 2014 Lieu : Paris (Tour Mirabeau) Rédacteur : P. Monnot	
<p>Participants :</p> <p>BRGM :</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ P. Monnot (BRGM) p.monnot@brgm.fr ✓ Anne-Valérie Barras av.barras@brgm.fr <p>ADEME :</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Norbert Bommensatt (ADEME) : norbert.bommensatt@ademe.fr <p>AFPG :</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Christian Boissavy : christian.boissavy@orange.fr <p>BE :</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Grière (G2h-Conseils) : g2hconseils@club-internet.fr <p>Assureurs :</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Jean-Marc Weider : jm.weider@acotex.fr <i>Expert Assureur (ACOTEX)</i> <p>Foreurs :</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Bernard Sustrac (LAVIOSA – MPC) bernard.sustrac@mpcfr.com 	
<p>Excusés :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Régis Eme (Mannfor) eme@mannfor.eu • Julien Fabiano (MCCF) julien.fabiano@mccf.fr • Benoît Spittler Benoit.Spittler@developpement-durable.gouv.fr : <i>Chargé de mission "géothermie et forages", MEDDE - MRP/DGALN/DEB/GR</i> • Serge Resnikow (LAVIOSA – MPC) serge.resnikow@mpcfr.com • Ludovic Reynaert (MASSE) forages.masse@wanadoo.fr • Eric Gerardin (COFOR) eric.gerardin@cofor.com • Alexis Gutierrez a.gutierrez@brgm.fr • JP Cuny jpcuny@wanadoo.fr • Sebastien Vauthrin sebastien.vauthrin@vauthrin-forages.fr • Etienne Gatelier (SADE) etienne.gatelier@sade-cqth.fr • Joel Sillard (SADE) sillard.joel@sade-cqth.fr 	

Diffusion pour information :

JY Hervé (Forage assistance) : forage_assistance@gmail.com
 Sanjuan Bernard (BRGM) : b.sanjuan@brgm.fr
 Dominique Midot (BRGM) : d.midot@brgm.fr
 Eric GARROUSTET (SGEG) : garroustet@sfeg-forages.fr
 Christian Boissavy (AFPG) : christian.boissavy@orange.fr
 Philippe Laplaige (ADEME) : philippe.laplaige@ademe.fr

Annexé au présent compte-rendu : présentation du cas spécifique traité par Laviosa - MPC

ORDRE DU JOUR

- Présentation de la **fiche d'action** élaborée par le BRGM sur l'instrumentation et l'investigation (voir ci-dessous)
- Planning et suites des opérations

Actions	Responsable	Délai
– Techniques de remédiation sur SGV en Allemagne. Reprendre contact avec M. Watzel (proposer de se réunir soit en Allemagne, soit en France)	AVB	Janvier 2015
– Contacter Philippe Steinmann (EPFL) Augsburg (problèmes gel – dégel) – Contacter GEOWATT (outil Poisson-Nemo) – Contacter Burkhard Sanner	P. Monnot	Janvier 2015
– Annuler le traitement des cas spécifiques et poursuivre le traitement des cas de Kirscheim et de Storengi pour le développement des outils d'investigation et de remediation. On traitera un cas supplémentaire proposé par G2H-Conseils (surforage, pachs). – Mm. Weider enverra un dossier du cas de Kircheim à LAVIOSA pour pouvoir traiter le cas	MCCF LAVIOSA ACOTEX	2015
Rédiger une note officielle adressée au Ministère sur le constat du retrait progressif des foreurs de la commission	M. Weider, BRGM (signée par Monnot)	Janvier 2015
COPIL : restera inchangé en 2015 (foreurs, BE, Assureurs, institutions, pouvoirs publics).		
Contacteur le FGAO pour présenter la démarche et voir la possibilité de financement pour le développement d'outils	P. Monnot	2015
Plan d'action : on mènera le projet sur deux axes :	Groupe de travail	

<ul style="list-style-type: none"> • Instrumentation – investigation : développements • Remediation sur les cas mentionnés 		
Proposition de participation du COPIL au prochain congrès d'Offenburg : 5-6 mars 2015		
Prochaine réunion : le 4 mars de 10h à 13h à l'ADEME en Alsace (en raison du congrès d'Offenburg) Adresse : 8 Rue Adolphe Seyboth 67000 Strasbourg	Tous	4 mars 2015
Réaliser une fiche type de description et traitement des cas	BRGM	2015

DOCUMENT INTERNE AU GROUPE DE TRAVAIL

**PROJET DE RECHERCHE REMEDIA-FOR
FICHE ACTION**

NOM DE L'ACTION:	« INSTRUMENTATION »
INTITULE DE L'ACTION :	DEVELOPPEMENT DE MOYENS INSTRUMENTAUX D'INVESTIGATION SUR DANS LES SONDES GEOTHERMIQUES VERTICALES DEFECTUEUSES AVEC UN POOL DE PME

1– Contexte et objectifs

Dans le contexte du développement des énergies renouvelables et de la transition énergétique, le recours à la géothermie de minime importance est encouragé. Cependant, la réalisation de sondes géothermiques présente des risques liés à des phénomènes géologiques et hydrogéologiques qui ont été avérés sur plusieurs cas de sinistres en Alsace et en Lorraine notamment. Une fois le sinistre déclaré, il est impératif de neutraliser l'effet de la ou les sondes défectueuses. La problématique émergeant seulement, les méthodes de remédiation ne sont pas éprouvées. Le projet REMEDIA-For cofinancé par l'ADEME et le BRGM a donc vu le jour.

Au préalable à des travaux de remédiation, des investigations sur les sondes sont nécessaires et conditionnent les méthodes à suivre (ex : la sur-foration d'une sonde n'est possible que si sa déviation n'excède pas quelques mètres). Une mesure de la température (pour mettre en évidence un problème d'évaporites), de la déviation et une inspection par caméra sont autant de paramètres qu'il conviendra de déterminer pour appréhender une méthode de remédiation.

En Allemagne, un sinistre de grande ampleur – Staufen - a nécessité des travaux de reprise d'un champ de sondes défectueux, mettant en communication des couches évaporitiques et un aquifère captif, provoquant ainsi un gonflement de tout un village historique et la fissuration de plusieurs centaines de maisons. Des investigations préalables ont été menées mais étaient adaptées au contexte et à un diamètre de sonde plus important (40 mm) ne permettant pas de les appliquer directement sur les cas de sinistres en France (conclusions des prises de contact faites par ACOTEX et le BRGM Alsace en 2013).

Une première démarche a été entreprise par le BRGM et le LRPC avec la PME Soleo, basée dans l'Allier, pour développer un outil permettant de caractériser l'état de la cimentation dans une sonde géothermique verticale. Cette approche a été menée en vue du montage d'un FUI. Ce projet n'a jamais vu le jour, car il était question de tester au préalable le prototype développé par Soleo (méthode sonique). Ce prototype n'a jamais abouti car la méthode sonique ne permet pas une interprétation fiable de l'état de cimentation.

Une deuxième approche a été menée par l'entreprise Schwenk (Allemande) qui participe à la commission X10-G pilotée par le BRGM sur le projet de norme sur le coulis géothermique (PR NF X10-950). Un prototype d'instrument de mesure breveté permet de mesurer l'état de la cimentation en incorporant un traceur magnétique dans leur propre coulis. Cette approche doit cependant encore faire l'objet de développements complémentaires pour la généraliser sur d'autres coulis ou pour incorporer un autre type de traceur. Un groupe de travail dédié sera mené par le BRGM en 2015 sur ce sujet.

Une troisième démarche a été initiée avec la PME CAMEXPLO, basée en Alsace pour la mise au point de mesure de température dans les sondes de diamètre 32 mm avec accès difficile (risque de blocage de la sonde importante). Un premier test sur un site en Alsace s'est révélé positif.

Il est donc proposé de développer un volet « instrumentation » au sein du projet REMEDIA-FOR avec pour objet de poursuivre la mise au point d'outils instrumentaux d'investigations dans les SGV en partenariat avec des PME et de mettre en place des protocoles de validation à travers la plate-forme

géothermique expérimentale du BRGM située à Orléans. De plus, une synthèse sur l'état de l'Art en matière de méthodes d'instrumentation de sondes géothermiques verticales en Allemagne et éventuellement en Suisse, sera réalisée, complémentaire aux premières recherches déjà effectuées.

2 - Programme d'actions

Principales actions :

- Réalisation d'un état de l'Art sur les méthodes d'investigation développées/utilisées par les entreprises en Allemagne, notamment dans le Bade-Wurtemberg, confronté à une demi-douzaine de sinistres ainsi qu'en Suisse ;
- Développement préliminaire des outils pour des investigations à l'intérieur de sondes géothermiques verticales de diamètre 32 mm et notamment :
 - Un prototype de sonde température mise au point par la PME CAMEXPLO ;
 - Un prototype de système caméra miniature de 10 mm de diamètre avec éclairage et en haute résolution, étanche pour inspection sur la plate-forme expérimentale du BRGM à Orléans ;
 - Un prototype d'outil pour qualifier la cimentation de la sonde à partir des premiers travaux réalisés par la PME SOLEO
- Mise en place de tests préliminaires pour validation des prototypes (température, caméra et état de cimentation) au niveau de la plate-forme expérimentale du BRGM à Orléans par les PME CAMEXPLO et SOLEO

3 - Résultats attendus

- Une note et une présentation faisant état de l'Art sur les méthodes d'instrumentation de sondes géothermiques verticales en Allemagne et en Suisse ;
- Le développement en vue de la mise au point d'un outil prototype de mesure de la température dans les sondes géothermiques verticales de diamètre 32 mm ;
- Le développement en vue de la mise au point d'une caméra miniature prototype avec éclairage et étanche permettant l'inspection caméra de sondes géothermiques verticales de diamètre 32 mm ;
- Des pistes de développement pour la mise au point d'un dispositif des états de cimentation
- Les résultats des tests de validation des outils in-situ au niveau de la plate-forme géothermique expérimentale

3 - Acteurs

Entreprise	Contact référent	Adresse	Site internet
 Conseils Eau & Sous-sol	Charles Frey	15 rue des Vosges, 67560 ROSHEIM	http://www.akwaterra.fr/
	Laurent Gladly	9b rue des Vignes 67205 OBERHAUSBERGEN	http://www.camexplo.fr/

	Philippe Chalmet	6, rue Jean MACE 03190 VALLON EN SULLY	http://www.soleo-logging.fr
Indépendant	Dr. Vincent Badoux	Géologue/Hydrogéologue Parkstrasse, 3 3014 Bern	
	Anne-Valérie Barras Pascal Monnot	Rue Pont du Péage – 67118 GEISPOLSHHEIM 3 Av. Claude Guillemin, 45100 ORLEANS	http://www.brgm.fr/

4 - Déroulement

Le programme sera exécuté en 8 mois de janvier 2015 à août 2015

Actions	Acteurs	Résultats attendus	Délais
1 - Etat de l'Art sur les méthodes d'investigations des SGV en Allemagne :			
rencontre de professionnels, déplacements en Allemagne, traduction, rédaction d'une note	AKWATERRA	1 note	Fév. 2015
présentation en COPIL REMEDIA-FOR à Paris	AKWATERRA	1 présentation	Mars 2015
présentation en COPIL REMEDIA-FOR à Paris de la synthèse sur les méthodes d'investigations des sondes à l'échelle de la Suisse (en allemand) de l'Office fédéral de l'Energie	V. Badoux	1 présentation	Avril 2015 ?
2 – Prototype de mesure de la température			
Mise au point d'outil opérationnel de mesure de la température	CAMEXPLO	1 prototype	Janv. 2015
Procédure de validation par test sur la plate-forme expérimentale (déplacements à Orléans)	CAMEXPLO BRGM (plate-forme)	Résultats de test	Fév. 2015
Renseignements auprès de la société GEOWATT ou intermédiaire sur la sonde NEMO	A définir	Présentation et test	Juin 2015
3 – Prototype caméra			
Mise au point d'une caméra miniature, étanche avec éclairage	CAMEXPLO	1 prototype	Avril 2015
Procédure de validation par test sur la plate-forme expérimentale (déplacements à Orléans) des prototypes	CAMEXPLO SOLEO BRGM (plate-forme)	Résultats de test	Juin 2015
4 – Prototype de mesure de la cimentation			
Mise au point d'un outil pour qualifier la cimentation de la sonde	SOLEO	1 prototype	Avril 2015
Procédure de validation par test sur la plate-forme expérimentale (déplacements à	SOLEO BRGM	Résultats de test	Juin 2015

Orléans) des prototypes			
5 – Présentation en COPIL REMEDIA-For à Paris			
Présentation des résultats intermédiaires	CAMEXPLO SOLEO	2 présentations	Mars ou avril 2015
Présentation des résultats finaux	CAMEXPLO SOLEO	2 présentations	Juillet 2015
5 - Coordination			
Suivi de l'avancement des actions 1 à 4	BRGM	CR oraux en COPIL	En continu
Mise en contact des 3 PME pour échanges et coopérations	BRGM		Janv. 2015
Coordination des présentations techniques en COPIL	BRGM		En continu
Rapport d'exécution du volet « instrumentation » du projet REMEDIA- FOR	BRGM	1 rapport	Septembre 2015

5 – Budget requis

Pour la réalisation de ce projet, le budget doit financer l'achat de matériels, le financement de la recherche par la PME, les déplacements à Orléans sur la plate-forme géothermique expérimentale, les déplacements à Paris au siège du BRGM pour les présentations en COPIL et l'accompagnement technique et coordination du BRGM

DOCUMENT INTERNE AU GROUPE DE TRAVAIL

Annexe 9

Rapport Akwaterra (2015)

Etat de l'art en Allemagne et en Suisse sur les méthodes d'investigation et de remédiation des sondes géothermiques



PROJET DE RECHERCHE REMEDIA-FOR

« INSTRUMENTATION »

**METHODES D'INVESTIGATIONS ET DE REMEDIATIONS
DES SONDES GEOTHERMIQUES VERTICALES**

ETAT DE L'ART EN ALLEMAGNE ET EN SUISSE

**MARS 2015
R101/A**



AKWATERRA

BRGM – Méthodes d'investigation et de remédiations des sondes géothermiques verticales
Etat de l'Art en Allemagne et en Suisse – Rapport R101/A

SOMMAIRE

	Page
1. Avant-propos	2
2. Spécificités générales des sondes géothermiques	2
3. Acquisition des données géologiques et hydrogéologiques	3
3.1 Avant la réalisation des sondes géothermiques	3
3.2 Lors des travaux de forage pour les sondes géothermiques	3
3.3 Avant la pose de la sonde	4
3.4 Après la pose de la sonde	4
4. Contrôle de la déviation	8
4.1 Contrôle de la déviation verticale et horizontale, propriété des mesures	8
4.2 Sondes disponibles	11
5. Suivi du niveau d'eau et de sa qualité dans les sondes	10
6. Contrôle/mesure de la température dans les tubes des sondes géothermiques.....	11
6.1 Principes	11
6.2 Sondes disponibles.....	11
7. Contrôle de la cimentation des sondes	17
7.1 Rôle de la cimentation.....	17
7.2 Contrôle de la cimentation en cours d'injection	18
7.3 Contrôle de la cimentation après la prise	21
8. Test de réponse thermique.....	27
9. Inspection de l'état intérieur des sondes	28
9.1 Propriétés de la mesure	28
9.2 Sondes disponibles	28
9.3 Projets en cours	28
10. Etude comparative de diverses inspections	29
11. Conclusions sur les reconnaissances possibles	30

AKWATERRA

BRGM – Méthodes d’investigation et de remédiations des sondes géothermiques verticales
Etat de l’Art en Allemagne et en Suisse – Rapport R101/A

12. Techniques de remédiation	31
12.1 Surforage d’une sonde.....	31
12.2 Extraction d’une sonde	32
12.3 Injection d’un coulis de cimentation par les sondes	32
13. Conclusion générale	34
ANNEXES	35

Liste des figures

Figure 1 : Comparatif entre des mesures gamma-ray	6
Figure 2 : Log gamma-ray d’une sonde avec ciment « gamma-activé »	7
Figure 3 : Cible de mesures de déviation avec sonde courte	10
Figure 4 : Exemple de mesures faites à D-Staufen, vue en plan et en 3D	10
Figure 5 : Sonde de mesure de déviation LRGB	11
Figure 6 : Sonde GEOsniff	13
Figure 7 : Sonde Nimo-T.....	13
Figure 8 : Mesures avec sonde Nimo	15
Figure 9 : Gradient géothermique normal et influencé	17
Figure 10 : Variation de la température le long d’une sonde d’exploitation en cours d’exploitation mesurée à diverses profondeurs à l’aide d’une fibre optique	18
Figure 11 : Enregistrement du suivi de l’injection de ciment ferromagnétique.....	20
Figure 12 : Suivi de la remontée de ciment par fibre optique	21
Figure 13 : Contrôle de la présence de ciment par fibre optique	23
Figure 14 : Log température avec test EGRTs	24
Figure 15 : Prototype sonde à ultra-sons avec fréquence de 1 Mhz	25
Figure 16 : Sonde température et sonde gamma—gamma Dr. Voutta..	26
Figure 17 : Log gamma-gamma	27
Figure 18 : Test TRT et log gamma-gamma	28
Figure 19 : Caméra DMT	29
Figure 20 : Influence des équipements sur la position des tubes de sonde	30
Figure 21 : Ecarteurs et centreurs utilisés	31
Figure 22 : Evolution de la température suite à l’injection de ciment	34

AKWATERRA

BRGM – Méthodes d'investigation et de remédiations des sondes géothermiques verticales
Etat de l'Art en Allemagne et en Suisse – Rapport R101/A

1. Avant-propos

En cas de sondes défectueuses, diverses investigations seraient à réaliser afin de comprendre l'origine des désordres constatés en surface et ainsi pouvoir décider d'un programme de remédiation. Le présent rapport fait ainsi le point sur les méthodologies mises en œuvre principalement en Allemagne et en Suisse et les moyens d'investigations disponibles et s'appuie notamment sur le projet de recherche EWSPLUS Solites mené près de Stuttgart entre 2007 et 2012.

Avant d'arriver à des propositions de remédiation, on examinera dans un premier temps successivement les diverses données suivantes à acquérir au préalable :

- Acquisition des données géologiques et hydrogéologiques
- Mesure des déviations verticales et horizontales
- Mesure de la température
- Examen de la cimentation annulaire
- Reconnaissance de la structure interne des sondes

2. Spécificités générales des sondes géothermiques

Lorsqu'interviennent des désordres au droit de sondes géothermiques, on se heurte à trois difficultés majeures :

- Les renseignements géologiques et hydrogéologiques recueillis au cours des travaux sont la plupart du temps peu précis et incomplets pour comprendre les désordres et leurs origines. Il est donc nécessaire d'avoir recours à des diagraphies et des tests différés,
- Les sondes géothermiques étant souvent réalisées en milieu urbain, à proximité immédiate des habitations, recouvertes ensuite par les rues (enrobées, pavages ...) ou les bâtiments eux-mêmes, l'accès aux tubes des sondes peut-être délicat,
- Les caractéristiques techniques des tubes de sondes rendent les investigations difficiles et limitées par rapport à des outils existants pour des forages en plus grand diamètre.

- Données techniques :

- ✓ Diamètre intérieur 26,2 mm pour une sonde de Ø 32 mm (les plus fréquentes, 60 % des 300 000 sondes posées en Allemagne).
Ce diamètre a été utilisé sur le projet Stauffen et à priori également sur les autres sites où des désordres ont été observés dans le Land Bade-Wurtemberg. C'est également le diamètre retenu lors du projet de recherche EWSPlus Solites.

AKWATERRA

BRGM – Méthodes d'investigation et de remédiations des sondes géothermiques verticales
Etat de l'Art en Allemagne et en Suisse – Rapport R101/A

- ✓ Diamètre intérieur 32,6 mm pour une sonde de Ø 40 mm (afin de réduire les pertes de charge de la circulation du fluide caloporteur, utilisé plutôt lors d'importants champs de sondes ou pour des sondes profondes –vers 200 m- en Suisse notamment),
- ✓ Sondes souvent vrillées à la descente et donc pincées
- ✓ Sondes écrasées, fendues, pieds de sonde cassés ...
- D'où nécessité d'avoir des sondes de mesures :
 - ✓ d'un diamètre le plus faible possible et lestée,
 - ✓ d'une longueur la plus courte possible (ou sinon sondes flexibles),
 - ✓ reliées par câble acier rond au lieu de rubans plats (style sonde de mesure de niveau d'eau) car risque d'adhérence le long des tubes de sonde.

3. Acquisition des données géologiques et hydrogéologiques

3.1 Avant la réalisation des sondes géothermiques

3.1.1 Règlementation

Les implantations de sondes géothermiques ainsi que les programmes des travaux futurs (profondeur, préconisations lors des travaux, coupes techniques ...) doivent être respectivement effectuées et prévus selon la législation en vigueur.

3.1.2 Champ de sondes

Une étude géologique préalable avec la réalisation d'un forage carotté, diverses diagraphies et un test TRT (Test de Réponse Thermique) permettra de définir les conditions géologiques locales. Elle pourra déboucher sur des recommandations pour la réalisation des forages (forage avec tubage à l'avancement, isolation d'aquifères par tubage et cimentations ...) afin d'optimiser le rendement des sondes et éviter de futurs désordres.

3.1.3 Sondes isolées ou peu nombreuses

Dans ce cas, une reconnaissance préalable détaillée est économiquement délicate à prévoir. Suivant l'état de la connaissance de l'environnement géologique local, des recommandations peuvent toutefois être faites.

3.2 Lors des travaux de forage pour les sondes géothermiques

Les forages des sondes géothermiques sont en général réalisés au marteau fond de trou (MFT). Cette technique de forage étant très rapide, un minimum de relevés est toutefois recommandé pour préciser le contexte géologique local :

AKWATERRA

BRGM – Méthodes d'investigation et de remédiations des sondes géothermiques verticales
Etat de l'Art en Allemagne et en Suisse – Rapport R101/A

- Récupération et description des cuttings tous les mètres, disposition dans des caisses, photos recommandées,
- Suivi de la vitesse d'avancement,
- Relevé des arrivées d'eau (profondeur, débit),
- Relevé du niveau d'eau en début et en fin de poste,
- Toutes observations particulières lors du déroulement des travaux.

En Allemagne, ces instructions, valables pour tout forage, font partie des règles de l'art afin d'effectuer les travaux et leurs comptes rendus selon les normes en vigueur (norme EN ISO 14688, 14689-1 et 22475-1 –ex-norme DIN 4022- et norme DIN 4023). Tous les foreurs sont ainsi formés et disposent de fiches pré-imprimées normées afin de pouvoir relever les données. A chaque type de terrain correspond une appellation précise avec une abréviation ainsi qu'un symbole et une charte graphique. La représentation des coupes géologiques et des observations faites en cours de travaux (arrivée d'eau, niveau statique ...) sont ainsi uniformisées facilitant leur compréhension.

3.3 Avant la pose de la sonde

A minima, une diagraphie gamma-ray avant la pose des sondes (ou sinon avant la cimentation) permettrait de caler la coupe géologique et obtenir ainsi une courbe de référence avant cimentation.

3.4 Après la pose de la sonde et la cimentation

3.4.1 Diagraphie gamma-ray

○ *Principe*

Reconnaissance et calage géologique par différenciation du rayonnement gamma naturel des terrains avant ou après la pose des sondes et la cimentation. Des tests ont été effectués en Allemagne lors du projet EWSPLUS Solites. Le signal est plus atténué par les tubes de sonde que par la cimentation. La figure 1 montre un comparatif entre des mesures faites dans une sonde cimentée avec du ciment classique et une sonde cimentée avec du ciment « gamma-activé » (GWE-Troptogel C, avec 15% de sable de zircon, rayonnement gamma > 100 sur l'échelle API). Même après cimentation, les différenciations entre les diverses couches de terrain restent nettes.

AKWATERRA

BRGM – Méthodes d’investigation et de remédiations des sondes géothermiques verticales
Etat de l’Art en Allemagne et en Suisse – Rapport R101/A

Le comparatif entre deux logs avant et après cimentation (figures 1 et 2) peut permettre de détecter des niveaux non cimentés correspondants aux zones où les deux courbes se rapprochent et peuvent se superposer montrant ainsi l’influence du terrain seul.

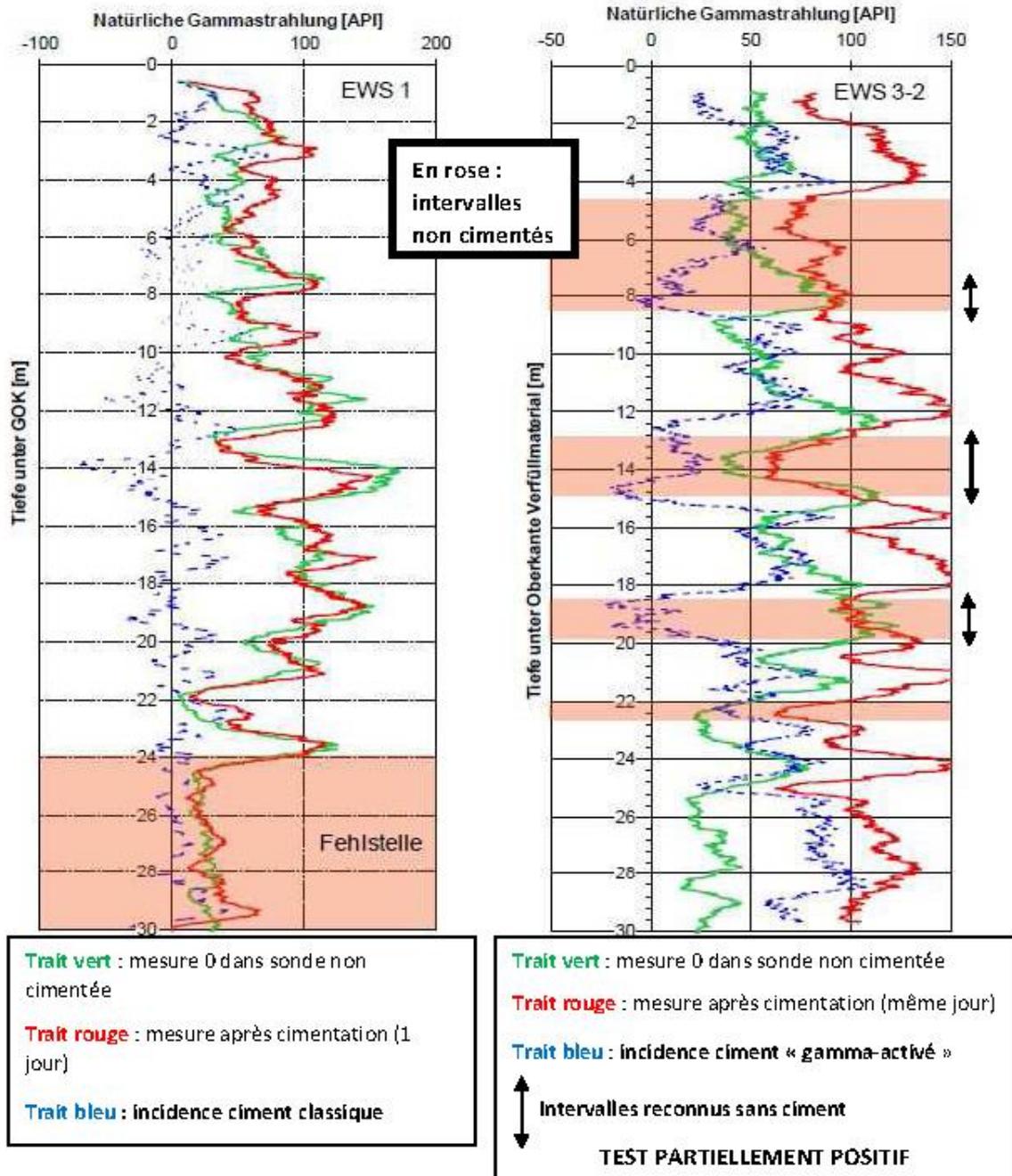


Figure 1 : Comparatif entre des mesures gamma-ray (d’après projet EWSPLUS-SOLITES)

AKWATERRA

BRGM – Méthodes d'investigation et de remédiations des sondes géothermiques verticales
Etat de l'Art en Allemagne et en Suisse – Rapport R101/A

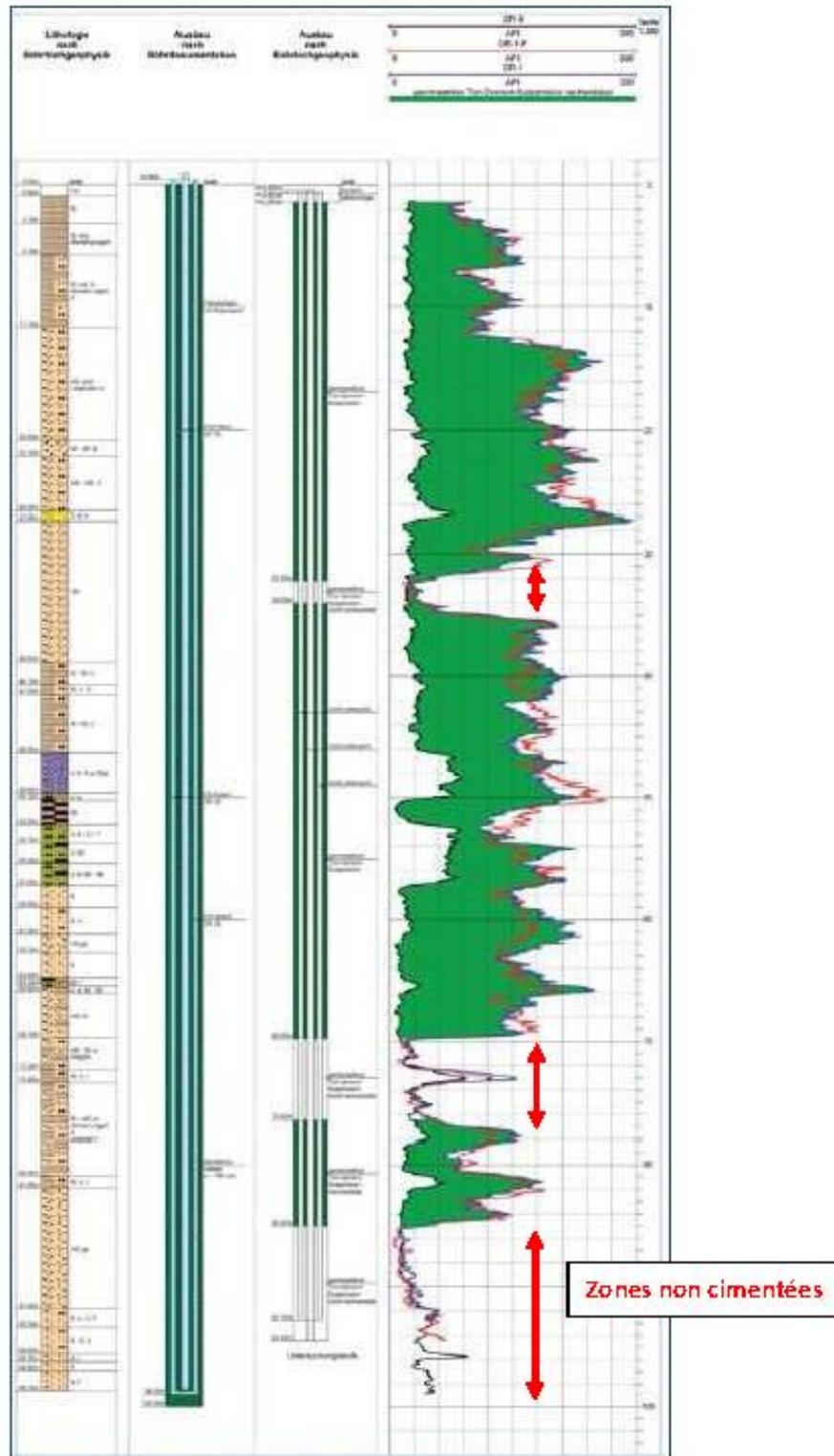


Figure 2 : Log gamma-ray d'une sonde avec ciment « gamma-activé »

AKWATERRA

BRGM – Méthodes d'investigation et de remédiations des sondes géothermiques verticales
Etat de l'Art en Allemagne et en Suisse – Rapport R101/A

Toutefois, le ciment à base de Troptogel C est plutôt utilisé lors de forages de reconnaissance que pour des sondes géothermiques car sa conductivité thermique est faible (environ 1,3 à 1,4 W/m.K). Son coût est élevé, de l'ordre de 1 000 €/T au lieu de 400 €/T pour un ciment classique.

En résumé, le comparatif entre deux diagraphies gamma-ray, avant équipement et après cimentation ne pourrait vraiment localiser des intervalles non cimentés que dans le cas d'utilisation d'un ciment spécifique « gamma-activé », au coût élevé et présentant une conductivité thermique faible pour des sondes géothermiques.

- *Matériel disponible pour les mesures :*
 - TERRATEC : sonde MGAMT (MiniGAMmaTempérature) : sonde avec mesure combinée gamma-ray et température (cf. Mesure température et fiche détaillée en annexe 3).
 - Diamètre : 18 mm, longueur totale : 1,58 m, flexible (rallongée de 0,25 m par rapport à la description sur la fiche pour l'ajout d'un poids supplémentaire).
 - BLM : sonde gamma-ray
 - Diamètre : 22 mm, longueur totale : 1 m, flexible.

3.4.2 Diagraphie gamma-gamma

- *Principe*

Mesure de la densité du terrain : la mesure nécessite l'utilisation d'une source radioactive (Césium 237). Son utilisation ainsi que son stockage et son transport est soumise à une réglementation stricte et contraignante. De plus, il existe toujours un risque de perdre une sonde dans un forage, notamment dans des tubes d'une sonde géothermique suite à un coincement. Dans ce cas, il sera nécessaire de récupérer la source radioactive sans l'abimer. Nous reviendrons sur ce type de mesure plus loin, lors des contrôles de cimentation.

- *Matériel disponible pour les mesures*
 - Dr. Voutta Grundwasserhydraulik :
 - Diamètre : 15 mm
 - Longueur : 80 cm, articulée, en deux parties (source radioactive et récepteur)

AKWATERRA

BRGM – Méthodes d'investigation et de remédiations des sondes géothermiques verticales
Etat de l'Art en Allemagne et en Suisse – Rapport R101/A

3.4.3 Autres diagraphies

Parmi toute la gamme de diagraphies disponibles, on peut notamment citer des diagraphies électriques et soniques qui permettent de préciser la coupe géologique et différencier les niveaux compacts (calcaire, anhydrite, dolomie ...) des niveaux poreux et donc aquifères (calcaire poreux, grès ...) et des horizons argileux.

Les entreprises de géophysique peuvent réaliser diverses mesures avec des sondes qui peuvent descendre dans des forages d'un diamètre en général compris entre 160 et 200 mm.

Par contre, peu de sociétés ont à leur disposition des sondes de très faibles diamètres qui peuvent descendre dans les tubes de sondes géothermiques d'un diamètre inférieur à 26 mm.

4. Contrôle de la déviation

4.1 Déviation verticale et horizontale, propriétés des mesures

Permet de connaître la déviation verticale et en azimut de la sonde géothermique (mesure obligatoire par exemple dans le canton d'Argovie en Suisse). Le trajet de la sonde peut ensuite être représenté en plan ou en 3D.

La déviation verticale est mesurée par un accéléromètre et la déviation horizontale par mesure magnétique. Il n'existerait pas de sonde de mesure de la déviation horizontale par gyroscope adaptée pour descendre dans les tubes des sondes géothermiques.

Les forages n'étant jamais parfaitement verticaux, ces mesures permettent de caler les coupes géologiques et donc d'affiner l'interprétation des structures géologiques.

La direction de la déviation et l'éloignement du fond du forage peuvent permettre de comprendre des désordres décalés par rapport au site du forage.

La figure 3 ci-dessous montre une cible avec les trajectoires de 4 sondes géothermiques reportées sur un plan horizontal. A noter que leurs tracés très irréguliers doivent provenir de l'utilisation d'une sonde courte et étroite qui peut ainsi se « balancer » dans le tube de sonde. Pour réaliser les mesures, il est donc préférable de choisir une sonde fine mais assez longue.

AKWATERRA

BRGM – Méthodes d'investigation et de remédiations des sondes géothermiques verticales
Etat de l'Art en Allemagne et en Suisse – Rapport R101/A

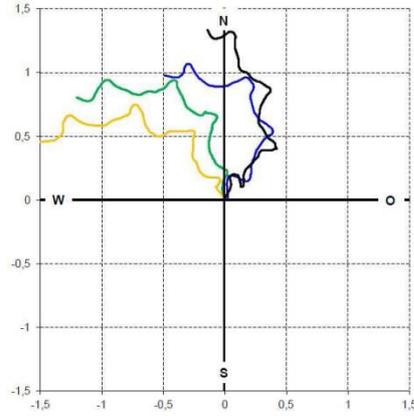


Figure 3 : Cible de mesures de déviation avec sonde courte

A Stauffen (D) par exemple, les mesures de déviation montrent que les forages traversent divers compartiments décalés par des failles parallèles.

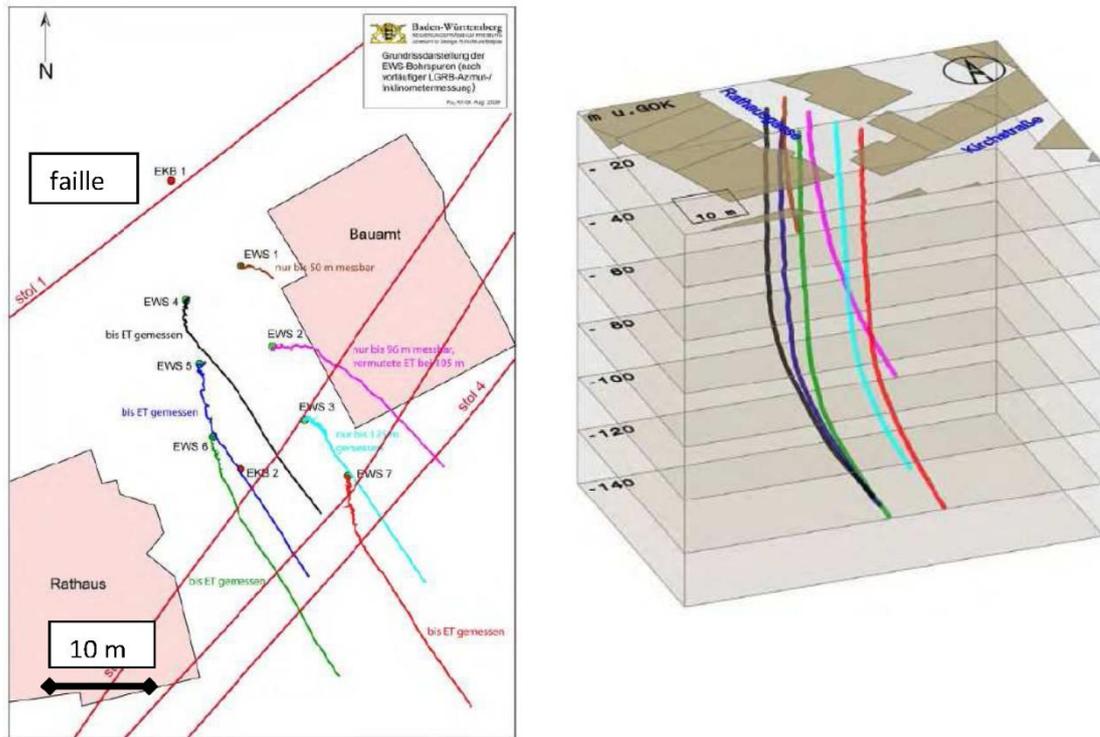


Figure 4 : Exemple de mesures faites à D-Stauffen, vue en plan et en 3D
(rapport LRGB Baden-Württemberg 94-4763//10-563)

AKWATERRA

BRGM – Méthodes d'investigation et de remédiations des sondes géothermiques verticales
Etat de l'Art en Allemagne et en Suisse – Rapport R101/A

4.2 Sondes disponibles

- ✓ TERRATEC sonde MBDV : Ø 18 mm, longueur totale 0,75 m, pression maximale 30 bars. La déviation verticale est mesurée par un accéléromètre et la déviation horizontale par mesure magnétique. Mesure du bas vers le haut à une vitesse d'environ 5 m/min (fiche en annexe 3). Précisions actuelles de la sonde Terratec : ± 1° pour la verticalité et ± 2° pour la direction (soit pour 2° à 100 m : 3,49 m).
- ✓ EBERHARD & Partner AG (Suisse) : concept appelé DeepDrifter© qui combine les mesures de déviation avec une diaggraphie température.
diamètre de la sonde : 18,7 mm
- ✓ Sonde développée par la société Ebersbach Engineering Gundelfingen pour le LRGB (Service Géologique Régional Bad-Württemberg), utilisée pour les mesures de déviation à Stauffen



Figure 5 : Sonde de mesure de déviation LRGB

5. Suivi du niveau d'eau et de sa qualité dans les sondes

En cas de sonde défectueuse (tube fendu, pied de sonde cassé) traversant des niveaux aquifères, le suivi du niveau d'eau et des caractéristiques physico-chimiques (conductivité notamment) peut donner des indications sur l'évolution des conditions hydrogéologiques dans le voisinage.

Un enregistrement continu du niveau d'eau et/ou de la conductivité donnera des renseignements plus complets que des mesures manuelles occasionnelles.

Si de nombreux modèles de sondes existent déjà sur le marché, les diamètres sont souvent trop larges pour descendre dans les tubes des sondes 32 mm.

AKWATERRA

BRGM – Méthodes d'investigation et de remédiations des sondes géothermiques verticales
Etat de l'Art en Allemagne et en Suisse – Rapport R101/A

Le diamètre le plus faible serait de 18,3 mm (Minidat-Aquadat d'Aqualyse –France-), d'autres sondes ont un diamètre de l'ordre de 22 mm.

Terratec (D) travaille sur le développement d'une sonde de pression d'un diamètre total d'environ 19 mm (2,5 à 7 mm pour la sonde de mesure proprement dite) avec enregistrement des valeurs ou transmission par module GSM.

On peut aussi citer la sonde GEOsniff qui enregistre la pression (voir détails ci-après).

6. Contrôle/mesure de la température dans les tubes des sondes géothermiques

6.1 Principe

Suivi de l'évolution de la température de l'eau dans les tubes de sonde permettant de mesurer le gradient géothermique naturel, suivre des phénomènes exothermiques (prise du ciment, transformation d'anhydrite en gypse par exemple) et détecter des anomalies liées à une circulation d'eau le long de la sonde.

6.2 Sondes disponibles

- Sondes reliées par câble
 - ✓ Sonde piézométrique classique avec mesure de la température : sonde à ruban à éviter, risques d'adhérence à la paroi interne de la sonde.
 - ✓ Sonde de mesure/enregistrement de la température fixée à un câble relié à un enregistreur avec possibilité de transmission des données par module GSM. Il existe actuellement diverses sondes disponibles sur le marché. Le diamètre le plus faible serait de 18,3 mm (Minidat-Aquadat d'Aqualyse –France-), d'autres sondes ont un diamètre de l'ordre de 22 mm.
- Sondes indépendantes à enregistrement
 - ✓ Sonde type GEOsniff (enOware) : boule (\emptyset 20 mm) qui est « larguée » dans un tube de sonde qui enregistre la pression et la température, puis qui est expulsée par circulation d'eau ou d'air (autres mesures à l'étude, dont la trajectoire de la sonde par géolocalisation). Peut passer par le pied de la sonde géothermique.

AKWATERRA

BRGM – Méthodes d’investigation et de remédiations des sondes géothermiques verticales
Etat de l’Art en Allemagne et en Suisse – Rapport R101/A

Cette sonde est commercialisée pour le suivi de sondes géothermiques en exploitation (circulation en boucle dans la sonde avec récupération automatique et régulière des données). Elle peut aussi servir à un contrôle de sonde à partir du circuit de raccordement ou depuis un répartiteur lorsqu’on ne peut accéder directement au droit du forage (cas de forages situés sous des bâtiments ou des infrastructures).

Sa précision est de 0,1°C en température et de 0,1 bar en pression. La vitesse de descente est d’environ 4 m/s.

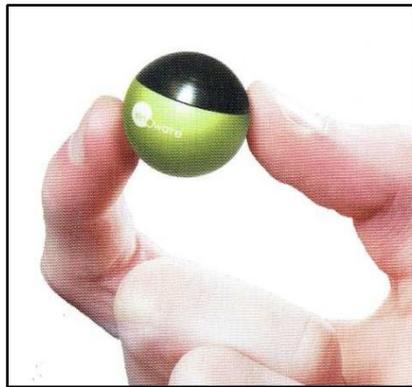


Fig. 6 : Sonde GEOsniff

- ✓ Sonde Nimo-T (Geowatt-Suisse) : Ø 23 mm, larguée (descente à 0,2-0,3 m/s, variable selon choix du bouchon de fermeture) puis expulsée, mesure de la pression et de la température. Choix de l’intervalle de mesure (2,4 ou 6 sec.). La sonde est remontée en injectant de l’eau à l’autre extrémité de la sonde. Vue sa longueur, cette sonde ne peut passer par le pied.

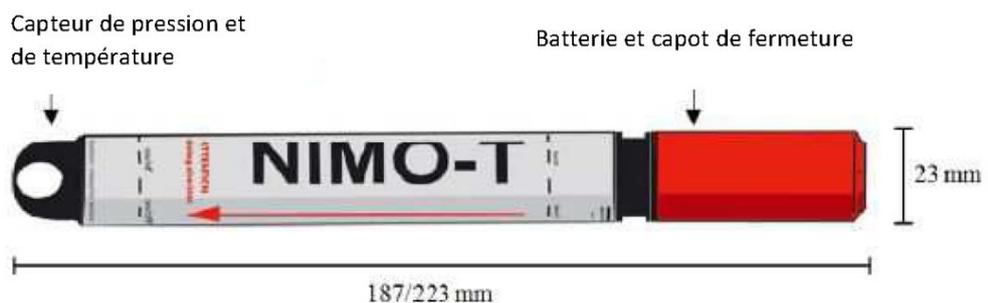


Figure 7 : Sonde Nimo-T

AKWATERRA

BRGM – Méthodes d'investigation et de remédiations des sondes géothermiques verticales
Etat de l'Art en Allemagne et en Suisse – Rapport R101/A

Des mesures successives de T dans le même tube doivent être espacées, l'eau utilisée pour l'éjection de la sonde pouvant influencer les mesures dans la sonde voisine (cf. fig. 8).

Les figures 8a et 8b ci-après montrent des courbes de température mesurée avec la sonde NIMO-T après une cimentation dans le forage 2.2, la sonde étant éjectée par injection d'eau dans le 2^{ème} tube.

Figure 8a : mesures dans la sonde jaune

- Courbes normales, la réaction exothermique de prise du ciment est plus marquée après 2 jours environ qu'après 1,5 jours environ

Figure 8b : mesures dans la sonde bleue voisine

- Courbes normales, la réaction exothermique de prise du ciment est plus marquée après 2 jours environ qu'après 1,5 jours environ.
- On aperçoit de 6 à 9 m et de 14 à 24 m des indices de manque de ciment. Or, la sonde a été totalement cimentée. Les baisses de température sont situées dans des secteurs où les 2 tubes de sonde sont très proches. Les mesures dans la sonde bleue étant faites peu de temps après l'éjection de la sonde avec circulation d'eau froide utilisée pour l'éjection, les baisses de température sont donc dues à l'eau de circulation et non à des manques de ciment.

AKWATERRA

BRGM – Méthodes d'investigation et de remédiations des sondes géothermiques verticales
Etat de l'Art en Allemagne et en Suisse – Rapport R101/A

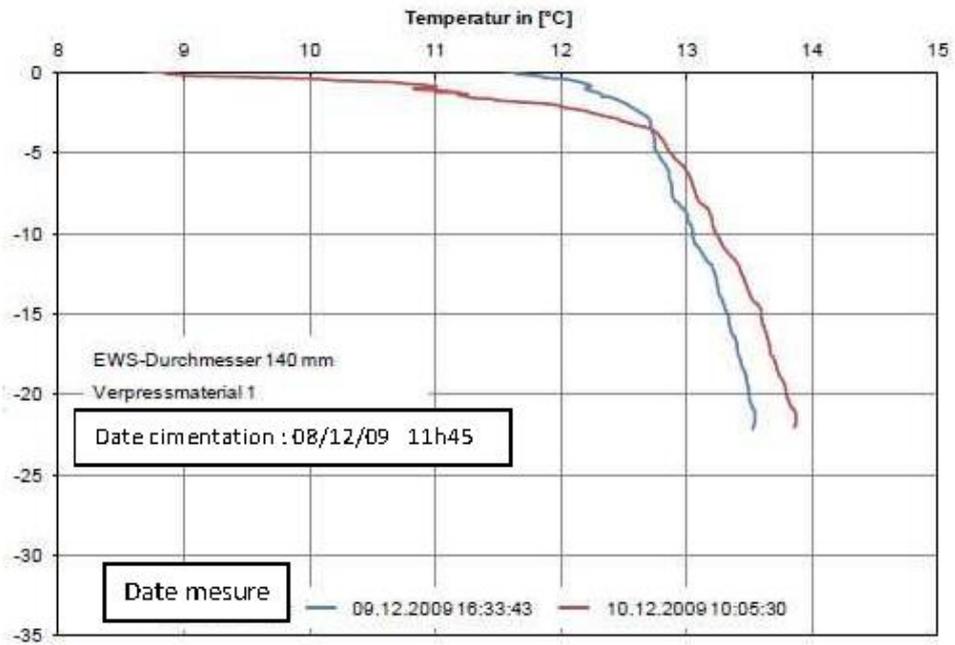


Figure 8a : Mesures dans forage 2.2, sonde jaune

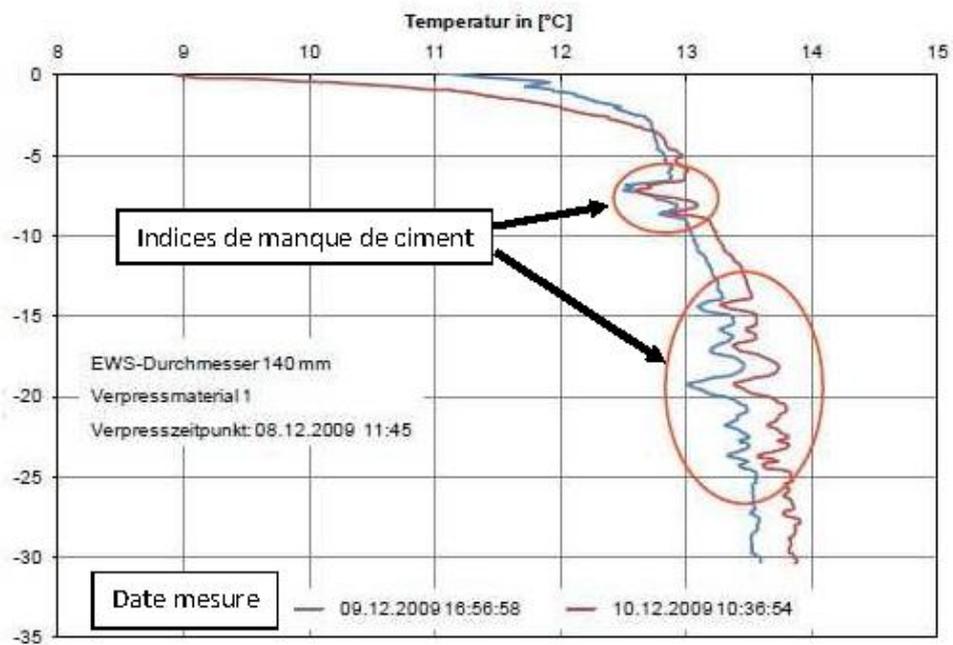


Figure 8b : Mesures dans forage 2.2, sonde bleue

Figure 8 : Mesures avec sonde Nimo (projet EWSPLUS Solites)

AKWATERRA

BRGM – Méthodes d'investigation et de remédiations des sondes géothermiques verticales
Etat de l'Art en Allemagne et en Suisse – Rapport R101/A

- Sondes pour des diagraphies continues
 - ✓ Sonde TTTS (Terratec) : sonde \varnothing 5 mm fixée à l'extrémité d'un câble avec 4 conducteurs, résolution : 0,01°C, intervalle de mesure modifiable, 2 mm standard, vitesse de mesure entre 1 et 2 m/mn, mesure entre 0 et 70°C (fiche en annexe 3).
 - ✓ Sonde MGAMT (MiniGAMmaTemperatur - Terratec) : sonde combinée température \varnothing 18 mm (précision 0,1°C, mesure entre 0 et 70°C) et mesure du rayonnement gamma naturel, sonde articulée et lestée, longueur totale 1,58 m (fiche en annexe 3).
 - ✓ Sonde Dr Voutta : sensibilité 0,01°, intervalle de mesure 1 cm, \varnothing 15 mm.

- Exemples de mesures continues

La figure 9 présente d'une part une courbe de température enregistrée en continu correspondant à un gradient géothermique normal et d'autre part une courbe influencée par des circulations d'eau plus froides dans un niveau karstifié puis par la réaction exothermique liée au passage de l'anhydrite en gypse suite à des remontées d'eau.

En surface on observe toujours une zone plus chaude due à des influences superficielles.

- Mesure par fibre optique

On peut utiliser une fibre optique spécifique qui peut être descendue dans un tube de sonde afin d'y faire des mesures de température (\varnothing 12 mm). La longueur totale à descendre doit être limitée à environ 100 à 120 m du fait de l'adhésion à l'intérieur du tube PE. Le coût de ce type de câble est de l'ordre de 5 €/m.

Une fibre optique en boucle peut-être également fixée à demeure le long des sondes lors de leur mise en place. Dans ce cas, on peut par la suite mesurer la température à diverses profondeurs et à tout moment. Cet équipement est principalement placé au droit de champs de sondes importants afin de suivre également l'évolution de la température du terrain lors de l'exploitation des sondes.

La figure 10 ci-après montre des mesures de température faites le long d'une sonde lors du fonctionnement intermittent de la pompe à chaleur.

AKWATERRA

BRGM – Méthodes d’investigation et de remédiations des sondes géothermiques verticales
Etat de l’Art en Allemagne et en Suisse – Rapport R101/A

Par exemple, sur un champ de 234 sondes réalisées en 2011 et 2012 sur une surface totale d’environ 200 m x 90 m au droit d’un nouveau bâtiment pour le Parlement Européen au Luxembourg, 12 sondes géothermiques ont été équipées de fibres optiques type Helukabel afin de pouvoir mesurer les températures du terrain à diverses profondeurs. Les fibres ont été posées en U (nettement moins cher qu’une seule longueur équipée d’un à la base d’un embout spécifique) le long des tubes de sonde (prix d’achat câble seul : env. 1€/m, soit 210 €/sonde + contrôle après pose : env. 1 000 €/jour).

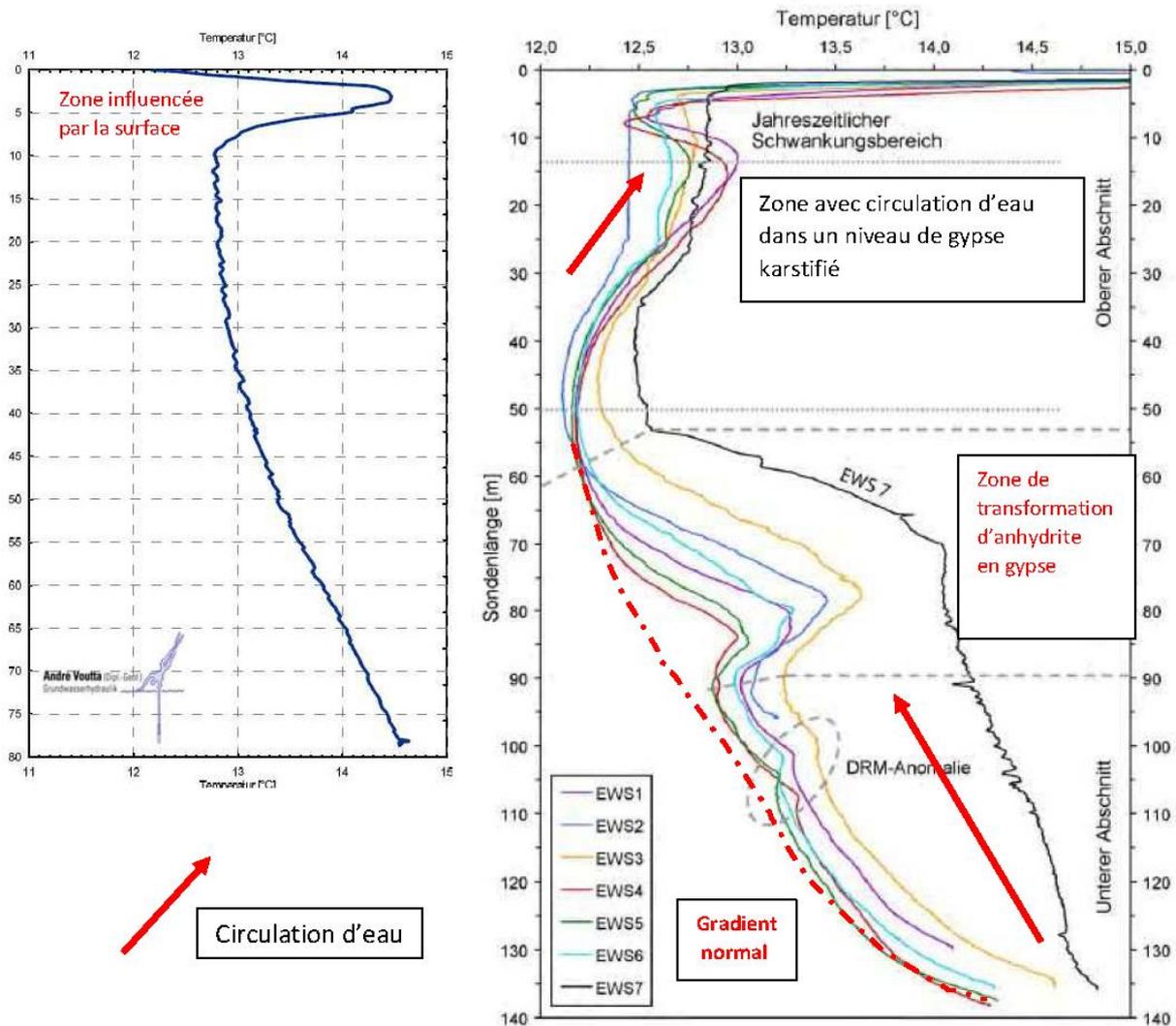


Fig. 9 : Gradient géothermique normal et influencé (Stauffen)

AKWATERRA

BRGM – Méthodes d'investigation et de remédiations des sondes géothermiques verticales
Etat de l'Art en Allemagne et en Suisse – Rapport R101/A

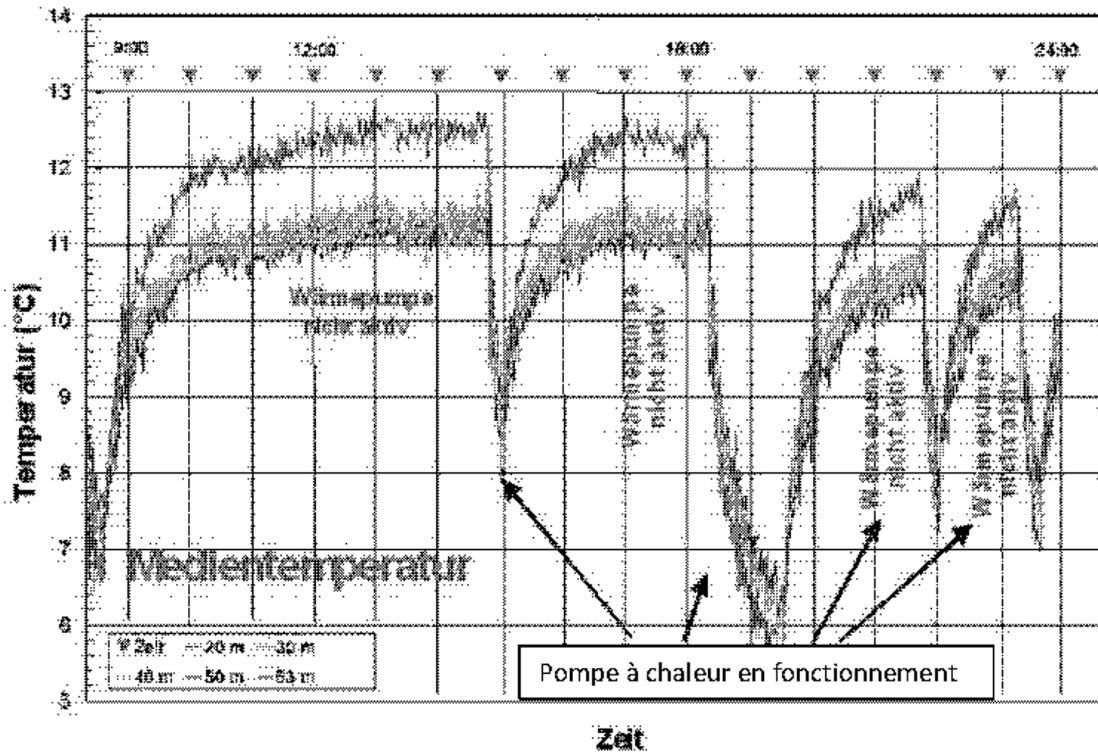


Figure 10 : Variation de la température le long d'une sonde d'exploitation en cours d'exploitation mesurée à diverses profondeurs à l'aide d'une fibre optique

7. Contrôle de la cimentation des sondes

7.1 Rôle de la cimentation

La cimentation doit assurer une bonne conductibilité thermique entre les tubes des sondes et le terrain sur toute la hauteur de la sonde. D'autre part elle doit permettre de réaliser une étanchéité de l'espace annulaire afin d'éviter, le cas échéant, une circulation d'eau descendante ou ascendante entre des aquifères superposés ou vers des terrains « secs » pouvant ainsi les modifier (gonflements ou dissolutions) et entraîner de graves désordres en surface.

Selon les règles de l'art, la cimentation doit être effectuée par injection du coulis en continu depuis le fond du forage au travers d'un tube central PE Ø 25 mm ou 32 mm.

AKWATERRA

BRGM – Méthodes d'investigation et de remédiations des sondes géothermiques verticales
Etat de l'Art en Allemagne et en Suisse – Rapport R101/A

7.2 Contrôle de la cimentation en cours d'injection

Des mesures de suivi de la hauteur de la cimentation peuvent être faites lors de l'injection du coulis (imposées en Bade-Württemberg à partir du 01/05/15, choix entre mesure ou présence d'un géologue en Rheinland-Pfalz).

L'enregistrement des mesures peut être combiné avec ceux du volume et de la pression d'injection (figure 11).

Des exemples de sondes de suivi de la hauteur d'injection du ciment sont données en annexe 2 :

- Sonde électrique (\varnothing 16 mm) avec deux électrodes (MAT Mischanlagentechnik GmbH) : doit être descendu dans l'annulaire, d'où risque de coincement,
- Sonde MES 2 avec deux capteurs de pression, \varnothing 22 mm (Edward Michalik GmbH) : même remarque que pour la sonde électrique,
- Sonde CemTrakker (\varnothing 16 mm) mesure de la susceptibilité magnétique, nécessite donc l'emploi d'un coulis spécifique ferromagnétique. Un exemple d'enregistrement du suivi de la cimentation est donné en figure 10. Cette sonde a l'avantage de pouvoir être descendue dans un tube de sonde et pas dans l'annulaire.

Autres solutions possibles pour le suivi de l'injection de ciment :

- Fibre optique descendue dans un tube de sonde (exemple de la progression de remplissage d'un espace annulaire en figure 12),
- Suivi par sonde gamma-ray avec utilisation d'un ciment « gamma-activé ».

AKWATERRA

BRGM – Méthodes d'investigation et de remédiations des sondes géothermiques verticales
Etat de l'Art en Allemagne et en Suisse – Rapport R101/A

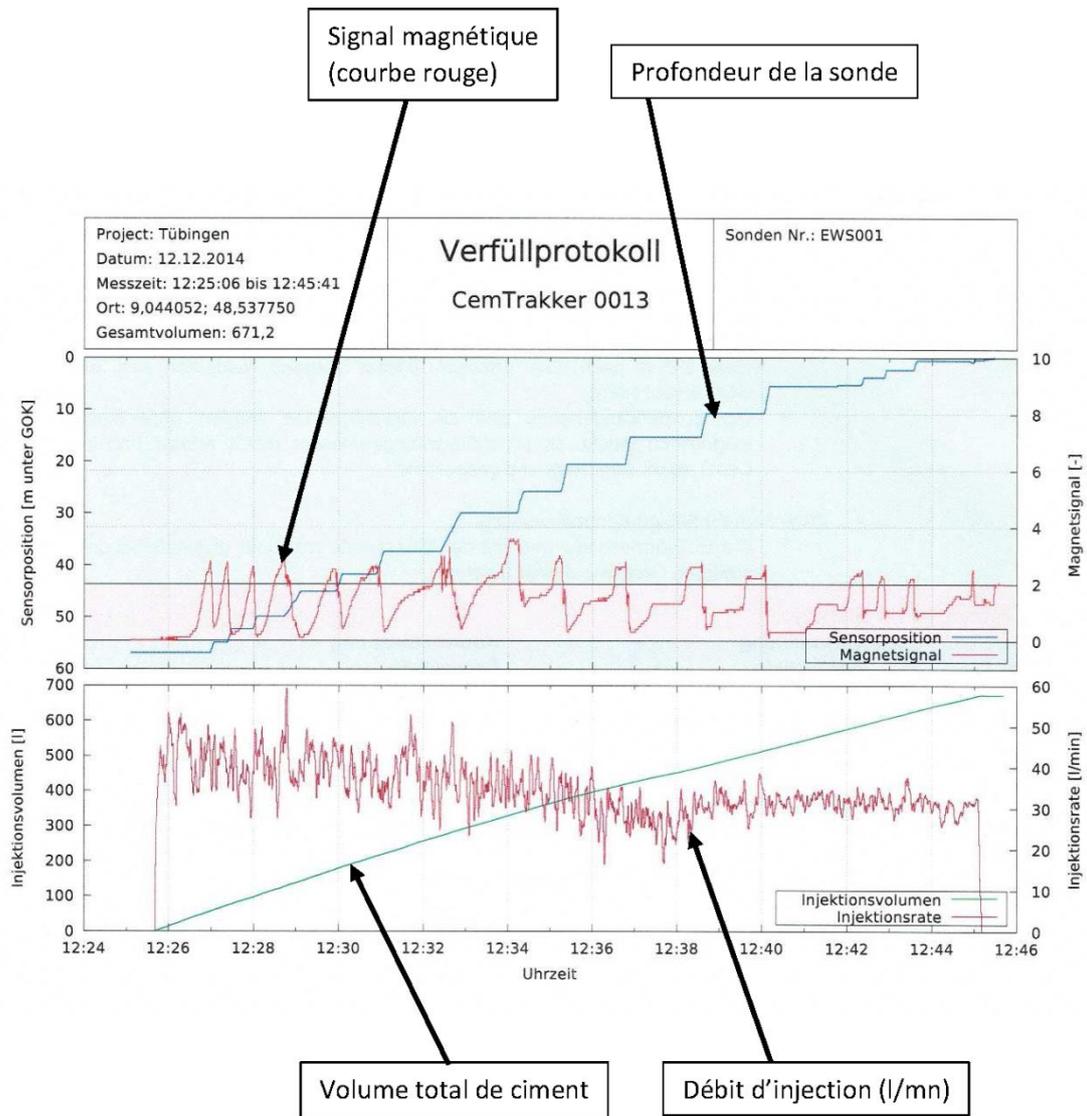


Figure 11 : Enregistrement du suivi de l'injection de ciment ferromagnétique (document CemTrakker)

AKWATERRA

BRGM – Méthodes d'investigation et de remédiations des sondes géothermiques verticales
Etat de l'Art en Allemagne et en Suisse – Rapport R101/A

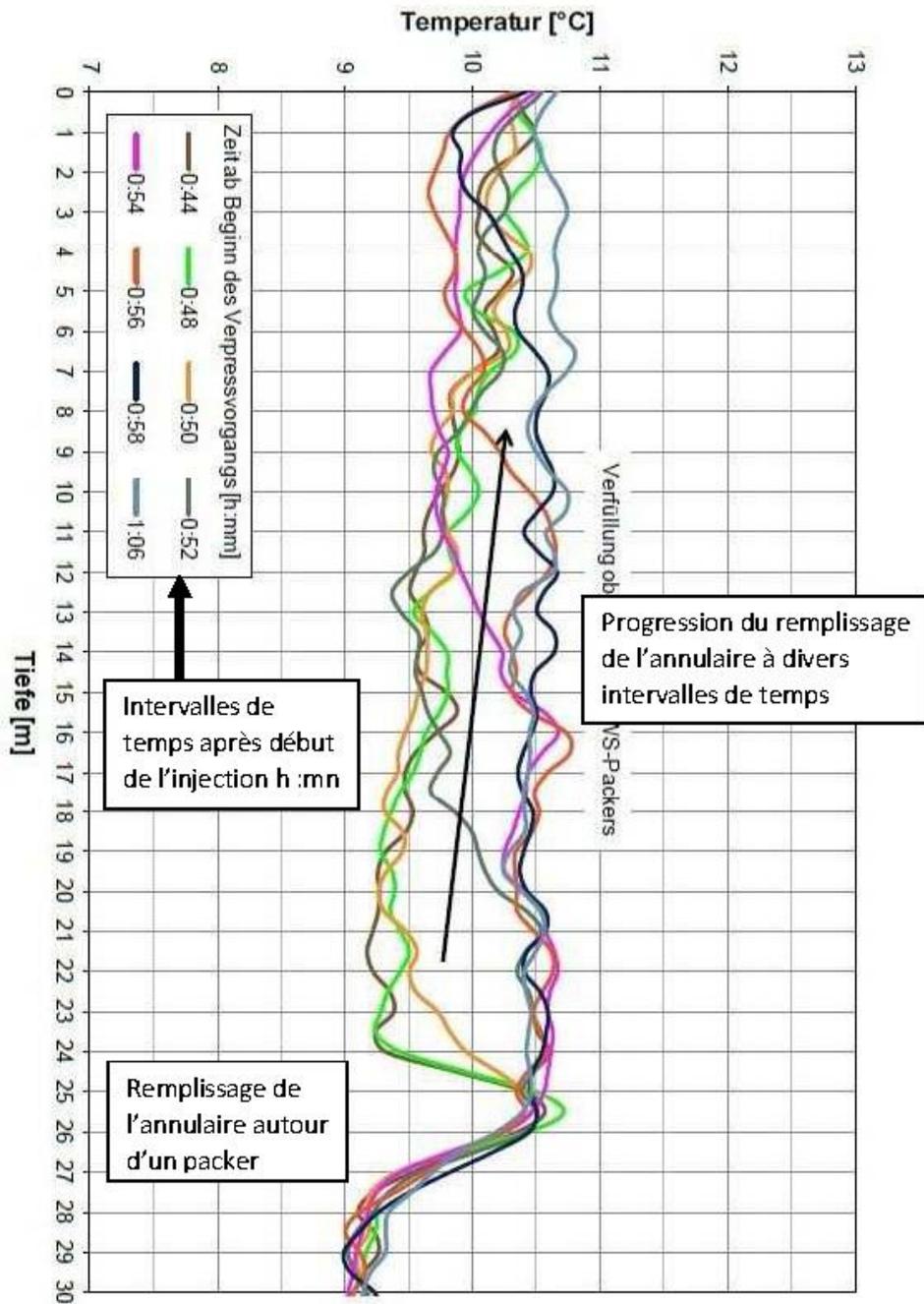


Figure 12 : Suivi de la remontée de ciment par fibre optique (projet EWSPLUS Solites)

AKWATERRA

BRGM – Méthodes d'investigation et de remédiations des sondes géothermiques verticales
Etat de l'Art en Allemagne et en Suisse – Rapport R101/A

7.3 Contrôle de la cimentation après prise

7.3.1 Log gamma-ray

- Mesure dans les sondes, nécessite un log préalable en trou nu. Le signal gamma étant atténué par les sondes et le ciment, une atténuation plus faible peut indiquer un manque de ciment.
- Dans certains ciments, on rajoute du sable de zircon (env. 15%) pour rendre le ciment sensiblement radioactif (type GWE Troptogel C). Si cette méthode permet ainsi de repérer le ciment, elle masque les contrastes géologiques.
- Selon différents tests, il apparaît que pour tenter de déterminer l'absence de cimentation à l'aide d'un log gamma-ray, il est nécessaire de faire une mesure d'étalonnage en terrain nu et utiliser ensuite un ciment avec un rayonnement gamma élevé.

7.3.2 Susceptibilité magnétique

Certains ciments peuvent être enrichis en particules ferromagnétiques afin de perturber le champ magnétique (Schwenk Füllbinder EWM plus avec conductibilité thermique >2 W/mK ou H-hs plus, avec une conductivité thermique faible : env. 1 W/mK , fiches techniques en annexe 4). Ainsi, la cimentation pourra être détectée par une sonde de mesure de la susceptibilité magnétique.

Cette technique ne nécessite pas une mesure de base en trou nu comme pour le gamma-ray.

On ne pourrait plus mesurer l'azimut de la déviation du forage avec une sonde magnétique mais il devrait alors être mesuré à l'aide d'une sonde munie d'un gyroscope qui n'est actuellement pas disponible en faible diamètre pour descendre dans un tube de sonde.

- Sondes disponibles :
 - Sonde de mesure de la susceptibilité magnétique CemTrakker Ø 16 mm (fiche en annexe 2),
 - Sonde MBDV de Terratec : sonde de mesure de la déviation horizontale par mesure magnétique (fiche en annexe 3).

AKWATERRA

BRGM – Méthodes d’investigation et de remédiations des sondes géothermiques verticales
Etat de l’Art en Allemagne et en Suisse – Rapport R101/A

7.3.3 Log température

La prise du ciment étant une réaction exothermique, un log de température peut être réalisé environ 24 h après l’injection du coulis ou à divers intervalles de temps ce qui permet de constater la position de la cimentation et son évolution. Des minces passages non cimentés ne peuvent toutefois pas être repérés.

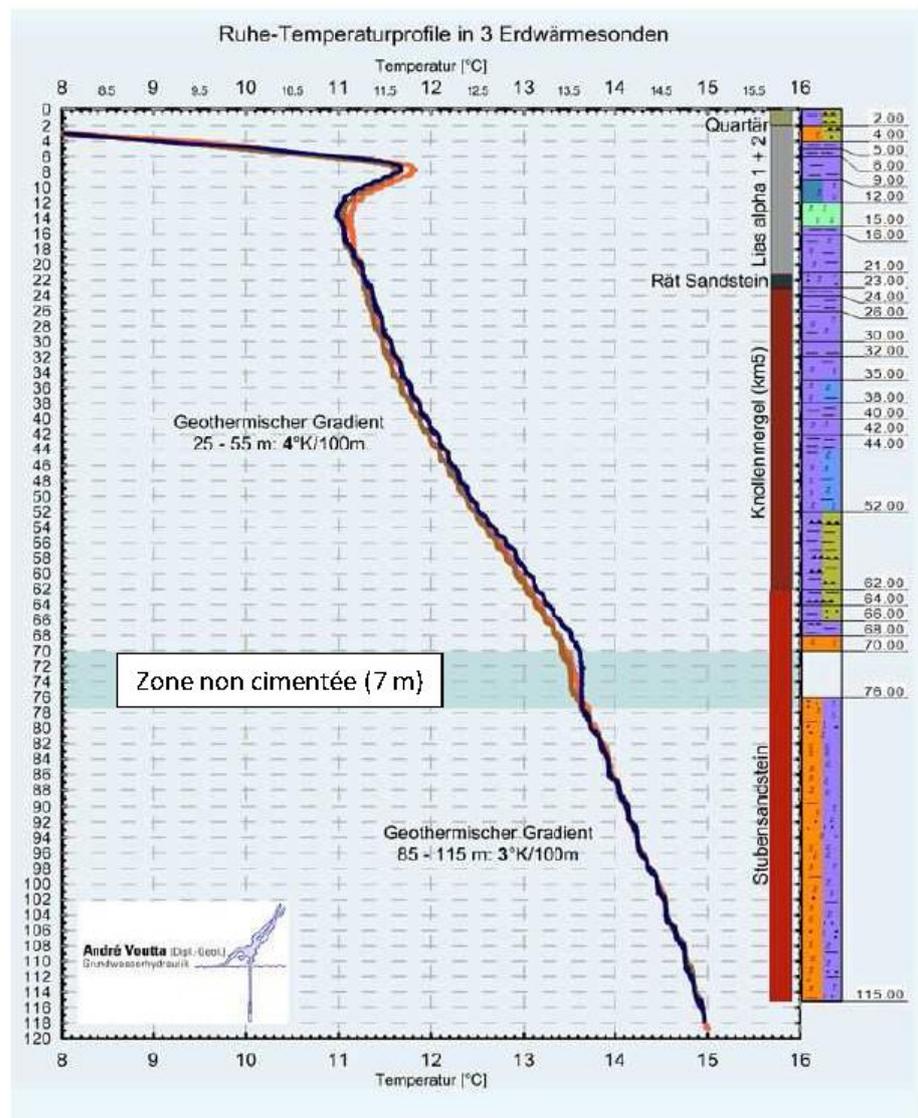


Figure 13 : Contrôle de la présence de ciment par fibre optique

Cette diagraphie peut également être faite pour suivre les injections de ciment lors de travaux de remédiation (voir figure 22).

AKWATERRA

BRGM – Méthodes d'investigation et de remédiations des sondes géothermiques verticales
Etat de l'Art en Allemagne et en Suisse – Rapport R101/A

Une fibre optique peut également être utilisée pour réaliser un log température dans les sondes installées. Des tests ont été effectués dans le cadre du projet allemand Solites pour essayer de détecter des anomalies de cimentation en effectuant un « Enhanced Geothermal Response Tests (EGRTs) ». On utilise ainsi un **câble hybride (fibre optique équipée d'un câble chauffant, Ø 17 mm)** pour mesurer la **conductivité thermique (W/m.K) des terrains** après une phase de chauffe puis de refroidissement. L'essai **n'a pas été concluant**, seules des lacunes totales de cimentation importantes (> 1 m) pourraient être détectées.

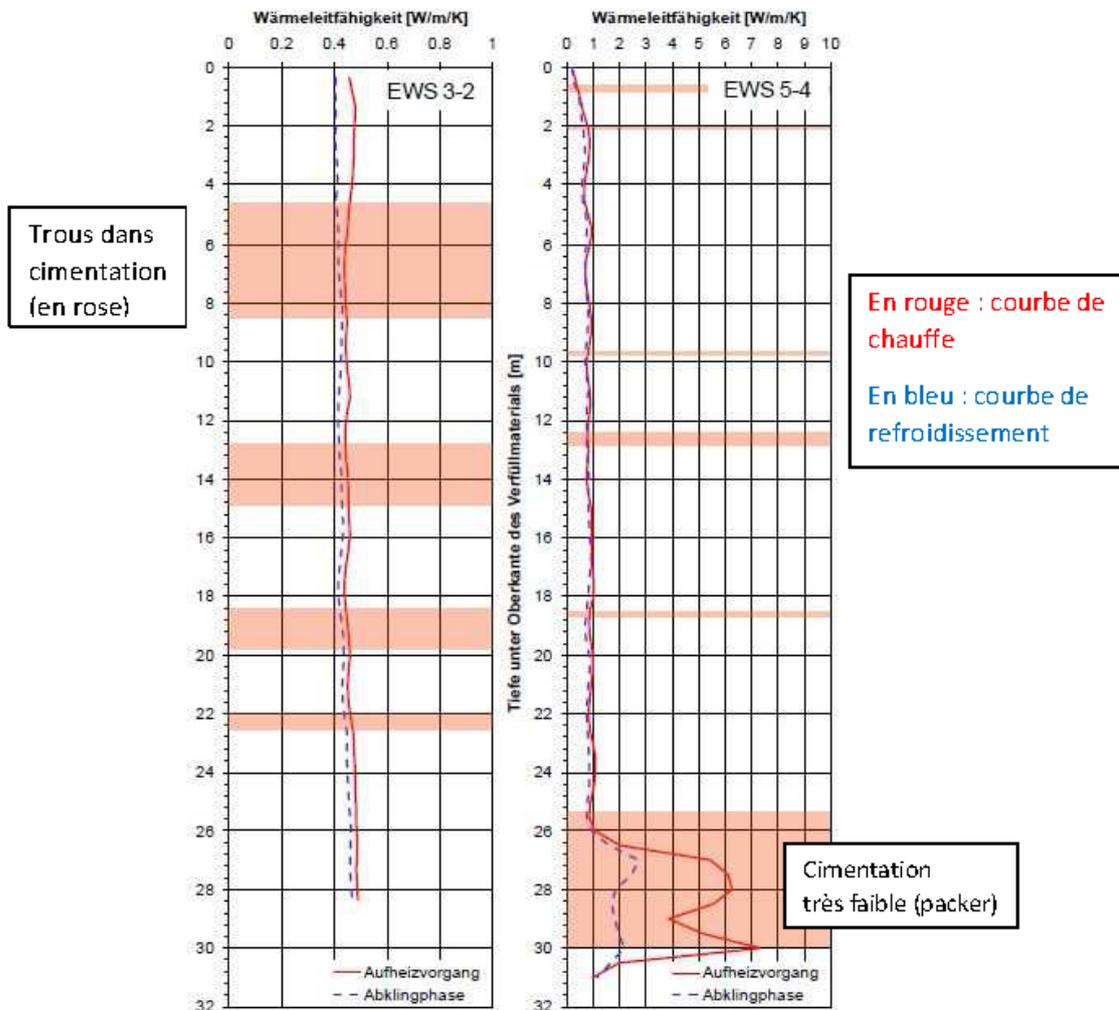


Figure 14 : Log température avec test EGRTs (projet EWSPLUS-Solites)

AKWATERRA

BRGM – Méthodes d'investigation et de remédiations des sondes géothermiques verticales
Etat de l'Art en Allemagne et en Suisse – Rapport R101/A

7.3.4 Log de conductivité

Afin de vérifier le remplissage de l'espace annulaire on pourrait utiliser des sondes qui mesurent la conductivité du terrain à deux profondeurs différentes (sonde type DIL). Le dispositif actuel est trop long mais des recherches sont en cours pour l'adapter aux sondes géothermiques.

7.3.5 Log de densité

7.3.5.1 Mesure de type sonique

L'utilisation de diagraphies de type CBL-VDL classiquement utilisées dans les forages pour des contrôles de la cimentation n'est pas encore possible. La difficulté est de miniaturiser les sondes ce qui entraîne pour l'instant des impulsions électriques de basse fréquence d'où une profondeur d'investigation trop faible.

Une sonde à ultrasons a été développée par un l'institut TU de Darmstadt. Les mesures actuelles ne sont pas totalement satisfaisantes car elles ne peuvent se faire que dans une direction avec un angle de 90°. Toutefois les tests réalisés dans le cadre du projet EWSPLUS-Solites montrent que des imperfections de cimentation peuvent être détectées. Une étude de développement est en cours.



Figure 15 : Prototype sonde à ultra-sons avec fréquence de 1 Mhz
(Institut TU Darmstadt)

AKWATERRA

BRGM – Méthodes d'investigation et de remédiations des sondes géothermiques verticales
Etat de l'Art en Allemagne et en Suisse – Rapport R101/A

7.3.5.2 Mesure de type gamma-gamma

La sonde gamma-gamma utilise une source radioactive (césium 237) qui émet un rayonnement gamma et permet ainsi d'évaluer la densité du terrain en fonction du rayonnement mesuré par un détecteur situé plus haut.

Si cette diaggraphie permet effectivement de repérer des différences de densité, son utilisation est délicate pour deux raisons :

- Règlementation spécifique contraignante pour son utilisation, son stockage et pour le transport,
- Si la sonde doit être abandonnée dans le forage (sonde coincée, rupture du câble), il faudra nécessairement la récupérer sans la détruire.

En Allemagne, c'est principalement le Dr. Voutta qui fait la promotion de cette technique et qui l'utilise pour contrôler la cimentation.



Figure 16 : Sonde température et sonde gamma—gamma Dr. Voutta

Selon une technique sensiblement identique, il est possible de faire une diaggraphie neutron (émission puis réception de neutrons) qui permet de définir la porosité et donc la présence ou non de ciment (sonde disponible pour des tubes de \varnothing ext. 40 mm).

AKWATERRA

BRGM – Méthodes d'investigation et de remédiations des sondes géothermiques verticales
Etat de l'Art en Allemagne et en Suisse – Rapport R101/A

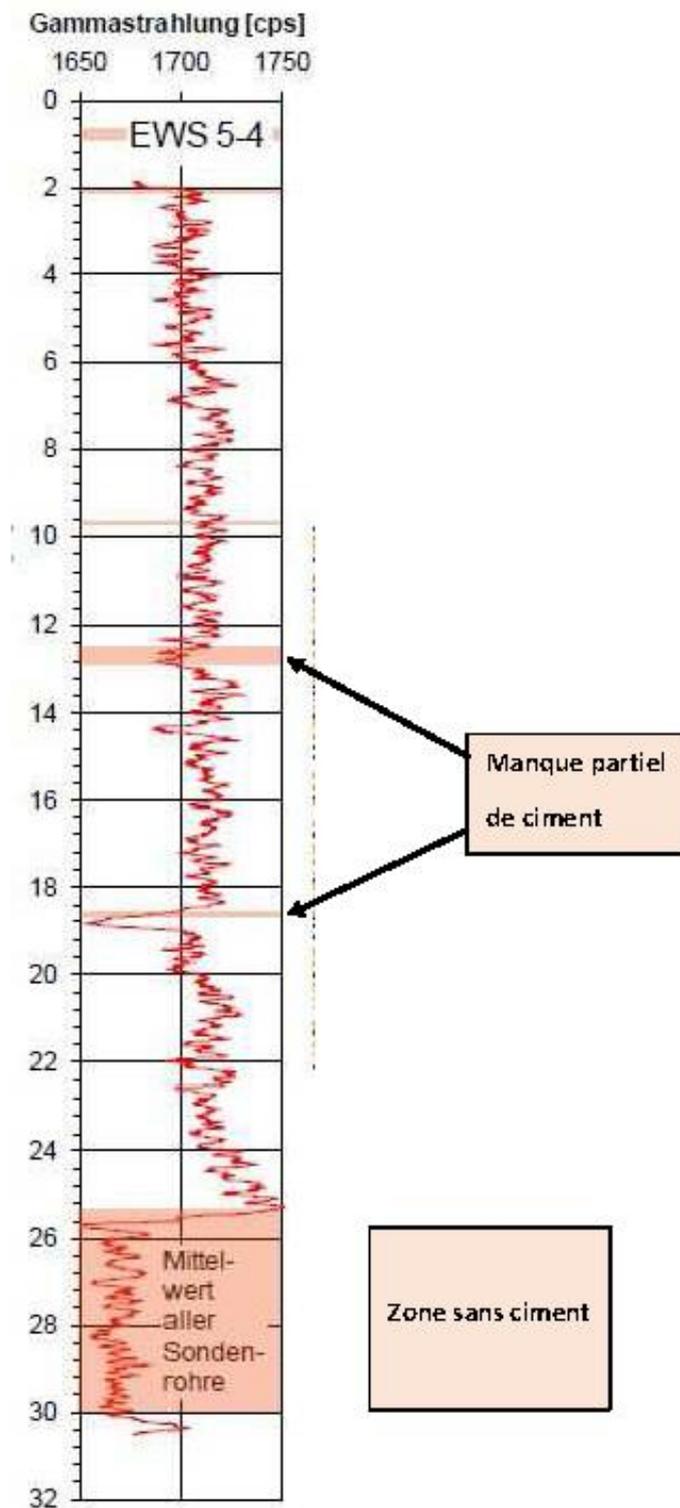


Figure 17 : Log gamma-gamma (Projet EWSPLUS-Solites)

AKWATERRA

BRGM – Méthodes d'investigation et de remédiations des sondes géothermiques verticales
Etat de l'Art en Allemagne et en Suisse – Rapport R101/A

8. Test de réponse thermique (TRT)

Un test TRT de courte durée peut apporter des informations sur la présence de la cimentation. L'essai débute par un log de la température au repos puis circulation d'eau chauffée dans une sonde et logs de température dans la sonde voisine à divers intervalles de temps lors de la chauffe puis du refroidissement (fig.18). En cas de manque de cimentation lié à une circulation d'eau, on ne constatera aucun échauffement du terrain. Le Dr. Voutta utilise cette méthode combinée avec un log gamma-gamma.

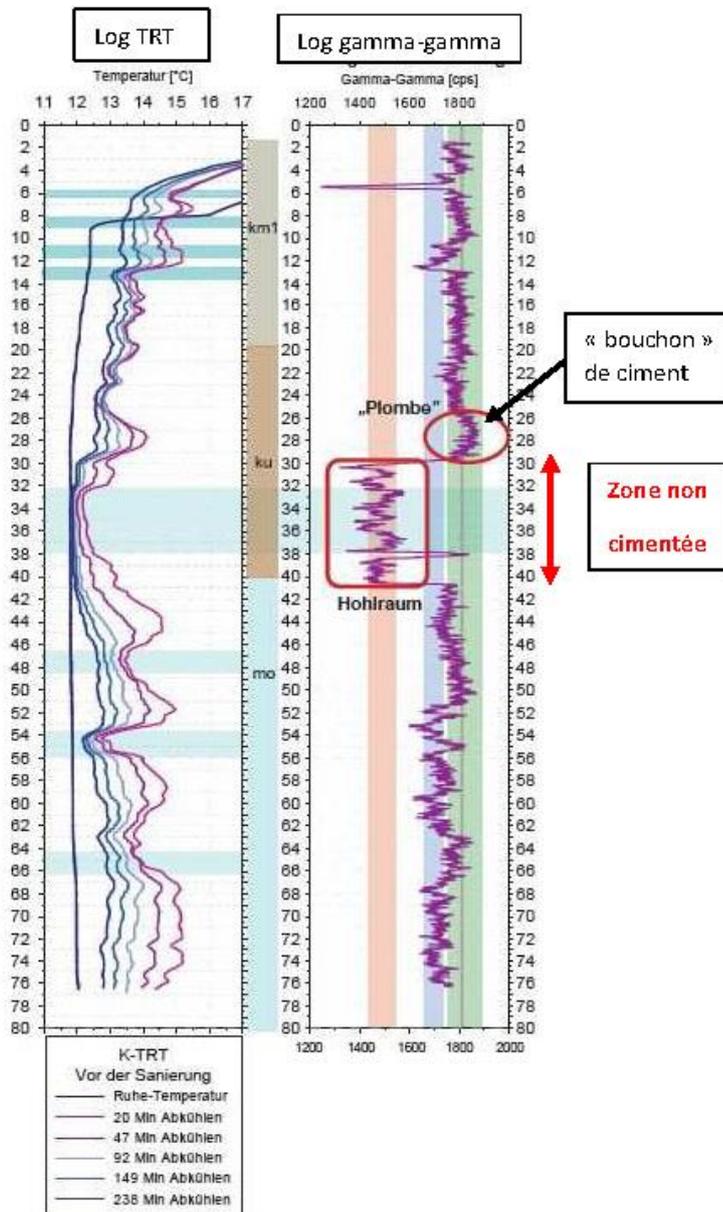


Figure 18 : Test TRT et log gamma-gamma (Dr. Voutta)

AKWATERRA

BRGM – Méthodes d'investigation et de remédiations des sondes géothermiques verticales
Etat de l'Art en Allemagne et en Suisse – Rapport R101/A

9. Inspection de l'état intérieur des sondes

9.1 Propriétés de la mesure

Permet de voir l'état interne des sondes et de constater des pincements ou des remplissages suite à une rupture par exemple. Problème : les sondes étant principalement noires, les déformations sont difficiles à voir.

9.2 Sondes disponibles

Caméra société DMT : longueur 30 cm, \varnothing 18 mm, éclairage avec 12 leds, étanche jusqu'à 15 bars, image vidéo 380 lignes, suivi sur ordinateur portable via port USB, longueur de câble 150 m.



Figure 19 : Caméra DMT

9.3 Projets en cours

- Etudes complémentaires en cours entre Terratec et DMT (société de géophysique)
- Autre projet : projection sur le pourtour interne de la sonde d'un anneau de lumière, puis contrôle de la déformation de cet anneau.

AKWATERRA

BRGM – Méthodes d’investigation et de remédiations des sondes géothermiques verticales
Etat de l’Art en Allemagne et en Suisse – Rapport R101/A

10. Etude comparative de diverses inspections

Le projet de recherche SOLITES EWSPPlus (Steinbeis Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige thermische Energiesysteme –Stuttgart-) du Ministère de l’Economie du Bade-Württemberg mené entre octobre 2007 et février 2012 a étudié divers procédé de contrôle des sondes géothermiques (Ø 32 mm) sur un site expérimental près de Stuttgart. De nombreux tests de sondes ont été réalisés dans des sondes géothermiques équipés volontairement de niveaux non cimentés, soit partiellement, soit totalement. Des essais ont également été effectués avec diverses dispositions de centreurs et d’écarteurs et en utilisant divers ciments.

Cette étude montre :

- une utilisation de sondes les plus miniaturisées possibles est nécessaire afin de pouvoir descendre dans les tubes des sondes géothermiques souvent vrillées et/ou pincées lors de leur pose. Des développements restent à mener pour certains procédés de mesures, notamment dans le cadre de la miniaturisation.
- l’influence primordiale de la position des sondes dans le trou de forage sur le résultat des mesures. En effet, la détection d’une cimentation en place, ne veut pas forcément dire que celle-ci est efficace sur tout son pourtour à partir du moment que des tubes de sondes sont très proches de la paroi du forage. La position des tubes de sonde dépend des équipements mis en place comme le montre la figure ci-dessous (forage en 158 mm) :

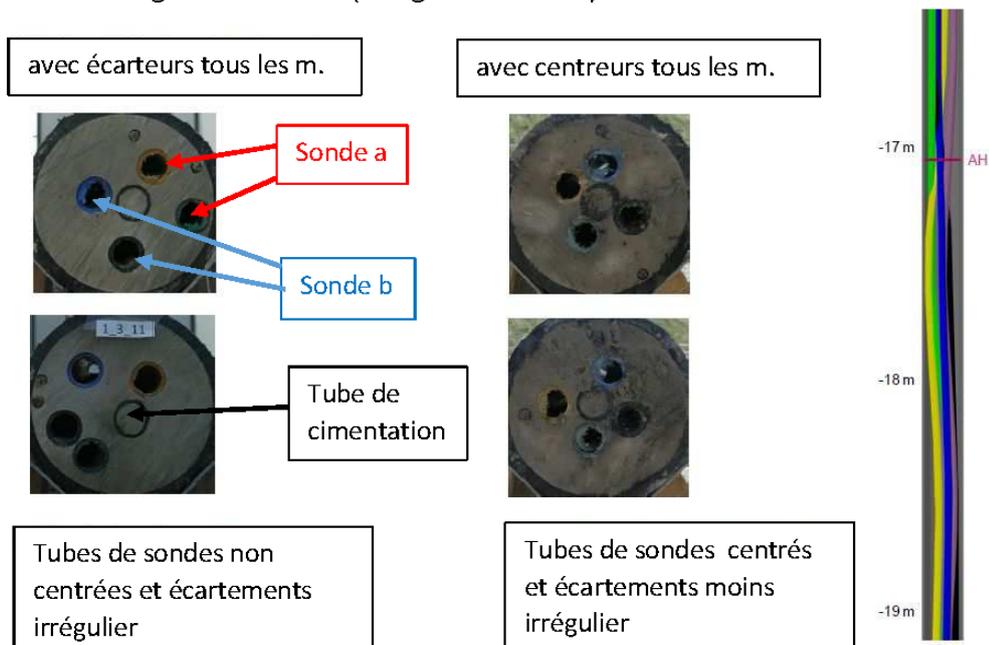


Figure 20 : Influence des équipements sur la position des tubes de sonde

AKWATERRA

BRGM – Méthodes d'investigation et de remédiations des sondes géothermiques verticales
Etat de l'Art en Allemagne et en Suisse – Rapport R101/A



Figure 21 : Ecarteurs et centreurs utilisés (Projet EWSPLUS-Solites)

Ainsi, la pose de centreurs espacés tous les mètres permet d'obtenir une bonne cimentation annulaire.

11. Conclusion sur les reconnaissances possibles

Les procédés suivants ne donnent actuellement pas d'interprétations totalement fiables :

- ✓ Gamma-gamma (de plus utilisation délicate)
- ✓ Fibre optique avec test EGRTs
- ✓ TRT court

Les mesures qui apporteraient des données exploitables avec une utilisation simple et pratique des sondes :

- Log de température pour suivre la prise du ciment ou par la suite lors de problèmes (perturbation du gradient géothermique par circulation d'eau, réaction exothermique dans le cas de transformation d'anhydrite en gypse),
- Gamma-ray pour préciser le contexte géologique
- Susceptibilité magnétique avec ciment ferromagnétique,
- Log de déviation pour connaître la trajectoire du forage

Un nouveau projet appelé EWS-tech poursuit la recherche sur les sondes géothermiques dans le Bade-Wurtemberg avec les instituts Solites, KIT et Eifer avec deux thématiques principales : l'amélioration des coulis de cimentation et la cimentation annulaire.

AKWATERRA

BRGM – Méthodes d'investigation et de remédiations des sondes géothermiques verticales
Etat de l'Art en Allemagne et en Suisse – Rapport R101/A

12. Technique de remédiation

12.1 Surforage d'une sonde

- Le surforage des 5 tubes PE est techniquement difficile,
- Les sondes sont en général déviées, d'où difficulté de « suivre » le précédent forage,
- Opération généralement délicate et sans succès garanti,
- Suite à un surforage : injection d'un coulis de ciment sur toute la hauteur

L'entreprise de forage allemande Burkhardt a réalisé récemment le reforage d'une sonde géothermique verticale qui était à l'origine de désordres à Rudersberg (gonflements de terrain liés à une circulation d'eau vers des niveaux d'anhydrite).

Le procédé mis en œuvre était le suivant :

- Forage en gros diamètres débutés en Ø 630 m pour coiffer les tubes de sonde à l'aide d'un outil spécialement conçu, puis les arracher étant donné qu'ils n'étaient cimentés qu'à mi-hauteur (au préalable, avant l'arrivée de l'entreprise Burkhardt, des câbles acier avaient été cimentés à l'intérieur),
- Poursuivre du dégagement du forage jusqu'au fond à l'aide d'un outil guide en petit diamètre, circulation à la boue,
- Remplissage du forage avec des pellets d'argile.

Ce chantier a nécessité de mettre en œuvre de puissants moyens de forage et le déroulement était complexe (changement successifs de diamètres de forage avec poses de tubage de soutènement, circulation à la boue, conception d'outils spécifiques).

Suite à cette première expérience, un projet d'étude et de mise au point d'une nouvelle technique de surforage, appelée RECOVER-EWS, vient d'être lancée avec l'entreprise Burkhardt, la société enOware et les instituts de recherche KIT et Eifer de Karlsruhe.

L'idée est la suivante :

- Remplissage des tubes de sonde d'une poudre ferro-magnétique,
- Surforage des sondes avec un outil de forage guidé au droit des sondes par susceptibilité magnétique,
- Remplissage du forage par coulis de ciment ou pellets d'argile.

AKWATERRA

BRGM – Méthodes d'investigation et de remédiations des sondes géothermiques verticales
Etat de l'Art en Allemagne et en Suisse – Rapport R101/A

12.2 Extraction d'une sonde

- Dépose par traction : éventuellement possible, fonction de la cimentation réalisée. Réalisable soit en tirant directement sur les sondes, soit sur un câble acier préalablement descendu dans une sonde et fixé par un bouchon de ciment.
- Opération délicate, peu de chance de succès,
- Risque de rupture de la sonde à une profondeur quelconque et on ne pourra ensuite plus intervenir dans les tubes restants.

12.3 Injection d'un coulis de cimentation par les sondes

12.3.1 But

- Etancher l'annulaire pour stopper des circulations d'eau
- Remplissage de cavités naturelles ou formées par dissolution de matériaux en place (évaporites) suite à une circulation d'eau provoquée.

12.3.2 Procédé

- Découpe de la sonde à un ou à plusieurs niveaux
- Puis injection d'un coulis adapté à haute pression

12.3.3 Outils de coupe

- Tête de découpe avec une ou plusieurs buses inox (\emptyset minimum env. 7 mm) fixées à l'extrémité d'un tuyau souple haute pression. L'eau injectée à très haute pression (jusqu'à 1 000 bars avec un faible débit, environ 200 l/h) coupe le tube de sonde (documentation de la holding Keller). Seul dispositif valable actuellement en Allemagne.
- Des outils avec des couteaux ont été développés : peu fiables, perte des lames.

12.3.4 Injection du coulis

- Etude sur le ciment à mener : ciment sur-sulfaté dans le cas d'évaporites sulfatées, à prise rapide et brève comme ceux utilisés dans le monde pétrolier.
- Découpe d'une sonde à la base de la zone à injecter. En cas d'incertitude, découpe systématique par intervalle régulier.

AKWATERRA

BRGM – Méthodes d'investigation et de remédiations des sondes géothermiques verticales
Etat de l'Art en Allemagne et en Suisse – Rapport R101/A

- Test de circulation d'eau : si positif → injection du coulis, si négatif, découpe au niveau de la tranche supérieure à injecter plus haut et ainsi de suite. Dans le cas, où l'interprétation des diagraphies réalisées est incertaine, on peut se fixer un intervalle régulier pour effectuer des coupes et tester par circulation d'eau,
- Remplissage de la sonde avec de l'eau et test de pression pour vérifier la circulation, puis évacuation de l'eau,
- Remplissage avec du coulis et injection avec suivi de la pression, Mesure de la température dans un tube de sonde voisin ce qui permet de suivre l'évolution de l'injection (graphique en figure 22),
- Courte attente, puis nettoyage de la sonde à l'eau,
- Découpe de la sonde au droit du prochain intervalle à injecter et ainsi de suite.

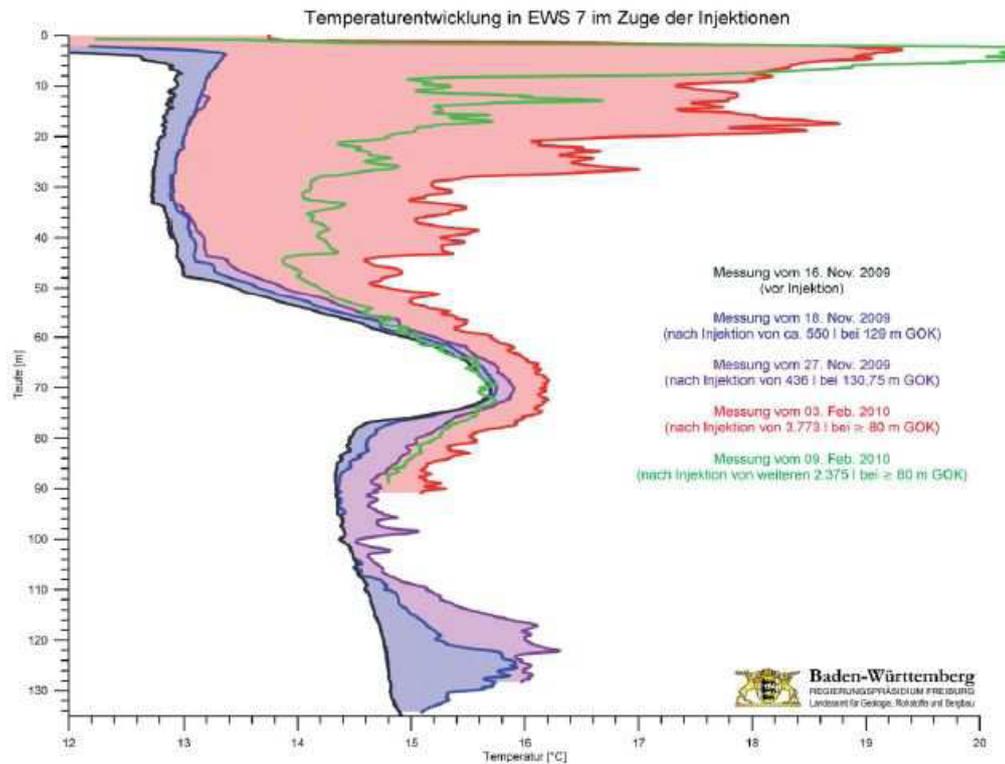


Figure 22 : Evolution de la température suite à l'injection de ciment (Staufen)

AKWATERRA

BRGM – Méthodes d'investigation et de remédiations des sondes géothermiques verticales
Etat de l'Art en Allemagne et en Suisse – Rapport R101/A

13. Conclusion générale

Suite à de nombreux désordres constatés après la réalisation de sondes géothermiques (gonflement de terrains, tassements, tarissement de sources ...), de nombreuses recherches ont été effectuées notamment en Allemagne pour développer des procédés de mesure et des outils adéquats.

Un important programme de recherche a été mené entre 2007 et 2012 près de Stuttgart (Projet EWSPLUS-Solites).

Ces études montrent que les techniques de contrôle des sondes ne donnent pas toujours des résultats satisfaisants et que les travaux de reconnaissance puis de remédiation peuvent être longs, difficiles et très onéreux.

Aussi, pour minimiser les risques de désordres, il faut dès le début des travaux de sondes géothermiques respecter les points suivant :

- Bonne formation du foreur,
- Documentation complète des travaux à effectuer lors du forage (échantillonnage, suivi du niveau d'eau, vitesse d'avancement ...),
- Suivi des travaux par un géologue et diagraphie gamma-ray en trou nu en cas de terrains à risques (zones à évaporites, aquifères superposés, terrains faillés ...),
- Pose de centreurs à intervalles réguliers (1 m) le long des sondes. *Cette mesure est primordiale pour s'assurer une cimentation annulaire régulière sur toute la circonférence du forage.*
- Lors de l'injection du coulis de ciment, enregistrement des pressions et des volumes, suivi de la remontée du ciment à l'aide d'une sonde, utilisation d'un ciment spécifique de type ferromagnétique pour faciliter le suivi et la détection ultérieure.

Il reste encore des progrès à faire pour miniaturiser certaines sondes et en développer d'autres (sonde ultra-sons, diagraphies électriques à diverses profondeurs d'investigations, gyroscope pour mesure de la déviation horizontale si ciment ferromagnétique, sonde sonique de type CBL-VDL ...).

La technique de remédiation pour étancher des sondes qui a apporté de bons résultats consiste à couper des tubes de sondes à diverses hauteurs et à injecter un coulis de ciment sous pression.

Le surforage des sondes est délicat et nécessite de gros moyens de forage. Un projet de développement de cette technique est en cours.

Dans certains cas, des pompages de rabattement du niveau d'eau périphériques peuvent s'avérer nécessaire.

AKWATERRA

BRGM – Méthodes d'investigation et de remédiations des sondes géothermiques verticales
Etat de l'Art en Allemagne et en Suisse – Rapport R101/A

ANNEXES :

ANNEXE 1 : Liste d'adresses

ANNEXE 2 : Fiche de sondes de suivi de la cimentation

- CemTrakker – susceptibilité magnétique
- MES 2 Edward Michalik
- MAT Mischanlagentechnik GmbH

ANNEXE 3 : Fiche de sondes de mesures

- Sonde température Terratec TTTS
- Sonde combinée gamma-ray/température Terratec MGAMT
- Sonde de déviation Terratec MBDV
- Sonde de susceptibilité magnétique SENSYS (2 pages)

ANNEXE 4 : Fiche des ciments spécifiques

- GWE : Troptogel C
- SCHWENK : Füllbinder EWM plus
- SCHWENK : Füllbinder H-hs plus

Annexe 10

Compte-rendu de la réunion du comité de suivi du 04.03.15

CG 88/10 PM/MP

COMPTE-RENDU	
Opération : REMEDIA-FOR	Numéro : PDR14DGR13
Objet : Réunion d'avancement	
Date de la réunion : 4 mars 2015 Rédacteur : P. Monnot	Lieu : ADEME Strasbourg
<p>Participants :</p> <p>BRGM :</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Anne-Valérie Barras av.barras@brgm.fr ✓ P. Monnot (BRGM) p.monnot@brgm.fr <p>ADEME :</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Norbert Bommensatt (ADEME) : norbert.bommensatt@ademe.fr <p>AFPG :</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Christian Boissavy : christian.boissavy@orange.fr ✓ Virginie Schmidlé-Bloch : virginie.schmidle@afpg.asso.fr <p>BE :</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Charles Frey (Akwaterra) : charles.frey@akwaterra.fr ✓ Laurent Glady (Camexplo) : contact@camexplo.fr ✓ Grière (G2h-Conseils) : g2hconseils@sfr.fr <p>Expert construction :</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Jean-Marc Weider (ACOTEX) : jm.weider@acotex.fr <p>Foreurs :</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Etienne Gatelier (SADE) etienne.gatelier@sade-cgth.fr 	
<p>Excusés :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bernard Sustrac (LAVIOSA – MPC) bernard.sustrac@mpcfr.com • Régis Eme (Mannfor) eme@mannfor.eu • Julien Fabiano (MCCF) julien.fabiano@mccf.fr • Benoit Spittler Benoit.Spittler@developpement-durable.gouv.fr : <i>Chargé de mission "géothermie et forages", MEDDE - MRP/ DGALN/DEB/GR</i> • Serge Resnikow (LAVIOSA – MPC) serge.resnikow@mpcfr.com • Ludovic Reynaert (MASSE) forages.masse@wanadoo.fr • Eric Gerardin (COFOR) eric.gerardin@cofor.com • Alexis Guttierrez a.gutierrez@brgm.fr • JP Cuny jpcuny@wanadoo.fr • Sebastien Vauthrin sebastien.vauthrin@vauthrin-forages.fr • Joel Sillard (SADE) sillard.joel@sade-cgth.fr 	

Diffusion pour information :

JY Hervé (Forage assistance) forage.assistance@gmail.com

Sanjuan Bernard (BRGM) : b.sanjuan@brgm.fr

Dominique Midot (BRGM) : d.midot@brgm.fr

Eric GARROUSTET (SGEG) : garroustet@sfeg-forages.fr

Philippe Laplaige (ADEME) : philippe.laplaige@ademe.fr

Annexé au présent compte-rendu : Présentation de Ch. Frey (Akwaterra) des travaux menés dans le cadre du projet REMEDIA-FOR : « Etat de l'art sur les méthodes d'instrumentation et de remédiation pour les SGV développées en Allemagne et en Suisse »

ORDRE DU JOUR

- Présentation par Charles Frey (AKWATERRA) de l'état de l'art sur les méthodes d'instrumentation et d'investigation de SGV en Allemagne et en Suisse ;
- Présentation par Laurent Glady (CAMEXPLO) des deux prototypes de sonde de température et de caméra en cours de développement dans le cadre du projet REMEDIA-FOR ;
- Planning et suites des opérations.

Actions	Responsable	Délai
<ul style="list-style-type: none"> – Reprendre contact avec M. Watzel. Objectif : les rencontrer pour discuter de cas spécifiques en Allemagne et des techniques de remédiation sur SGV et voir les possibilités de lancer des travaux de recherche mutuels (projet Solithes) – liaisons avec Offenburg – KIT : reprendre contact 	Av. Barras	Mars 2015
<ul style="list-style-type: none"> – Contacter Philippe Steinmann (EPFL) Augsburger (problèmes gel – dégel) – Contacter Burkhard Sanner : le mettre dans la boucle 	P. Monnot	Mars 2015
Prévoir une réunion téléphonique avec SOLEO	Av. Barras P. Monnot	Mars 2015
<ul style="list-style-type: none"> – Prévoir une intervention de CAMEXPLO sur la plateforme géothermique du BRGM puis pour tester la sonde de température et la caméra (2 prototypes de caméra : étanche et non étanche, disponibles pour fin mars). Voir si possible de vider les sondes sur la plateforme du BRGM. 	P. Monnot L. Glady	Mars – avril 2015
<ul style="list-style-type: none"> – Envoyer au BRGM un rapport sur la description des outils développés et travaux réalisés 	L. Glady	Dès la finalisation des prototypes et des essais in-situ

<p>– Poursuivre le traitement du cas de Kirsheim : voir la possibilité de réaliser des mesures in-situ par CAMEXPLO (caméra et sonde de température) et voir si possible de réaliser des mesures comparatives avec la sonde TERRATEC</p>	<p>Jm. Weider Av. Barras</p>	<p>Avril 2015</p>
<p>– Poursuivre le traitement du cas de Storengy. Mm. Weider enverra un dossier du cas de Kircheim à LAVIOSA pour pouvoir traiter ce cas</p>	<p>Jm. Weider B. Sustrac</p>	
<p>– Prochaine réunion : elle sera fixée en fonction de l'avancée des résultats des investigations menées sur la plateforme gth du BRGM et sur le site de Kirsheim</p>		

Présentation Charles Frey

« Etat de l'art sur les méthodes d'instrumentation et de remédiation pour les SGV développées en Allemagne et en Suisse »

Notes prises sur les discussions du GT (se rapporter au document annexé pour plus de précisions) :

JM. Weider (Acotex) : demande de préciser les diamètres des boucles de sondes utilisées sur les 8 chantiers connus en Allemagne

Diagraphie Gamma Ray :

- Permet de différencier des argiles des calcaires.
- Ne fonctionne pas avec les ciments classiques, mais fonctionne avec les ciments « gamma activés » chargés en zirconium.
- Questions : prix d'un ciment chargé en zirconium ? + à quel niveau cette méthode est-elle imposée en Allemagne ?

Diagraphies Gamma Gama :

- Source radioactive : problèmes de législation
- Cette méthode semble anecdotique

Autres diagraphies possibles mais pas forcément miniaturisable

Mesures déviation :

- Imposé dans le canton d'Argovie en Suisse. La mesure se fait dans les tubes de sonde.
- Cette méthode fonctionne et est opérationnelle

Suivi du niveau d'eau et de sa qualité :

- Objectif : déterminer le niveau d'eau dans un tube de sonde (qui fuit par exemple et qui est en relation avec l'aquifère et qui reflèterait le niveau de la nappe) à l'aide d'une sonde de niveau placée dans le tube de sonde.
- Cette approche semble théorique, pas de retour d'expérience sur le terrain.

Mesure température :

- Les mesures de températures peuvent être réalisées :
 - durant les travaux : mesure de la prise du coulis (réaction exothermique) et contrôle de la bonne qualité de la cimentation ;
 - Après les travaux : objectif voir influence variation températures qui pourraient être corrélées avec des écoulements préférentiels d'eau. Pas corrélable à mon avis sur la présence ou non de ciment.
- Cette méthode fonctionne et est opérationnelle

Mesure niveau de coulis lors de la cimentation :

- Mesure de la remontée du coulis : fonctionne avec un coulis chargé en zirconium (on mesure le signal magnétique lors de la remontée de la sonde) ;
- Les autres sondes sont plus improbables.
- Cette méthode semble compliquée à mettre en œuvre...
- Contrôle de l'injection par fibre optique : mesure de la température sur toute la hauteur

Mesure après prise coulis :

- Gamma – Ray : méthode Schwenk

Mesures conductivité électrique :

- Cette méthode semble trop longue à mettre en œuvre

Remédiation :

Coupe de tube et injection de coulis : la zone défailante est repérée et le tube de sonde est découpé avec un jet de très haute pression. Le coulis est ensuite injecté pour remplir la zone défailante

DOCUMENT INTERNE AU GROUPE DE TRAVAIL

Annexe 11

Rapport Camexplo (2015)

Conception de nouveaux outils d'inspection vidéo et de mesure de la température pour investiguer les tubes de sondes géothermiques de 32 mm de diamètre (extérieur)

CAMEXPLO
à la découverte de l'inaccessible

• exploration robotique • inspection vidéo

Rapport sur la conception de nouveaux équipements d'inspection vidéo et de contrôle de température

REMEDIA-FOR



CAMEXPLO
à la découverte de l'inaccessible

• exploration robotique • inspection vidéo

Préambule :

De nombreux incidents entraînant des dommages importants sur les habitations ont été constatés à proximité de forages contenant des sondes géothermiques. Des défaillances dans la mise en œuvre ou à la suite de l'exploitation de ces sondes sont envisagées.

Différents contrôles comme des inspections vidéo ou des contrôles de températures sont nécessaires pour valider cette hypothèse, mais le matériel disponible sur le marché n'est pas toujours adapté pour effectuer ces vérifications. En effet, les sondes à contrôler ont un diamètre de 26 mm et peuvent atteindre une profondeur de 100 mètres, voir plus.

Ainsi, la société CAMEXPLO a été mandatée en décembre 2014 par le BRGM (en collaboration avec l'ADEME) pour réaliser l'étude et la conception de sondes de température et de caméras vidéo spécifiques. Ces équipements devront être de taille très réduite (de l'ordre de 5 à 10 mm) afin de pouvoir être facilement introduits dans ces sondes pour apporter des réponses.

Cette étude s'inscrit dans le projet REMEDIA-FOR.

CAMEXPLO
à la découverte de l'inaccessible

• exploration robotique • inspection vidéo

Sonde de température :

- Conception, réalisation, tests et résultats:

Après avoir testé différentes sondes de température, j'ai porté mon choix sur une sonde étanche de 5 mm en acier inoxydable. Cette sonde de type K fonctionne parfaitement à toutes les profondeurs, après un calibrage de 10 minutes au minimum.

En premier lieu, j'ai utilisé un câble en cuivre de type 3 fils + masse de 150 m pour connecter la sonde étanche, mais les tests ont montré que ce câble est extrêmement sensible à la température ambiante. Sa résistivité varie ainsi fortement et les relevés effectués ne sont pas fiables.

Grâce à cette constatation, le câble a été remplacé par un câble compensé de type K en PVC blindé de 150m possédant la propriété de rester neutre et stable jusqu'à 80°.

Un autre problème a été constaté : Pour des raisons pratiques, un collecteur tournant a été adapté sur le dévidoir de câble permettant de dérouler ou d'enrouler facilement le câble tout en restant connecté sur l'appareil de mesure. Mais les valeurs relevées n'étaient une fois de plus pas fiables ; en cause le collecteur tournant. Ce collecteur est composé de contacts en or et de fils en cuivre dont la résistivité est très sensible à la température ambiante. En conséquence le collecteur a été retiré et le câble doit être déroulé avant l'intervention.

Conclusion: plusieurs mois de recherche et de nombreuses modifications ont permis de confectionner une sonde de température de taille réduite (5mm) qui répond aux critères définis.

Les tests ont également permis de définir une procédure pour une mise en œuvre efficace.

L'efficacité de ce nouvel équipement a été démontrée lors des tests réalisés notamment au BRGM d'Orléans ou sur le site de Kirchheim en Alsace.

Ainsi à Kirchheim, sept sondes géothermiques ont été contrôlées sur une profondeur comprise entre 50 et 110 m.

Ce contrôle a permis de comparer la température relevée avec le gradient historique et d'identifier des anomalies comme notamment des augmentations significatives de plusieurs degrés sur une profondeur comprise entre 50 et 70 m, ce qui pourrait éventuellement expliquer le mouvement du terrain...

- Spécifications :

Applications	Milieux liquides, piscines, cuves, fûts
Température max (capteur)	90 °C
Temps de réponse	(65 % de la valeur finale) 10 secondes, dans un liquide
Sonde	Acier inoxydable, L 50 mm x Ø 5 mm
Câble	150 m, en PTFE (température maxi 80 °C)
Précision	0,5°C

CAMEXPLO
à la découverte de l'inaccessible

• exploration robotique • inspection vidéo

Sonde de température, vue de dessus



Sonde de température, vue de face



CAMEXPLO
à la découverte de l'inaccessible

• exploration robotique • inspection vidéo

Sonde de poussée en fibre (en jaune) avec la sonde de température (en vert)



Mise en place de la sonde de température dans la sonde géothermique



CAMEXPLO
à la découverte de l'inaccessible

• exploration robotique • inspection vidéo

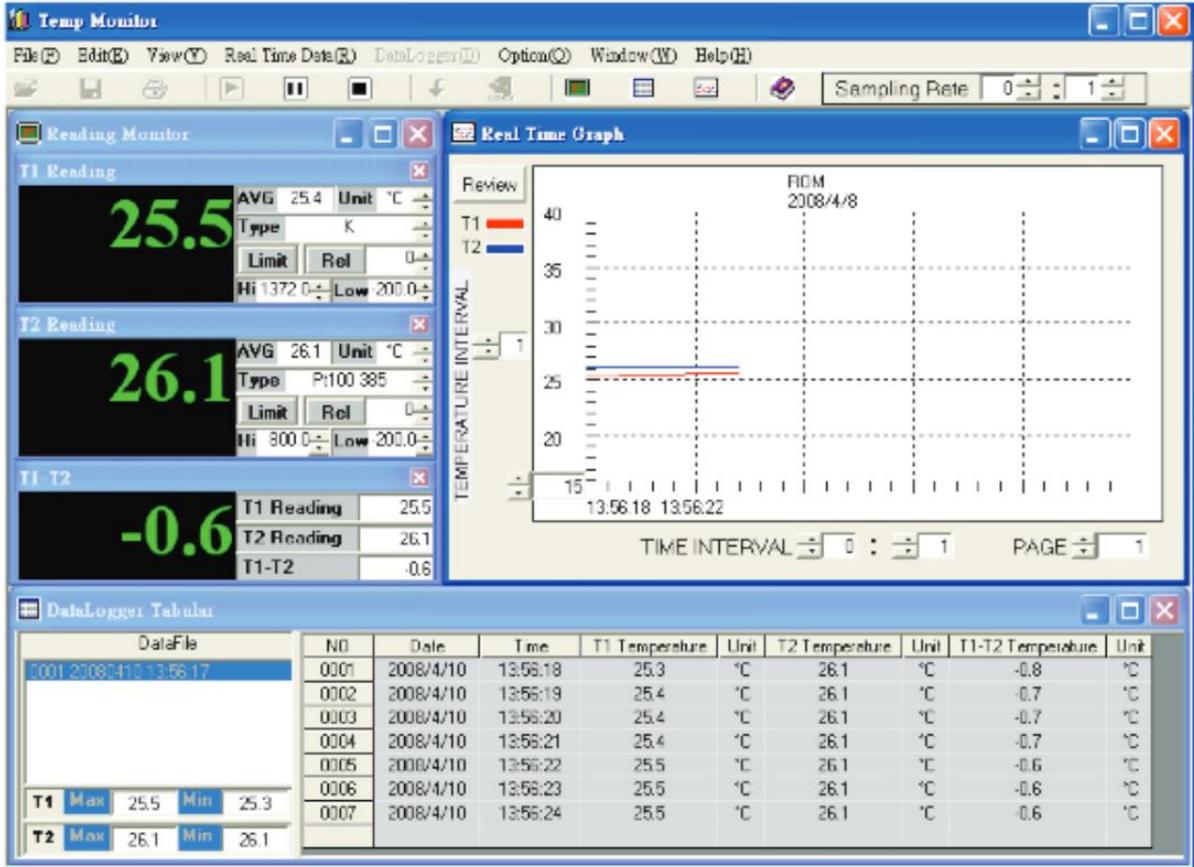
Thermomètre enregistreur



CAMEXPLO
à la découverte de l'inaccessible

• exploration robotique • inspection vidéo

Enregistrement des paramètres sur PC



CAMEXPLO
à la découverte de l'inaccessible

• exploration robotique • inspection vidéo

Caméras d'inspection:

- Conception, réalisation, tests et résultats:

Les inspections vidéo de sondes géothermiques de 26 mm nécessitent des caméras de petite dimension avec des performances particulières. Les tests des caméras sur le marché concernant l'optique, la mise en œuvre, la taille et le prix, m'ont permis de cibler le modèle adapté.

Le choix s'est porté sur une caméra non étanche (IP67*) de 8mm de diamètre en couleur et en haute définition (1280*720). Son éclairage à LED sera plus tard renforcé par un éclairage additionnel.

Pour optimiser les résultats des tests, j'ai confectionné cinq systèmes de caméra, trois étanches et deux non étanches. Elles auront des dimensions comprises entre 8 et 17 mm de diamètre.

Chaque caméra est confectionnée avec des équipements différents, ce qui permet de les valider et de réaliser le cas échéant une caméra hybride reprenant le meilleur de chaque équipement testé.

Ces caméras sont équipées d'un câble de 120 m. Au-delà, les tests montrent une dégradation de la qualité vidéo. L'ensemble est enroulé sur des dévidoirs à collecteur tournant.

Chaque système caméra est équipé d'une batterie de 6,6 V et de 2200 mAh dont l'autonomie atteint les 7 heures pour les caméras sans éclairage additionnel et 4 heures pour les caméras avec éclairage additionnel.

Les trois caméras étanches sont composées des éléments suivants :

- La caméra de 8 mm d'une longueur comprise entre 11 et 14 cm selon le modèle
- Un tube en plastique de 16 mm de diamètre assurant la protection mécanique et l'étanchéité pour l'une des caméras
- Deux tubes en aluminium de 12 et 16 mm assurant la protection mécanique et l'étanchéité pour les deux autres caméras
- Une vitre en saphir ou en plexiglas
- Un presse étoupe à la norme IP68 ou IP69 (étanche à la pression)
- Un crochet pour la fixation de la fibre de poussée (uniquement sur une caméra avec le corps en plastique)

Les deux caméras non étanches sont composées des éléments suivants :

- La caméra de 8 mm d'une longueur comprise entre 5 et 14 cm selon le modèle
- Un tube en plastique de 16 mm de diamètre pour la protection mécanique sur l'une des caméras
- Un centreur souple de 15 mm sur l'autre caméra
- L'éclairage additionnel
- Un crochet pour la fixation de la fibre de poussée (uniquement sur une caméra)
- Des fils de centrages

Les essais montreront que la qualité optique des caméras non étanches est légèrement supérieure à celle des caméras étanches.

* IP67 : étanche aux projections d'eau et immersible jusqu'à 1 m de profondeur

CAMEXPLO
à la découverte de l'inaccessible

• exploration robotique • inspection vidéo

Caméras d'inspection suite...

Les premiers tests en atelier ont été réalisés dans un tube PVC gris foncé. Afin de tester l'efficacité des caméras, j'ai endommagé ce tube par un trait de scie, un percement et un écrasement.

Les vidéos prises avec la caméra de 8 mm dans ce tube (avec et sans eau) sont de très bonne qualité, les dommages sont parfaitement visibles et l'éclairage est suffisant.

Par contre, les tests de caméra effectués dans la sonde du BRGM d'Orléans n'ont pas tous été concluants. Toutes les caméras ont été introduites dans la sonde de test. Les parois sont visibles tant qu'elles ne sont pas immergées mais une fois dans l'eau glycolée, l'image devient floue et il est très difficile de distinguer les parois de la sonde. (Constatation confirmée par mes soins en atelier dans un tube de test avec 5% de glycol seulement.)

Les caméras étanches ont donc été introduites jusqu'au fond de la sonde, soit 93 m, et deux caméras étanches sur les trois ont résisté à une pression de 9,3 bars.

Au vu des résultats dans le glycol, une sonde de Kirchheim a été rincée à grande eau afin de tester une caméra étanche dans de l'eau claire. Malgré ce rinçage, nous constatons le même résultat qu'au BRGM d'Orléans, à savoir une image floutée et sombre, probablement dû à un reste de glycol (comme le montre la vidéo lors de la remontée).

Nous avons également constaté que l'éclairage des caméras étanches et non étanches n'était pas suffisant pour observer la paroi non immergée des sondes de Kirchheim; certainement dû à la couleur noire des sondes. En comparaison, sur la sonde de test bleue du BRGM d'Orléans, la paroi non immergée est nettement plus visible.

Sur recommandation de Mme Barras, j'ai réalisé un éclairage additionnel sur les deux caméras non étanches qui est particulièrement puissant et n'augmente pas le diamètre du centreur de la caméra.

Au vu de tous ces éléments, sept sondes de Kirchheim ont été purgées avec de l'air comprimé afin d'y effectuer des tests avec une caméra non étanche munie d'un éclairage additionnel.

L'inspection vidéo du 22 Mai 2015 sur ce site a démontré l'efficacité de ce procédé. Les caméras sont bien centrées, l'image est nette et les parois sont parfaitement visibles. Nous avons atteint les 95 m dans la sonde S2A et les 50 m dans les sondes S1A et S1D où nous avons pu visualiser un blocage apparemment dû à une forte ovalisation de la paroi.

Dans la sonde S2A, on déplorera la perte d'une caméra restée bloquée vers 95 m. Le câble d'alimentation s'est rompu au niveau d'une jonction et toute remontée avec la fibre de poussée est devenue impossible; cette caméra et la fibre de poussée seront abandonnées. Fort de cette expérience, toutes les caméras seront équipées d'un câble d'un seul tenant, et ce problème ne devrait plus se reproduire...

La prochaine évolution consisterait à réunir, dans un seul câble, la caméra, les fils d'alimentation et la fibre de poussée.

CAMEXPLO
à la découverte de l'inaccessible

• exploration robotique • inspection vidéo

Vue sur la caméra non étanche de 17 mm de diamètre avec son éclairage additionnel à quatre LED et ses fils de centrage, fixée sur la fibre de poussée.



Mise en place de cette caméra dans une sonde à Kirchheim



CAMEXPLO
à la découverte de l'inaccessible

• exploration robotique • inspection vidéo

Caméra non étanche de 16 mm de diamètre avec son éclairage additionnel à quatre LED et ses fils de centrage. Dévidoir de 120m de câble.



Caméra non étanche de 8 mm de diamètre, fixée sur la fibre de poussée.



CAMEXPLO
à la découverte de l'inaccessible

• exploration robotique • inspection vidéo

Caméra étanche en aluminium de 16 mm de diamètre sur son dévidoir avec 120 m de câble.



Introduction de cette caméra dans la sonde géothermique au BRGM d'Orléans.



CAMEXPLO
à la découverte de l'inaccessible

• exploration robotique • inspection vidéo

Caméra étanche de 12 mm de diamètre en aluminium munie de centreurs. Dévidoir de 120m de câble.



Caméra étanche de 16 mm de diamètre en plastique sur son dévidoir de 120m de câble.



CAMEXPLO
à la découverte de l'inaccessible

• exploration robotique • inspection vidéo

Le dévidoir de la caméra avec la fibre de poussée.



Caméra étanche dans le glycol, sans commentaire...

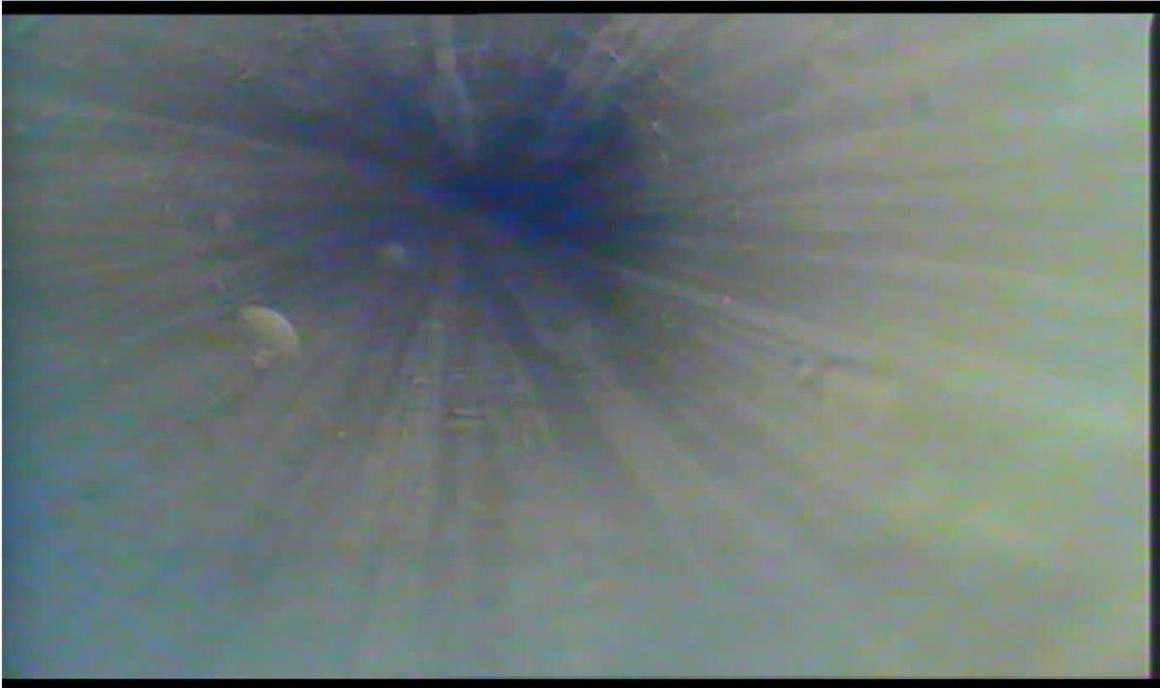


CAMEXPLO
à la découverte de l'inaccessible

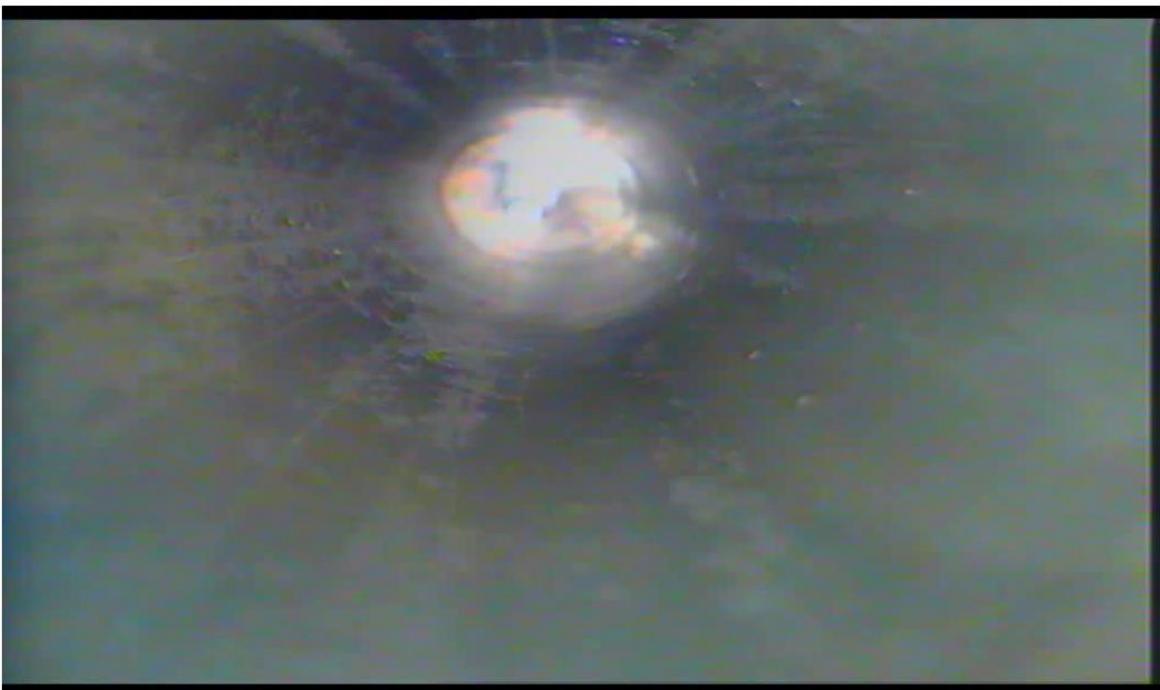
• exploration robotique • inspection vidéo

Image prise dans une sonde à Kirchheim avec la camera non étanche munie de son éclairage additionnel.

On aperçoit des gouttelettes de glycol sur la paroi.



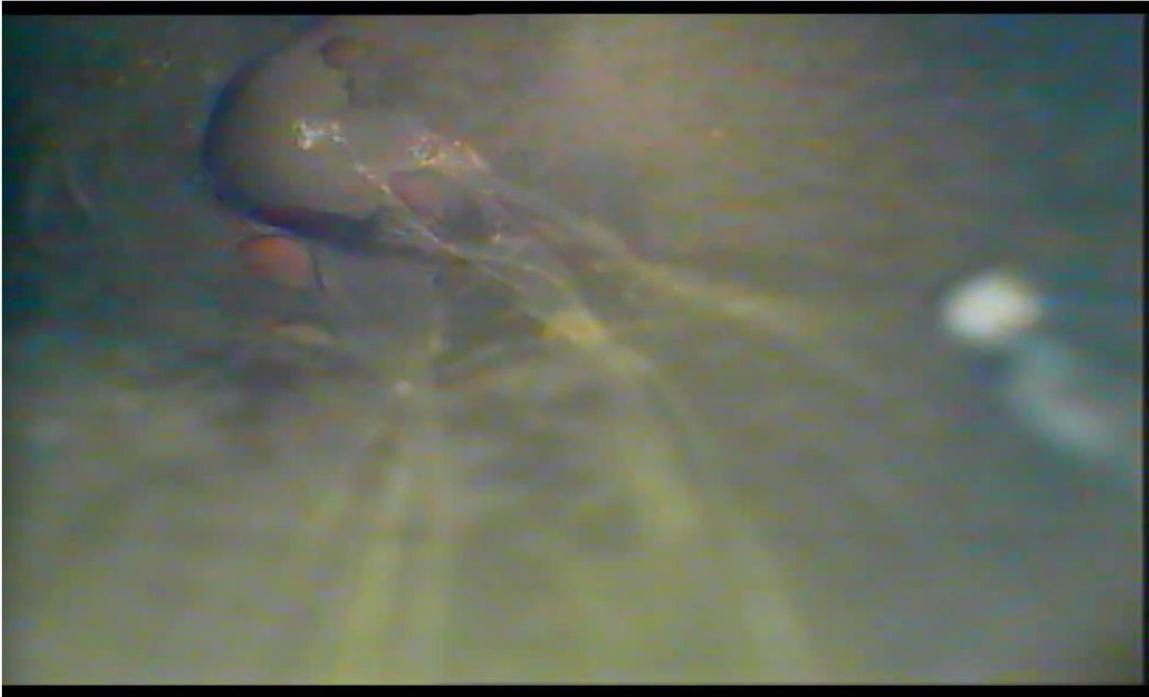
Nouvelle vue dans une sonde à Kirchheim avec la Camera non étanche munie de son éclairage additionnel. En approche d'un reste de glycol à 95 mètres.



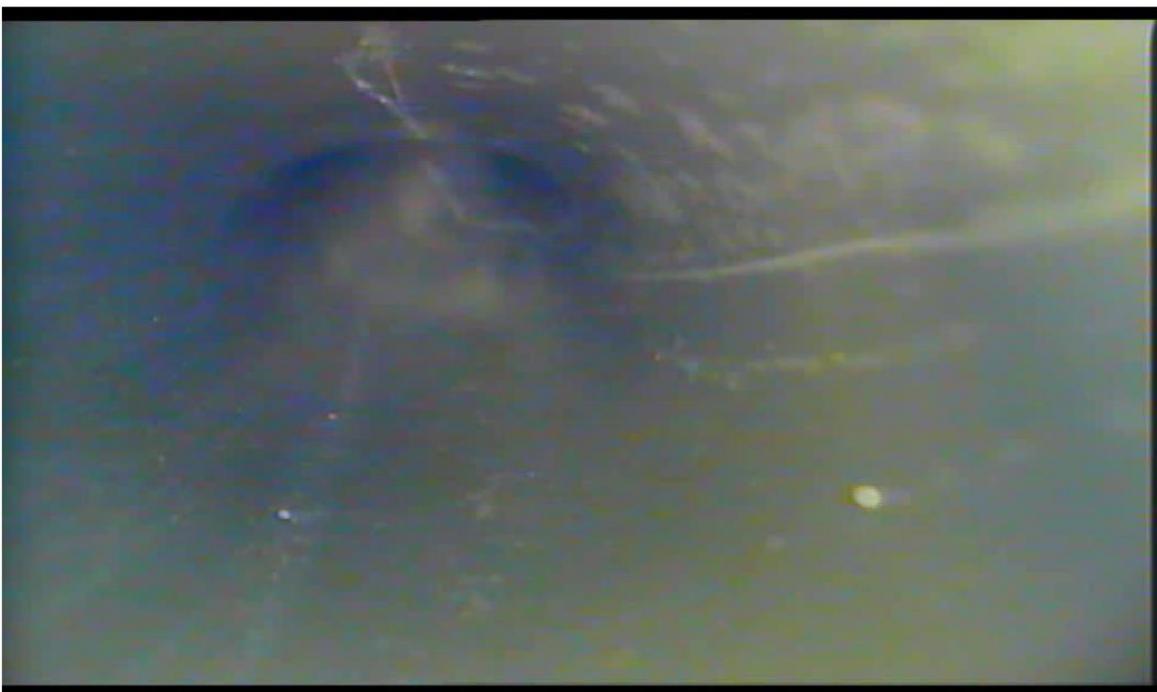
CAMEXPLO
à la découverte de l'inaccessible

• exploration robotique • inspection vidéo

Vue sur une ovalisation de la paroi dans la sonde géothermique S1A à Kirchheim.



Vue sur un coude au niveau d'une sonde à Kirchheim



Annexe 12

Compte-rendu des investigations par caméra non étanche menées par Camexplo le 22.05.15 sur le site de Krichheim

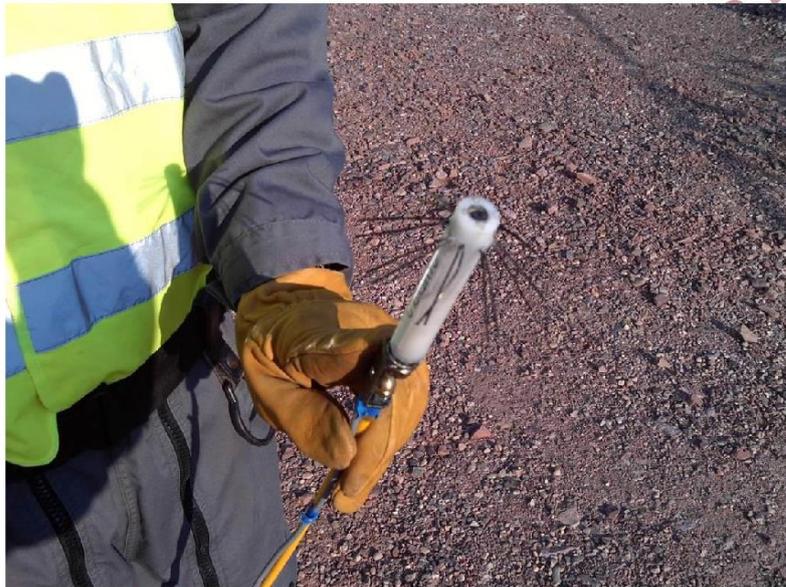
CG 88/10 PM/MP

COMPTE-RENDU	
Opération : REMEDIA-FOR	Numéro : PDR14DGR13
Objet : Investigations caméra non étanche CAMEXPLO Kirchheim	
Date de l'intervention : 22 mai 2015 Rédacteur : P. Monnot	Lieu : Kirchheim, Alsace
<p>Participants :</p> <p>CAMEXPLO</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Laurent Glady : contact@camexplo.fr ✓ Collègue Laurent Glady <p>BRGM :</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Anne-Valérie Barras a.barras@brgm.fr ✓ Loic Gradenstaetter l.Gradenstaetter@brgm.fr ✓ P. Monnot (BRGM) p.monnot@brgm.fr <p>Expert judiciaire Représentant assureur Mannfor Représentant cabinet expertise assureur partie civile</p>	
<p>Diffusion pour information :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Jean-Marc Weider (ACOTEX) : jm.weider@acotex.fr - Anne-Valérie Barras av.barras@brgm.fr - Norbert Bommensatt (ADEME) : norbert.bommensatt@ademe.fr - Sanjuan Bernard (BRGM) : b.sanjuan@brgm.fr 	

ORDRE DU JOUR
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tester in-situ, dans les 7 sondes géothermiques verticales de 100 m de profondeur (géométrie double U, diamètre 32 mm extérieur), les prototypes de caméra développés par CAMEXPLO

PROTOTYPES DEVELOPPES PAR CAMEXPLO TESTES A KIRCHHEIM :

- 2 technologies de caméras non étanches ont été testées :
 - ✓ La première à un diamètre de 16 mm (sans verre saphir). Les spécifications de cette caméra sont les suivantes :
 - Diamètre de la caméra 8mm + 8mm de corps en plastique renforcé + les fils de centrages
 - Ce corps en plastique a une longueur de 10 cm et se termine par un presse-étoupe en laiton et une bague de fixation pour accrocher le câble de poussée.
 - Images en couleur et en haute définition
 - Eclairage additionnel : quatre leds haute luminosité sur le pourtour de la caméra
 - fils de centrages.



- ✓ La deuxième caméra non étanche (sans verre saphir) est la suivante :
 - Diamètre de la caméra 8mm + un centreur de 9mm incluant les fils de centrages
 - Ce centreur ne fait que 3 à 4 cm de long, ce qui permet d'avoir un peu de souplesse au niveau de la caméra. La caméra peut se faufiler plus facilement mais restera probablement moins centrée en cas de rétrécissement de la sonde en comparaison avec le modèle en plastique qui lui est rigide.
 - Images en couleur et en haute définition
 - Eclairage additionnel.

Remarque : caméra étanche en cours de développement : remplacement de la vitre en Plexiglas par une vitre en saphir (le verre saphir est nécessaire uniquement pour la caméra étanche), sans éclairage additionnel (pour l'instant).

PROTOCOLE ETABLI POUR LA JOURNEE DU 22/05/15 :

1. Les 7 sondes ont été purgées le 20/05/15 par l'entreprise AEVEA, avec l'appui du BRGM (Direction Alsace). Remarque : chaque sonde est constituée de 2 tubes en U se présentant sous forme de 4 tubes unitaires en tête de sonde. Un seul tube U a été purgé par sonde, l'autre est resté en eau glycolée (résistance à la pression).
2. Passage caméra HD non étanche (dans 7 tubes unitaires à sec Projet REMEDIA-FOR 2)
3. Remise en eau (sans glycol) des 7 tubes U purgés

MESURES REALISEES - OBSERVATIONS :

- Pour mémoire, les mesures de températures réalisées le 12 et 18 mai 2015 ont mis en évidence une anomalie de température vers 50 m de profondeur, avec un pic vers 70 m. On retrouve cette anomalie dans les 7 sondes à la même profondeur. Elle peut être associée à une réaction exothermique associée à l'hydratation des anhydrites au contact de l'eau souterraine (nappe superficielle des alluvions qui se déverse dans les couches inférieures, infiltration possible en l'absence de cimentation dans l'espace annulaire des sondes) ;
- Sondage 2A : les investigations ont débuté avec la première caméra 16mm en plastique. L'enregistrement vidéo a permis de voir des images de qualité à haute définition. On a pu observer très clairement l'intérieur des bordures des tubes avec gouttes d'eau et de glycol (restes non purgés). La caméra a été descendue jusqu'à 95 m (limite à travers laquelle la sonde était remplie d'eau, reste non purgé). **Aucune anomalie sur le tube n'a été décelée. La remontée de la caméra a été problématique**, en raison des frottements importants, accentués par le vrillage important des tubes. La caméra a été remontée de quelques centimètres pour être bloquée, **puis le fil-guide a cassé**. La caméra a dû être abandonnée dans le tube... Point d'amélioration : développer un touret mécanique (treuil) avec dévidoir à déroulage précis (déplacement millimétriques) pour permettre, lors de la descente de la caméra, de freiner sa vitesse de descente, notamment dans les zones à investiguer en détail ;

Remarques Laurent Glady (CAMEXPLO) :

« Ma réflexion sur le problème de remontée de cette caméra est la suivante : La caméra n'a pas pu être remontée car le câble d'alimentation s'est sectionné au niveau d'une jonction à 85 m, à partir de ce moment il devient quasiment impossible de remonter l'ensemble car le câble d'alimentation forme un bouchon puisqu'il n'est plus tendu et bloque de plus en plus le câble en fibre. Je pense que nous aurions pu remonter la caméra dans le cas où le câble d'alimentation n'aurait pas cédé.

La solution que je peux apporter concerne dans un premier temps le câble d'alimentation : il ne doit pas y avoir de jonction intermédiaire autrement dit, il doit être d'un seul tenant (facile à faire). Ensuite, je propose de remplacer ce câble et la fibre de poussée par un câble spécial de 10mm de diamètre qui allie ces deux équipements. J'ai déjà trouvé ce nouveau câble, je dois me renseigner sur son prix et c'est à mon avis la meilleure solution. Mais on peut très bien travailler avec la première solution dans un premier temps ».

- Sondage 1A puis 1D : pour mémoire, ce sondage n'avait pas permis de descendre la sonde de température au-delà de 50 m de profondeur, car la sonde était restée bloquée. Par contre, les volumes d'eau glycolée purgés étaient identiques aux

volumes théoriques pour une sonde de 100 m. Ce constat indique que le forage a bien été réalisé jusqu'à la profondeur de 100 m, mais que le tube de sonde présente apparemment un problème (pincement) qui bloque la sonde de température.

Les observations faites lors de la descente de la deuxième caméra non étanche de 8mm avec le centreur (en remplacement) ont été les suivantes : les tubes ne présentent aucune anomalie jusqu'à la profondeur de 50 m, avec une géométrie circulaire normale. On aperçoit lors de la descente de la caméra, des anneaux circulaires, probablement liés à l'extrusion des tubes, qui représente d'excellents marqueurs visuels de la géométrie des tubes. On constate par contre à 50 m une ovalisation du tube et une obstruction par un matériau indéterminé, avec une écaille sur le pourtour (probablement une déchirure). Cette observation est de premier ordre, car elle confirme le pincement à l'origine du blocage de la sonde de température. La remontée de la caméra s'est réalisée sans aucun problème, car les tubes étaient nettement moins vrillés que ceux du sondage 2A.

Pour confirmer ce pincement, la caméra a été descendue dans le tube voisin du même sondage (deuxième U). On a constaté à 50 m de profondeur un vrillage important du tube en forme de S, qui ne permet pas de descendre la caméra au-delà. Ce vrillage est significatif d'une anomalie géométrique. Son origine peut être expliquée par un cisaillement du tube ou par une pression (gonflement des anhydrites également à l'origine du pincement du tube voisin) ou par le mouvement cisailant d'une faille. On peut penser qu'à cet endroit, ces observations peuvent indiquer une absence de cimentation (le ciment reprend mécaniquement les contraintes). La remontée de la caméra s'est réalisée sans soucis.

- Ces investigations ont permis d'observer un vrillage des tubes, parfois important avec des spires (rayon de courbure) plus ou moins resserrées. Dans ce cas, les outils peuvent donc rester bloqués à la descente sans que le tube soit forcément pincé ou obturé.

CONCLUSIONS :

- Les investigations avec les deux prototypes de caméra non étanche se sont révélées positives. Elles ont pu permettre de détecter une anomalie géométrique des tubes du sondage 1A à une profondeur de 50 m, à l'origine du blocage de la sonde de température à 50 m.
- Le protocole a pu être précisé (descente, remontée de la caméra) avec en perspective, une amélioration du dévidoir. Les observations par caméra pour détecter une anomalie des tubes se portent essentiellement sur la géométrie du tube (de forme circulaire à l'état normale, de forme ovalisée en cas d'écrasement) et sur la nature de la paroi du tube (rayures, déchirures, écailles) ;
- Les caméras développées par CAMEXPLO permettent de réaliser des images haute définition qui permettent de voir de tels détails.

PERSPECTIVES :

Remettre un rapport final qui intégrera :

- La validation des protocoles d'investigation en s'appuyant sur les mesures in-situ
- L'initiation du développement d'outils d'investigation ;
- Les premières observations faites in-situ et les éléments d'observation sur lesquels on peut s'appuyer pour détecter des anomalies (thermiques, géométriques) ;

Les perspectives au-delà du rapport final pourront être le montage d'un projet de recherche (phase no 2) avec les objectifs suivants : affiner et améliorer les protocoles d'investigation en les testant sur de nouveaux sites (Lochwiller, Hilsprich, Allemagne) et apporter les éléments d'amélioration et de développement des outils d'investigation en vue de les rendre fiable et opérationnelle pour leur mise sur le Marché

DOCUMENT INTERNE AU GROUPE DE TRAVAIL

Annexe 13

Compte-rendu des investigations menées le 17.04.15 sur la plateforme expérimentale du BRGM à Orléans

CG 88/10 PM/MP

COMPTE-RENDU	
Opération : REMEDIA-FOR	Numéro : PDR14DGR13
Objet : Mesures CAMEXPLO plateforme gth BRGM	
Date de l'intervention : 17 avril 2015	Lieu : BRGM Orléans
Rédacteur : P. Monnot	
<p>Participants :</p> <p>CAMEXPLO</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Laurent Glady : contact@camexplo.fr ✓ Collègue Laurent Glady <p>BRGM :</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Mikael Philippe m.philippe@brgm.fr ✓ Laurent Malizia l.malizia@brgm.fr ✓ P. Monnot (BRGM) p.monnot@brgm.fr 	
<p>Diffusion pour information :</p> <p>Jean-Marc Weider (ACOTEX) : jm.weider@acotex.fr</p> <p>Anne-Valérie Barras av.barras@brgm.fr</p> <p>Norbert Bommensatt (ADEME) : norbert.bommensatt@ademe.fr</p> <p>Sanjuan Bernard (BRGM) : b.sanjuan@brgm.fr</p>	

ORDRE DU JOUR
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tester in-situ, dans la sonde géothermique verticale de 100 m de profondeur (géométrie double U, diamètre 32 mm extérieur), la sonde de température et les trois prototypes de caméras développés par CAMEXPLO ▪ Tester en particulier la précision et la sensibilité de mesure de la température en réalisant une opération de mesure après réchauffement du liquide caloporteur de la sonde à 30 °C ; ▪ Etalonner et réaliser en parallèle les mesures de température avec les fibres optiques pour permettre par la suite une comparaison (fiabilité) ▪ Tester les trois prototypes de caméras développés par CAMEXPLO (une caméra non étanche et deux caméras étanches) et en particulier leur définition d'image et leur résistance à la pression.

PROTOTYPES DEVELOPPES PAR CAMEXPLO TESTES SUR LA PLATEFORME DU BRGM :

- Développement de 3 technologies de caméras étanches :
 - ✓ 1 caméra de 16mm étanche en alu avec une vitre en saphir
 - ✓ 1 caméra de 16mm étanche en plastique avec une vitre en plexiglas
 - ✓ 1 caméra de 12 mm étanche en alu avec une vitre en saphir

Le système d'étanchéité est différent à chaque fois. Les bobines sont équipées d'un câble de 120m, les caméras sont en HD.

- Développement d'une caméra de 8mm non étanche, haute résolution, avec un corps en aluminium et munie d'une vitre en verre de saphir
- Développement d'une sonde de température

PROTOCOLE DE MESURE ETABLI POUR LA JOURNEE DU 17/04/15 :

1. Les mesures débutent par la sonde de température (mesure à la descente) dans les tubes « en eau ». La sonde de température et la fibre optique sont préalablement étalonnées dans un bain à 0°C ;
2. Descente ensuite de la caméra étanche ;
3. Les tubes sont ensuite obturés pour les chauffer (2 heures environ) avec le module de chauffage. Les mesures de température sont à nouveau réalisées dans les tubes « en eau ». L'objectif est de déterminer la sensibilité de la sonde à des écarts de températures, en ayant comme référence, les mesures de la fibre optique ;
4. Les tubes sont ensuite purgés à l'air comprimé pour descendre la caméra non étanche.

OBSERVATIONS :

Températures :

- Les températures augmentent progressivement avec la profondeur, ce qui est cohérent avec les mesures faites auparavant avec les fibres et le gradient géothermique ;
- On aperçoit des fluctuations qui font penser à une création de zones de mélange en descendant la sonde (on mesure localement des températures plus froides à mesure que l'on descend la sonde en profondeur). Ce phénomène devra être vérifié en calant les mesures de température avec celles mesurées par les fibres optiques
- Les dernières mesures ont été réalisées après chauffage du système (dela T : 20°C)

Caméra :

- Les trois prototypes de caméra ont résisté à la pression. Un essai à la pression a été réalisé durant 2 heures, en laissant la caméra en fond de forage (94 m = 9.4 bars)
- Les deux caméras étanches ont révélé être inadaptées à une inspection en présence de glycol. Dès que la caméra est plongée dans le liquide caloporteur (taux de glycol pour les sondes de la plateforme : 27 %), l'image devient trouble et aucun détail n'est visible. Le glycol étant gras, le verre de la caméra doit se souiller. Une autre hypothèse relevée est la diffraction de la lumière générée par les led sur le pourtour

de la caméra. On peut toutefois noter que l'image est devenue subitement nette à 94 m de profondeur, laissant apparaître les soudures du pied de sonde ;

- Un test de la caméra non étanche a révélé une qualité d'image très bonne (haute résolution). On peut également relever que la caméra étanche pourvue du verre saphir fournit une très bonne qualité d'image (dans la partie non immergée de la sonde)
- Amélioration : il est proposé à CAMEXPLO de développer un centreur (par exemple à billes) adapté aux diamètres des deux caméras étanches.

En conclusion :

- Les mesures de températures se sont déroulées sans difficulté, l'outil de mesure étant parfaitement adapté à la géométrie des tubes de sonde en double U. Les mesures réalisées paraissent, avant traitement et comparaison avec les mesures enregistrées par les fibres optiques, cohérentes ;
- Les mesures avec les caméras se sont déroulées sans difficultés. Les trois diamètres ont permis l'insertion sans difficulté. Les deux caméras étanches ont résisté à la pression. Par contre, on doit se rendre à l'évidence que les inspections de tubes en présence d'eau glycolée ne sont pas possibles : dès que la caméra pénètre dans le fluide, l'image devient trouble. En revanche, la caméra non étanche a révélé une image de très bonne définition ;
- Ces observations amènent à proposer la solution suivante : adapter le protocole d'inspection dans des tubes préalablement purgé de leur liquide caloporteur (excepté si les tubes sont remplis d'eau claire, auquel cas les caméras étanches se révèlent très efficace) ;

SUITES A DONNER :

Les actions suivantes sont prévues :

- Plateforme BRGM : traitement des données de température (sonde + fibres optiques) et de caméras ;
- Kirchheim : réalisation de mesures in-situ (12 ou 19 mai 2015 à confirmer)
- Hilsprich : réalisation de mesures in-situ à (21 mai à confirmer, si possibilité de purger les tubes).



Géosciences pour une Terre durable

brgm

**Centre scientifique et technique
Direction des g eoressources**

3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – T el. : 02 38 64 34 34