

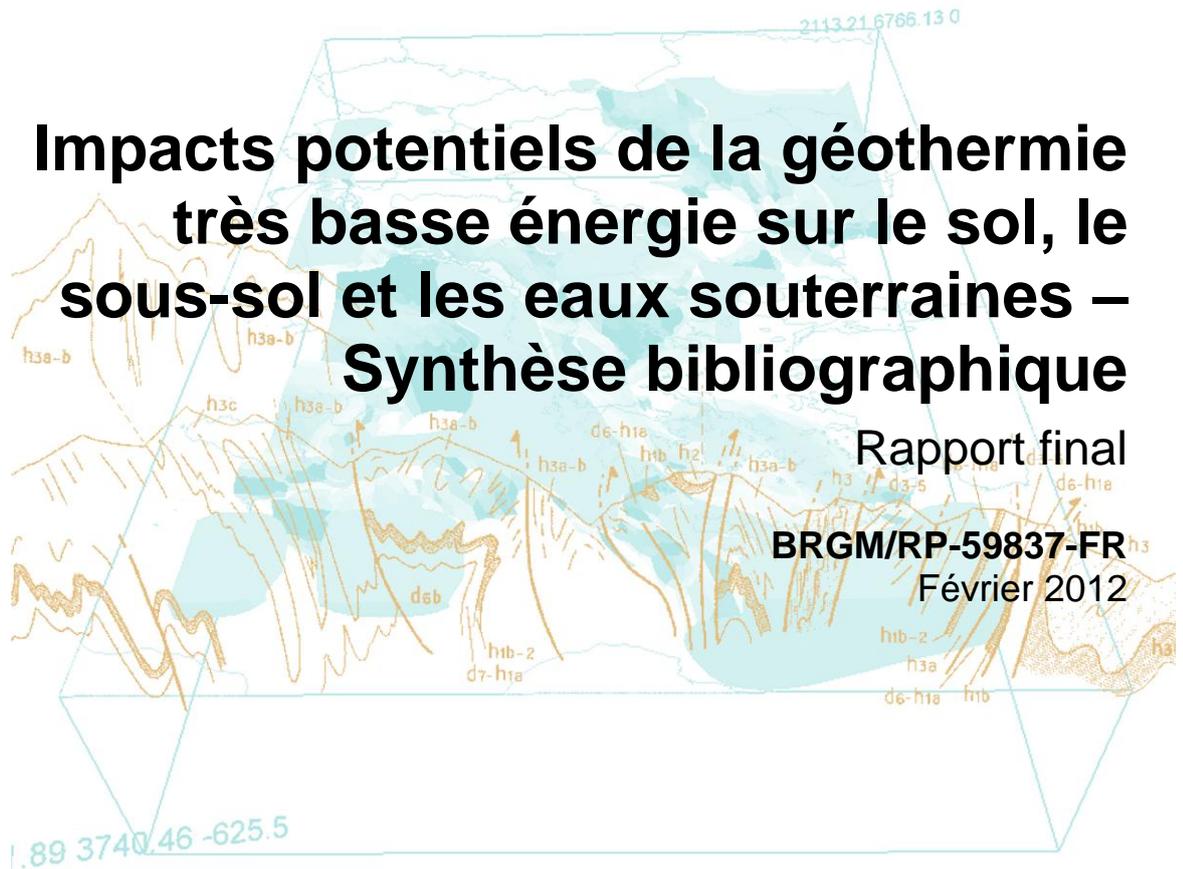
**Rapport public**

# Impacts potentiels de la géothermie très basse énergie sur le sol, le sous-sol et les eaux souterraines – Synthèse bibliographique

Rapport final

BRGM/RP-59837-FR

Février 2012



# Impacts potentiels de la géothermie très basse énergie sur le sol, le sous-sol et les aquifères – Synthèse bibliographique

Rapport final

**BRGM/RP-59837-FR**

Février 2012

Étude réalisée dans le cadre des projets de Service public du BRGM 2011 11GTHC19

**S. Bezelgues-Courtade, P. Durst avec la collaboration de F. Garnier et T. Demutrecy**

**Vérificateur :**

Nom : J.F. Vernoux

Date : 21/12/2012

Signature :

**Approbateur :**

Nom : A. Desplan

Date :

Signature :

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique, l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

**Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.**





**Mots clés** : géothermie très basse énergie ; impact ; eau souterraine ; forage, sonde géothermique verticale, pompe à chaleur.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante : Impacts potentiels de la géothermie très basse énergie sur le sol, le sous-sol et les aquifères – Synthèse bibliographique. S. Bézèlgues-Courtade, P. Durst, avec la collaboration de F. Garnier et T. Demutrecy. Rapport final BRGM/RP-59837-FR. Février 2012

## Synthèse

Le recours à la géothermie comme source alternative d'énergie est en forte progression ses dernières années. Les raisons de ce développement sont à relier à diverses incitations réglementaires en vigueur. Or, comme toute activité humaine, l'exploitation énergétique des formations géologiques superficielles est susceptible d'avoir des conséquences sur le milieu naturel : sur les eaux souterraines (impact quantitatif et qualitatif) et sur la structure des terrains.

La présente étude réalisée dans le cadre d'une convention de partenariat entre le BRGM, l'ADEME et l'ONEMA<sup>1</sup>, à la demande de la Direction de l'Eau et de la Biodiversité (DEB) du MEDDTL<sup>2</sup> vise à apporter des éléments objectifs permettant de distinguer ce qui peut être acceptable au nom de l'enjeu du développement de la géothermie, ou non, en regard de la nécessité de préservation de la qualité des eaux souterraines. Elle a consisté, à partir d'éléments bibliographiques ou recueillis auprès des acteurs de la géothermie (professionnels et institutionnels), à :

- Inventorier les impacts potentiels des exploitations géothermiques de très basse énergie ;
- Identifier les cas avérés d'incidents survenus lors de la réalisation d'opérations géothermiques ;
- Proposer une analyse de risques afin de pouvoir hiérarchiser les impacts potentiels en tenant compte des probabilités d'occurrence et de l'importance des impacts ;
- Apporter des recommandations pour améliorer l'encadrement de la filière.

L'inventaire des impacts potentiels fait ressortir que chaque phase de la construction d'une installation géothermique peut être vectrice 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) :

- foration de SGV en milieu sensible à l'eau (formations solubles ou gonflantes) ;
- foration de SGV et de forages d'eau en présence de gaz ;
- foration de SGV en milieu karstique ;
- foration de SGV en milieu artésien.

Elles concernent particulièrement la réalisation des sondes géothermiques verticales.

---

<sup>1</sup> Office National de l'Eau et des Milieux Aquatique

<sup>2</sup> Ministère de l'Ecologie du Développement Durable des Transports et du Logement

Il ressort également que le non-respect des préconisations d'utilisation des équipements (dimensionnement), en particulier des sondes géothermiques verticales est susceptible de provoquer des impacts majeurs : surexploitation des SGV entraînant le gel des terrains.

Les défauts de cimentation (dans les cas de forages d'eau et de SGV) sont également porteurs de risques importants pour les milieux, ceci indépendamment du type de terrains dans lesquelles les installations sont implantées.

Enfin, un risque important est également associé à la perte de mémoire sur la localisation des ouvrages abandonnés.

Cette étude met également en relief le fait que des solutions de prévention de ces impacts existent pour la plupart d'entre eux et sont énoncées dans les documents normatifs et réglementaires disponibles. Le respect de ces « règles de l'art » permettrait de prévenir une grande partie des impacts, mais des moyens de prévention complémentaire peuvent être développés pour encadrer le développement rapide de la filière géothermie. Plusieurs pistes sont préconisées. Elles visent :

- à l'amélioration de la connaissance de l'existant en matière d'exploitation énergétique du sous-sol et des aquifères ;
- à l'amélioration de la connaissance de zones à risque et à la définition de règlements spécifiques à ces zones ;
- à l'amélioration de la qualité des matériaux utilisés ;
- à l'amélioration du respect des règles de l'art en matière de réalisation des ouvrages d'exploitation ;
- au développement de politiques locales de gestion des ressources énergétiques du sous-sol associées au développement d'outils de gestion spécifiques ;
- à la mise en place de programmes d'évaluation de risques actuellement méconnus.

De nouvelles pistes d'études ou de recherches sont également proposées au fil du rapport.

## Sommaire

|          |                                                       |           |
|----------|-------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introduction .....</b>                             | <b>9</b>  |
| <b>2</b> | <b>Impacts liés à la réalisation de forages .....</b> | <b>11</b> |
| 2.1      | INSTALLATION DE CHANTIER .....                        | 11        |
| 2.2      | FORATION – FORAGE D’EAU .....                         | 12        |
| 2.2.1    | Techniques de foration .....                          | 13        |
| 2.2.2    | Fluides de forage et adjuvants de foration .....      | 15        |
| 2.3      | FORATION – SONDE GEOTHERMIQUE VERTICALE .....         | 18        |
| 2.3.1    | Techniques de foration .....                          | 18        |
| 2.3.2    | Fluides de forage et adjuvants de foration .....      | 19        |
| 2.4      | ÉQUIPEMENTS – FORAGE D’EAU .....                      | 20        |
| 2.4.1    | Tubage et crépine .....                               | 21        |
| 2.4.2    | Massif de gravier .....                               | 24        |
| 2.4.3    | Cimentation .....                                     | 24        |
| 2.4.4    | Tête de forage .....                                  | 26        |
| 2.4.5    | Les milieux particuliers .....                        | 28        |
| 2.5      | EQUIPEMENT – SONDE GEOTHERMIQUE VERTICALE .....       | 30        |
| 2.5.1    | Cimentation .....                                     | 31        |
| 2.5.2    | Tête de forage .....                                  | 33        |
| 2.6      | DEVELOPPEMENTS – FORAGES D’EAU .....                  | 34        |
| 2.7      | TESTS HYDRAULIQUES – FORAGES D’EAU .....              | 36        |
| <b>3</b> | <b>Impacts liés à l’exploitation.....</b>             | <b>37</b> |
| 3.1      | DIMENSIONNEMENT .....                                 | 37        |
| 3.2      | DURABILITE ET DEGRADATION DES CIMENTS.....            | 38        |
| 3.2.1    | Durabilité .....                                      | 38        |
| 3.2.2    | Pollution directe par le ciment .....                 | 41        |
| 3.3      | EXPLOITATION SANS PRELEVEMENT D’EAU (SGV) .....       | 42        |
| 3.3.1    | Fluide caloporteur .....                              | 42        |
| 3.3.2    | Impact thermique potentiel .....                      | 46        |
| 3.3.3    | Impacts géotechniques .....                           | 50        |

|                                                                                              |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.3.4 Impacts géochimiques et microbiologiques .....                                         | 51        |
| 3.4 EXPLOITATION AVEC PRELEVEMENT D'EAU, SANS REINJECTION .....                              | 51        |
| 3.5 EXPLOITATION AVEC PRELEVEMENT ET REINJECTION D'EAU (DOUBLET,<br>MULTIPLLET) .....        | 53        |
| 3.5.1 Impacts thermiques .....                                                               | 54        |
| 3.5.2 Modification de température : impacts géochimique et microbiologique..                 | 56        |
| <b>4 Impacts liés à l'abandon de forage .....</b>                                            | <b>61</b> |
| 4.1 PROCEDURES D'ABANDON .....                                                               | 61        |
| 4.2 DEVENIR A LONG TERME .....                                                               | 61        |
| <b>5 Exemples de cas de désordres provoqués par des installations<br/>géothermiques.....</b> | <b>63</b> |
| <b>6 Classification des impacts et première analyse de risque .....</b>                      | <b>69</b> |
| <b>7 Préconisations.....</b>                                                                 | <b>77</b> |
| 7.1 CONNAISSANCES ET BANCARISATION DES INSTALLATIONS.....                                    | 77        |
| 7.2 CONNAISSANCE DES ZONES A RISQUES .....                                                   | 78        |
| 7.3 QUALITE DES MATERIAUX .....                                                              | 78        |
| 7.4 RESPECT DES REGLES DE L'ART .....                                                        | 79        |
| 7.5 GESTION DES RESSOURCES ENERGETIQUES DE TRES BASSE ENERGIE                                | 79        |
| 7.6 ETUDES COMPLEMENTAIRES .....                                                             | 79        |
| <b>8 Conclusion.....</b>                                                                     | <b>81</b> |
| <b>9 Bibliographie .....</b>                                                                 | <b>83</b> |
| <b>10 Sites internet consultés. ....</b>                                                     | <b>93</b> |

## Liste des figures

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1 : Exemples d'équipements classiques d'un forage d'eau .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 20 |
| Figure 2 : Exemple de protection de la tête de forage .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 27 |
| Figure 3 : Exemples de configuration de captage en zone inondable .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 28 |
| Figure 4 : Exemples d'équipements classiques d'une SGV .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 30 |
| Figure 5 : Variété de compositions possibles des ciments .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 38 |
| Figure 6 : Isothermes autour d'une SGV après 25 ans d'exploitation (Maragna, 2009).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 46 |
| Figure 7 – Champs de température autour de la sonde géothermique verticale à la fin de la 30 <sup>ème</sup> saison de chauffe pour les 15 contextes hydrogéologiques modélisés (définis par 5 perméabilités relatives à l'argile (T : Ton), au limon (U), au sable fin (fS : Feinsand), au sable moyen (mS : Mittelsand), au sable grossier (gS : grobsand) et trois gradients hydrauliques $i = 0.5\%$ ; $1\%$ ; $2\%$ ). (Grundwasser-Fliessrichtung : Direction de l'écoulement) (d'après (Pannike S., 2006)) ..... | 48 |
| Figure 8 – Taille du panache thermique : longueur des panaches thermiques entraînant une baisse de $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , de $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , de $1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ en fonction de la vitesse réelle d'écoulement $v_a$ après 30 années de fonctionnement de la PAC sur SGV (d'après (Pannike S., 2006)) .....                                                                                                                                                                      | 49 |
| Figure 9 – Vue en coupe dans la direction de l'écoulement du champ de température à la fin de la 5 <sup>ème</sup> année d'exploitation du champ de sonde (fin du 5 <sup>ème</sup> déstockage). La ligne verte représente l'emplacement du champ de sonde (d'après (Software)) .....                                                                                                                                                                                                                                    | 50 |
| Figure 10 : Géométrie du cône de dépression avec surface piézométrique inclinée (Castany, 1982).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 52 |
| Figure 11: Influence d'un prélèvement sur les forages voisins - Impact potentiel : conflit d'usage.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 52 |
| Figure 12 : Panaches thermiques associés à différents doublets géothermiques – Strasbourg (ANTEA) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 55 |
| Figure 13 : Groupes bactériens selon la température .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 57 |
| Figure 14 : Solubilité du dioxygène et du dioxyde de carbone en fonction de la température et de la salinité (g/l) pour des pressions partielles atmosphériques.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 58 |
| Figure 15 : Variation du pH de neutralité (concentrations équivalentes en $\text{H}^+$ et $\text{OH}^-$ ) en fonction de la température pour de l'eau pure à 1 atm. (Figure obtenue à l'aide du code de calcul PHREEQC) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 59 |

## Liste des tableaux

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau 1 : Installation de chantier et impacts potentiels .....                     | 12 |
| Tableau 2 : Techniques de foration et impacts potentiels pour les forages d'eau..... | 14 |
| Tableau 3 : Relation fluide/milieu .....                                             | 15 |
| Tableau 4 : Fluides de forage .....                                                  | 17 |
| Tableau 5 : Techniques de foration et impacts potentiels pour les SGV .....          | 19 |
| Tableau 6 : Matériaux de tubage et résistance mécanique à la corrosion .....         | 22 |

|                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau 7 : Impacts potentiels liés aux tubages .....                                                               | 23 |
| Tableau 8 : Classification des inhibiteurs de corrosion .....                                                       | 24 |
| Tableau 9 : Impacts potentiels liés à la cimentation d'un forage d'eau .....                                        | 26 |
| Tableau 10 : Milieux naturels particuliers et impacts potentiels des forages d'eau .....                            | 30 |
| Tableau 11 : Milieux naturels particuliers et impacts potentiels des SGV.....                                       | 34 |
| Tableau 12 : Méthodes de développement et risques associés .....                                                    | 35 |
| Tableau 13 : Développement dans les milieux particuliers .....                                                      | 35 |
| Tableau 14 : Causes de la dégradation de ciments .....                                                              | 40 |
| Tableau 15 : Impacts potentiels dus à la dégradation des ciments .....                                              | 41 |
| Tableau 16 : Potentiel de relargage de certains coulis et boues utilisés dans les forages<br>et les fondations..... | 42 |
| Tableau 17. Synthèse des cas recensés.....                                                                          | 64 |
| Tableau 18. Synthèse des cas recensés en 2011 par l'Agence environnementale du<br>Bade-Wurtemberg (Allemagne).....  | 68 |
| Tableau 19 : Impacts potentiels et risques résultants .....                                                         | 73 |
| Tableau 20. Impacts potentiels et risques résultants. ....                                                          | 74 |
| Tableau 21. Impacts potentiels et risques résultants .....                                                          | 75 |

## Liste des annexes

|                                                                                                         |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Annexe 1 Experts consultés – Compte-rendu de réunion de concertation .....</b>                       | <b>97</b>  |
| <b>Annexe 2 Prévention des impacts en phase de conception d'une installation<br/>géothermique .....</b> | <b>107</b> |
| <b>Annexe 3 Note Technique, Produits adjuvants utilisés en forage .....</b>                             | <b>113</b> |

# 1 Introduction

Le recours à la géothermie comme source alternative d'énergie est en forte progression ses dernières années. Les raisons de ce développement sont à relier à diverses incitations réglementaires en vigueur :

- européennes : directive européenne sur les énergies renouvelables (2009/28/CE)
- et nationales : loi « Grenelle 1 » et arrêté du 15 décembre 2009 (programmation pluriannuelle des investissements de production de chaleur) qui fixe les objectifs de développement de la géothermie, telle-que la multiplication par six de la production au niveau national à l'horizon 2020.

Parallèlement à cette volonté de développer la filière, l'objectif d'atteinte du bon état quantitatif et chimique des eaux souterraines prévus par la directive cadre sur l'eau (2000/60/CE) et par les orientations des SDAGE<sup>1</sup> nécessite :

- de vérifier que le développement de la géothermie respecte bien les mesures prises pour protéger les eaux souterraines ;
- et d'évaluer les évolutions réglementaires qui seraient souhaitables pour garantir un encadrement suffisant du développement de cette filière.

Or, comme toute activité humaine, l'exploitation énergétique des formations géologiques superficielles est susceptible d'avoir des conséquences sur le milieu naturel : sur les eaux souterraines (impact quantitatif et qualitatif) et sur la structure des terrains (destabilisation, gonflement, dissolution, ...). Ces impacts peuvent intervenir à tous les stades de l'exploitation énergétique et trouver leur origine dans divers contextes. Apparaît donc la nécessité de vérifier que le développement de la géothermie respecte bien les mesures prises pour protéger les eaux souterraines et d'évaluer les évolutions réglementaires qui seraient souhaitables pour garantir un encadrement suffisant du développement de cette filière.

C'est ce à quoi contribue la présente étude réalisée dans le cadre d'une convention de partenariat entre le BRGM, l'ADEME et l'ONEMA<sup>2</sup>, à la demande de la Direction de l'Eau et de la Biodiversité (DEB) du MEDDTL<sup>3</sup>. Elle vise en effet à apporter des éléments objectifs permettant de distinguer ce qui peut être acceptable au nom de l'enjeu du développement de la géothermie, ou non, en regard de la nécessité de préservation de la qualité des eaux souterraines. Elle a consisté, à partir d'éléments bibliographiques ou recueillis auprès des acteurs de la géothermie (professionnels et institutionnels (cf. Liste en annexe 1), à :

- inventorier les impacts potentiels des exploitations géothermiques sur le milieu ;
- identifier les cas avérés d'incidents survenus lors de la réalisation d'opérations géothermiques ;
- apporter des recommandations pour l'amélioration de l'encadrement de la filière et l'évitement des incidents en tenant compte des pratiques adoptées par d'autres pays ;

---

<sup>1</sup> Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux

<sup>2</sup> Office National de l'Eau et des Milieux Aquatique

<sup>3</sup> Ministère de l'Ecologie du Développement Durable des Transports et du Logement

- proposer de nouvelles pistes d'études ou de recherches en l'absence de solutions dans l'état actuel des connaissances.

**Seuls les impacts potentiellement liés à la mise en place, à l'exploitation et à l'abandon d'installations de géothermie très basse énergie de types sonde géothermique verticale et forage d'eau sont analysés.**

Par la suite, cet état des connaissances permettra également au MEDDTL de se déterminer sur la nécessité de faire évoluer la réglementation.

Le présent rapport s'attache à présenter :

- un inventaire des impacts potentiellement imputables à la réalisation d'ouvrages géothermiques de types forages d'eau et sondes géothermiques verticales ;
- un inventaire des impacts pouvant survenir en cours d'exploitation de ces forages et sondes ;
- un inventaire des impacts potentiellement associés à l'abandon des ouvrages géothermique ;
- une classification des impacts potentiels inventoriés tenant compte de leur probabilité d'occurrence et de la vulnérabilité des milieux.

## 2 Impacts liés à la réalisation de forages

Un forage constitue une ouverture sur le milieu souterrain et traverse différentes formations géologiques et hydrogéologiques. De ce fait, il est susceptible de mettre en connexion des milieux (surface, aquifères successifs, formations géologiques successives) initialement indépendants et possédant chacun un équilibre physique, chimique et biologique propre. Dans certaines conditions de réalisation, en particulier si son étanchéité ou si l'isolement des différents milieux traversés ne sont pas garantis, un forage peut se transformer en un vecteur de pollutions et/ou être à l'origine d'instabilités géologiques.

Par ailleurs, au cours des différentes étapes de sa réalisation (installation du chantier, foration, équipement, développement, tests hydrauliques et thermiques)<sup>4</sup>, des dégradations physiques et qualitatives du milieu peuvent intervenir, le plus souvent en lien avec des choix techniques inadaptés à ce milieu.

L'objet du présent chapitre est de décrire les impacts sur le milieu souterrain (sous-sol et eaux souterraines) susceptibles d'être associés à l'existence d'un forage et aux différentes techniques utilisées pour sa réalisation. Il se base essentiellement sur l'expertise d'agents BRGM. Il s'attachera également à préciser les préconisations existantes visant à éviter ces impacts (préconisations réglementaires et normatives) et à identifier d'éventuelles lacunes prescriptives.

Un rappel des précautions à prendre par le maître d'ouvrage ou son maître d'œuvre lors de la conception d'une installation et préalablement à l'ouverture d'un chantier est présenté en annexe 2. Ces précautions (prise en compte de contraintes réglementaires diverses, des particularités du milieu et dimensionnement approprié de l'installation) peuvent prévenir une bonne partie des impacts potentiels qui sont détaillés dans les chapitres suivants.

### 2.1 INSTALLATION DE CHANTIER

La préparation du chantier est primordiale pour limiter a priori les risques de mal façon du forage, de pollution accidentelle du site et des aquifères sous-jacents ou d'installation du chantier sur un site inapproprié. Elle doit permettre de prévenir les risques de pollution accidentelle et d'anticiper les risques environnementaux liés au contexte géologique et hydrogéologique du site (les réactions à prévoir face aux événements susceptibles de se produire dans un contexte géologique connu doivent être anticipées). Elle se base sur une connaissance fine :

- du site d'implantation prévisionnelle du forage : géologie, hydrogéologie, occupation du sous-sol ;
- des filières locales qui devront être sollicitées pour l'approvisionnement du chantier en matériaux divers et pour l'évacuation des déblais.

Les principaux risques liés au chantier et les solutions de prévention associées sont décrits dans le Tableau 1.

---

<sup>4</sup> Étapes invariables de réalisation d'un forage : elles sont indépendantes de l'usage prévu du forage (prélèvement d'eau ou d'énergie thermique)

| <b>Risques chantier</b>                                                                                                          | <b>Impacts potentiels</b>                                                                                                                                                          | <b>Possibilités de prévention/remédiation</b>                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Présence de réseaux souterrains                                                                                                  | Rupture de canalisation → pollution du sol, du sous-sol, des aquifères, du réseau hydrographique<br>Sécurité du chantier engagée                                                   | Demandes de renseignement (DR) et Déclaration d'Intention de Commencement de Travaux (DICT) par le maître d'ouvrage ou l'entreprise de forage                                                                                                                                                                         |
| Stockage et transferts de produits polluants (hydrocarbures, déblais de forages, fluides de forage, divers additifs de foration) | Fuites → pollution du sol, du sous-sol, des aquifères, du réseau hydrographique                                                                                                    | Dispositifs de stockage isolés<br><br>Dispositifs de protection du forage (bâche sous machines, bacs de récupération sous les compresseurs, ...) et de collecte d'éventuelles fuites<br><br>Évacuation et traitement des déblais, des fluides de forage, de l'eau (de foration et des tests hydrauliques) et additifs |
| Circulation de véhicules                                                                                                         | Impact paysager                                                                                                                                                                    | Remise en état du site                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Rupture d'approvisionnement en matériau en cours de réalisation du forage                                                        | Mal façon du forage (modification de la nature de l'équipement, cimentation incomplète, ...) → infiltrations depuis la surface, échanges entre aquifères, instabilités géologiques | Surplus d'équipements<br><br>Unités de fabrication des fluides et ciments sur site                                                                                                                                                                                                                                    |

Tableau 1 : Installation de chantier et impacts potentiels

Les précautions élémentaires à prendre sont décrites dans le Guide d'application de l'arrêté interministériel du 11 septembre 2003 relatif à la rubrique 1.1.0 de la nomenclature eau. Elles sont également décrites dans les normes NF X 10-999<sup>5</sup> et NF X 10-970<sup>6</sup>.

## 2.2 FORATION – FORAGE D'EAU

La foration correspond à l'« action (stricte) de forer un trou avec un outil adapté, sans connotation avec l'ouvrage réalisé » (cf. norme NF X 10-999).

<sup>5</sup> NF X 10-999 - Forage d'eau et de géothermie - Réalisation, suivi et abandon d'ouvrages de captage ou de surveillance des eaux souterraines réalisés par forages

<sup>6</sup> NF X 10-970 - Forage d'eau et de géothermie – Sonde géothermique verticale (échangeur géothermique vertical en U avec liquide caloporteur en circuit fermé) - Réalisation, mise en œuvre, entretien, abandon

## 2.2.1 Techniques de foration

Différentes techniques existent et le choix de l'une ou l'autre repose sur la nature des terrains à traverser, la profondeur à atteindre, le diamètre de l'ouvrage, les mesures et observations à effectuer, mais aussi le coût induit. La technique employée peut parfois changer au cours de la réalisation d'un forage, par exemple si la nature des terrains change.

En elles-mêmes, ces techniques ne sont pas impactantes pour le milieu, mais, indirectement, elles peuvent produire des effets indésirables pour la productivité du forage et pour le milieu, en particulier pour le milieu proche du forage (donc, pour les éventuels forages voisins). Ces effets indirects peuvent avoir différentes causes :

- Méconnaissance du contexte géologique entraînant une programmation d'équipement du forage inadaptée et par voie de conséquence, un équipement du forage inadapté. Cela peut entraîner des défaut d'isolement d'aquifères, leur mise en communication avec la surface ou des échanges d'eaux de qualité différentes entre aquifères ;
- Techniques inadaptées à la cimentation : les méthodes qui ne permettent pas la réalisation d'un espace annulaire suffisamment épais pour garantir une cimentation correcte (5 cm d'épaisseur minimale selon la norme NF X 10-999) sont à proscrire pour les forages d'eau car elles ne permettent pas d'assurer l'étanchéité recherchée ;
- Fluides de foration : certaines techniques de foration sont obligatoirement couplées à l'utilisation de fluides (MFT, Rotary) ce qui peut parfois induire des impacts spécifiques. Ces cas sont détaillés dans le chapitre 2.2.2.

Les différentes techniques de foration susceptibles d'être utilisées pour réaliser des forages d'eau géothermiques et leurs effets indirects potentiels, quand ils existent, sont répertoriées dans le Tableau 2. Ces effets indirects potentiels ont été inventoriés à dire d'experts. Ils ne sont pas illustrés d'exemples de cas réels car il n'a pas été possible de recueillir d'éléments documentaires mettant clairement en évidence des pollutions d'aquifères directement imputables à la foration.

| Techniques                           | Impacts potentiels                                                                                                                              | Possibilités de prévention/remédiation                                                              |
|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Fonçage                              | Pas d'espace annulaire → défaut d'isolement → infiltration depuis surface, mise en relation d'aquifères                                         | À proscrire                                                                                         |
| Microforage                          | Espace annulaire étroit → défaut d'isolement → infiltration depuis surface, mise en relation d'aquifères                                        | À proscrire pour les forages d'eau, le diamètre trop faible ne permet pas l'application de la norme |
| Battage                              | Si défaut d'isolement des aquifères au fur et à mesure de la foration → infiltration depuis surface, mise en relation d'aquifères               | Adaptation du programme de cimentation en fonction de la géologie                                   |
| Havage                               |                                                                                                                                                 |                                                                                                     |
| Tarière simple                       |                                                                                                                                                 |                                                                                                     |
| Marteau fond de trou (MFT)<br>Rotary | Si défaut d'isolement des aquifères au fur et à mesure de la foration → infiltration depuis surface, mise en relation d'aquifères               | Adaptation du programme de cimentation en fonction de la géologie                                   |
|                                      | Fluide de forage → modification des caractéristiques du milieu à proximité immédiate du forage<br><br>Adjuvants de foration → impact mal évalué | Choix des fluides à adapter au milieu, repompage suffisant                                          |

Tableau 2 : Techniques de foration et impacts potentiels pour les forages d'eau

Concernant le défaut d'isolement des aquifères, le « Guide d'application de l'arrêté interministériel du 11/9/2003 relatif à la rubrique 1.1.0 de la nomenclature eau : sondage, forage, puits, ouvrage souterrain non domestique » (MEDD, BRGM 2004) impose de réaliser une cimentation de l'annulaire par injection sous pression par le bas :

- Dans la partie supérieure du forage ;
- Au droit de chaque formation aquifère non exploitée

De plus, ce guide indique qu' « afin d'éviter tout mélange d'eau entre les différentes formations aquifères rencontrées, lorsqu'un forage, puits, sondage ou ouvrage souterrain traverse plusieurs formations aquifères superposées, sa réalisation doit être accompagnée d'un aveuglement successif de chaque formation aquifère non exploitée par cuvelage et cimentation. ».

En ce qui concerne les forages d'eau, le respect de la réglementation (isolement des formations et diamètre de cimentation minimum) associé à une adaptation de l'équipement à la réalité du milieu traversé par le forage (ce qui relève de l'expertise technique du maître d'œuvre et du foreur) sont à même de prévenir les risques associés à la foration proprement dite.

## 2.2.2 Fluides de forage et adjuvants de foration

### a Fluides de forage

Certaines techniques de foration sont associées à l'utilisation de fluides dont les principales fonctions sont :

- d'améliorer l'évacuation des débris de foration (cuttings) ;
- de refroidir l'outil de foration ;
- de soutenir les parois du forage ;
- de prévenir le gonflement ou l'affouillement des parois du trou ;
- de contrôler les pertes de fluides dans les formations perméable ;
- de contrôler les venues d'eau notamment dans le cas des nappes artésiennes (par l'adjonction d'adjuvants augmentant la densité) ;
- de permettre la rotation de l'outil (cas de l'air pour le MFT).

Différents types de fluides peuvent être employés ; le choix de l'un ou l'autre dépend de la nature des terrains à traverser et de la technique employée. Il peut s'agir d'air, d'eau ou de boues de nature variable (tableau 3).

| Nature du fluide                    |                                             | Contexte d'utilisation                    |
|-------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Air                                 |                                             | Formations compactes ou semi-compactes    |
| Mousse (=air + adjuvants chimiques) |                                             | Cavité, karst, remonté d'air insuffisante |
| Eau                                 |                                             | Formations non consolidées                |
| Boues                               | Native                                      | Formations non consolidées                |
|                                     | Bentonitique                                | Formations non consolidées                |
|                                     | Biodégradable (polymères végétaux)          | Formations non consolidées                |
|                                     | Non biodégradables (polymères synthétiques) | Formations non consolidées                |

Tableau 3 : Relation fluide/milieu

L'utilisation de ces fluides peut avoir des conséquences néfastes pour la productivité du forage, mais aussi pour le milieu, en particulier dans la zone proche du forage. Certaines seront limitées dans l'espace et dans le temps, d'autres seront difficilement réversibles.

Un choix de fluide adapté au milieu permet de minimiser le risque.

Les impacts potentiellement liés aux fluides de forage sont listés et classés dans le Tableau 4.

| <b>Fluide</b>                       | <b>Impacts potentiels</b>                                                                                                                                                                                                       | <b>Zone d'action</b>                                                | <b>Réversibilité</b>                    | <b>Possibilités de prévention/remédiation</b>                                                                |
|-------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Air                                 | Oxydation du milieu si initialement réducteur (durée faible) → précipitation (Fe, Mn) théoriquement possible → obturation de la perméabilité.<br>Affecte essentiellement la productivité de l'ouvrage.                          | alentours immédiats du forage pour l'oxydation                      | Durée limitée dans le temps             | Il est parfois possible d'y remédier en phase de développement                                               |
| Mousse (=air + adjuvants chimiques) | Mêmes impacts que l'air (Oxydation du milieu si initialement réducteur (durée faible) → précipitation (Fe, Mn) théoriquement possible → obturation de la perméabilité)<br>Affecte essentiellement la productivité de l'ouvrage. | alentours immédiats du forage pour l'oxydation                      | Durée limitée dans le temps             | Il est parfois possible d'y remédier en phase de développement                                               |
|                                     | Action des adjuvants chimiques<br>Effets sur les milieux non décrits                                                                                                                                                            | alentours immédiats du forage. Une migration est néanmoins possible | Durée limitée dans le temps, réversible | Compensé, en tout ou partie, en phase de pompage (tests hydrauliques et exploitation)                        |
| Eau                                 | Introduction d'eau de qualité différente dans l'aquifère                                                                                                                                                                        | alentours immédiats du forage. Une migration est néanmoins possible | Durée limitée dans le temps, réversible | Compensé, en tout ou partie, en phase de pompage (tests hydrauliques et exploitation)                        |
|                                     | - Hydratation de formations géologique gonflantes → gonflement → instabilités géotechniques<br>- Dissolution de formations géologiques solubles → instabilités géotechniques                                                    | alentours immédiats du forage                                       | Non réversible                          | Impact maîtrisable si anticipé (agents anti-gonflement, fluides saturés, isolement des formations sensibles) |

|       |                             |                                                                                                                   |                                                                              |                                                  |                                                                                                                           |
|-------|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Boues | Tous types de boues         | Introduction d'eau de qualité différente dans l'aquifère                                                          | alentours immédiats du forage                                                | Durée limitée dans le temps, réversible          | Compensé, en tout ou partie, en phase de pompage (tests hydrauliques et exploitation)                                     |
|       |                             | Hydratation de formations géologiques gonflantes → gonflement → instabilités géotechniques                        | alentours immédiats du forage                                                | Non réversible                                   | Impact maîtrisable si anticipé (agents anti-gonflement, fluides saturés, isolement des formations sensibles)              |
|       |                             | Dissolution de formations géologiques solubles → dissolutions → instabilités géotechniques                        |                                                                              |                                                  |                                                                                                                           |
|       | Bentonitique                | Colmatage (cake)                                                                                                  | alentours immédiats du forage                                                | Difficilement réversible                         | Affecte essentiellement la productivité de l'ouvrage                                                                      |
|       |                             | Turbidité                                                                                                         | alentours immédiats du forage → conflits d'usage possible si forages voisins | Durée limitée dans le temps, réversible          | Compensé, en tout ou partie, en phase de pompage (tests hydrauliques et exploitation)                                     |
|       | Polymères biodégradables    | Destruction du polymère par les bactéries du sous-sol → prolifération bactérienne → colmatage (par gel bactérien) | alentours immédiats du forage                                                | Réversible par action de bactéricides et pompage | Affecte essentiellement la productivité de l'ouvrage<br>Remédiation possible<br>Toxicité des bactéricides non décrite     |
|       | Polymères non biodégradable | Colmatage                                                                                                         | alentours immédiats du forage                                                | Réversible par action chimique et pompage        | Affecte essentiellement la productivité de l'ouvrage<br>Remédiation possible<br>Toxicité des agents chimiques non décrite |

Tableau 4 : Fluides de forage

## **b Adjuvants de foration**

Des adjuvants de natures très variées peuvent être utilisés en cours de foration :

- adjuvants associés aux fluides de foration : améliorent les caractéristiques rhéologiques des fluides (donc les propriétés de maintien des parois du forage, de contrôle des pertes, de contrôle de la pression liée à l'artésianisme,...), améliorent les conditions de fonctionnement de l'outil (lubrifiant, dégrippant...);
- adjuvants utilisés dans les ciments : permettent de contrôler les densités de ciments, les temps de prise, d'améliorer la conductivité thermique ;
- adjuvants utilisés en cas d'incident de forage (pour décoincer un train de tige, contrôler l'artésianisme, limiter les pertes) ;
- agents de développement (nettoyer les parois de forage colmatées et développer les réservoirs calcaires et sablo-argileux) ;
- agents désinfectants et anti-corrosion ;
- produits divers utilisés sur le chantier de forage et susceptibles d'être introduits fortuitement dans le milieu souterrain via le forage : graisses, huiles moteurs, carburants, ...

Leur diversité très importante (produits commerciaux prêts à l'emploi) ne permet pas de décrire les caractéristiques physico-chimiques de chacun et leur comportement dans le milieu. D'autant plus que les données complètes sur leur composition ne sont pas souvent disponibles (pour cause de secret de fabrication), malgré la loi REACH<sup>1</sup>. Le cadre du présent projet ne le permet pas ; mais il serait envisageable d'analyser le comportement de certains d'entre eux à partir d'études expérimentales tenant compte des volumes employés, des durées d'exposition du milieu à l'utilisation de ces produits, à leur toxicité en milieu naturel et à leur dégradabilité.

Pour l'heure, seule une note technique établissant la synthèse des différents types d'adjuvants susceptibles d'être utilisés en forages a été réalisée par la société Forage Assistance. Elle est fournie en annexe 3 et donne quelques recommandations générales d'utilisation de ces produits pour en limiter les impacts. Cette note traite également de produits de développement, de désinfection et de réhabilitation de forages pour lesquels la problématique est la même.

Faute d'exemples documentés de cas de pollutions d'aquifères directement liés à l'utilisation d'adjuvants de foration (mais aussi de développement, de désinfection et de réhabilitation) et bien qu'il soit reconnu à dire d'expert, ce type d'impacts potentiels n'a pas pu être illustré.

## **2.3 FORATION – SONDE GEOTHERMIQUE VERTICALE**

### **2.3.1 Techniques de foration**

Les techniques de foration mises en œuvre pour les SGV sont les mêmes que pour les forages d'eau. En elles-mêmes, elles ne sont pas impactantes pour le milieu, mais,

---

<sup>1</sup> La loi REACH (Registration, Evaluation and Authorisation of Chemicals) : règlement européen entré en vigueur le 1<sup>er</sup> juin 2007 et visant à améliorer la connaissance des usages et des propriétés dangereuses des substances chimiques fabriquées ou importées dans l'union européenne afin dans améliorer la gestion des risques (brochure d'information REACH),

indirectement, elles peuvent produire des effets indésirables, en particulier pour le milieu proche du forage. Ces effets indirects peuvent avoir différentes causes :

- Imprévu géologique : idem que dans le cas des forages d'eau ;
- Technique inadaptée à une bonne cimentation : les techniques de microforage et de fonçage ne permettent pas de garantir une cimentation intégrale de l'annulaire des forages du fait des petits diamètres qu'elles supposent. Par ailleurs, ces techniques nécessitent la mise en place de tubages de soutien des parois qui ne peuvent être ni retirés, ni isolés par cimentation. Elles ne permettent pas de garantir l'étanchéité des forages ;
- Fluides de foration : identiques aux forages d'eau et détaillés dans le chapitre 2.2.2 ;
- Technique de réalisation spécifique aux SGV : foration en une seule étape, non interrompue par des phases de cimentation à l'avancement. La norme NF X10-970 recommande de cimenter immédiatement après la foration et l'installation de la sonde pour « éviter que le trou nu du forage ne s'éboule ou ne représente une source de pollution potentielle pour les eaux souterraines ». Malgré cette recommandation, l'étape de foration proprement dite peut être vectrice de pollutions et/ou de mise en relation d'aquifères.

Les différentes techniques de foration susceptibles d'être utilisées pour réaliser des SGV et leurs effets indirects potentiels, sont répertoriées dans le Tableau 5.

| Techniques                           | Impacts potentiels                                                                                                                          | Possibilités de prévention/remédiation                                     |
|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Microforage<br>Fonçage               | Diamètre insuffisant à une bonne cimentation → défaut d'isolement → infiltration depuis surface, mise en relation d'aquifères               | À proscrire                                                                |
| Battage<br>Havage<br>Tarière simple  | Infiltration depuis surface et/ou mise en relation d'aquifères en cours de foration                                                         | Peu évitable lors de la foration<br>Isolement des formations post-foration |
| Marteau fond de trou (MFT)<br>Rotary | Infiltration depuis surface et/ou mise en relation d'aquifères en cours de foration                                                         | Peu évitable lors de la foration<br>Isolement des formations post-foration |
|                                      | Fluide de forage → modification des caractéristiques du milieu à proximité immédiate du forage<br>Adjuvants de foration → impact mal évalué | Choix des fluides à adapter au milieu                                      |

Tableau 5 : Techniques de foration et impacts potentiels pour les SGV

### 2.3.2 Fluides de forage et adjuvants de foration

Les fluides et adjuvants de foration utilisés dans le cas des SGV sont les mêmes que ceux utilisés pour les forages d'eau ; leurs impacts potentiels sont donc identiques à ceux décrits au paragraphe 2.2.2.

L'absence d'isolement des formations en cours de forage, implique que les fluides sont en contact avec l'ensemble des formations et rend leur adéquation à des formations particulières problématiques.

## 2.4 ÉQUIPEMENTS – FORAGE D'EAU

L'équipement d'un forage a pour rôle d'optimiser le captage de la ressource exploitée (eau ou énergie), et de participer à la protection du milieu souterrain.

Comme illustré en Figure 1, l'équipement est composé d'une colonne captante elle-même constituée de divers éléments (bouchon de fond, crépine, tubes pleins, centreurs, massif de gravier) et d'une cimentation venant combler les parties non captées du forage. Il doit être dimensionné pour permettre d'atténuer l'effet « drain vertical » du forage, en isolant la surface du milieu souterrain, et en isolant les aquifères superposés<sup>2</sup>. Il participe également à la stabilité et à la sécurité du forage.

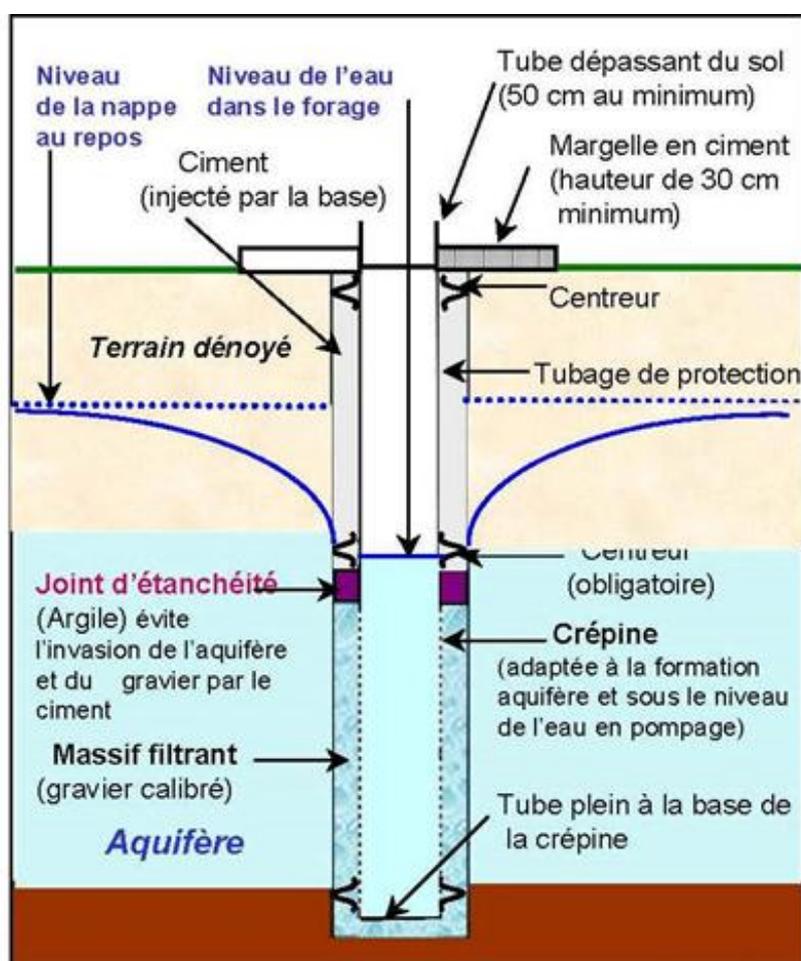


Figure 1 : Exemples d'équipements classiques d'un forage d'eau

<sup>2</sup> « le site d'un forage est choisi en ayant à l'esprit de prévenir tout risque de pollution par migration des pollutions de surface ou souterraines ou mélange des différents niveaux aquifères » ; « un même ouvrage ne peut en aucun cas permettre le prélèvement simultané dans plusieurs aquifères distincts superposés » (MEDD, BRGM, 2004)<sup>2</sup> (arrêté interministériel du 11/09/2003)

Les impacts sur le milieu potentiellement liés à chaque élément constitutif de l'équipement des forages d'eau sont décrits ci-dessous ; ils sont directement liés au choix des matériaux et à la qualité de leur mise en place.

## 2.4.1 Tubage et crépine

### *a* Tubages

Les tubages ont pour rôle principal de :

- soutenir les parois du forage (résistance à l'écrasement) ;
- isoler et protéger les zones non captées (étanchéité) ;
- accueillir du matériel de mesure ou/et de production (tubing de traitement, pompe) ;
- supporter différentes contraintes pendant les interventions de maintenance.

Leur durée de vie, et par conséquent celle des ouvrages, est directement liée à la qualité de leur mise en place et à leur capacité à résister aux agressions (variations de température et de pression, corrosion).

Le Tableau 6 ci-dessous présente les avantages et inconvénients de différents matériaux disponibles, ainsi que les milieux pour lesquels ils sont adaptés ou pas.

Le Tableau 7 synthétise les impacts potentiellement associés aux équipements de tubage. Ils peuvent résulter :

- soit d'un choix de matériaux inadaptés au milieu ;
- soit de l'association inappropriée de matériaux : la mise en contact de deux métaux de qualité différente risque d'entraîner un « effet pile » et l'altération rapide du tube par corrosion galvanique ;
- soit de défauts d'assemblage des éléments de la colonne : le mode d'assemblage à privilégier est le vissage des tubes (le soudage présente un risque de fragilisation des tubes). A défaut le collage est envisageable pour les tubes PVC même si des réserves sur la résistance et l'étanchéité des jointures peuvent être émises dans ce cas ;
- soit de dégradations physiques liées à des interventions sur le forage : les matériaux de type PVC, aciers revêtus et fibre de verre sont très sensibles aux rayures et écorchage (le simple fait de descendre un appareil de diagraphie dans ce type de tubage risque d'accélérer sa dégradation si la surface en est écorchée). Le stockage des tubages nécessite également certaines précautions pour que les matériaux conservent intactes leur caractéristiques (NF X 10-999), (se rapprocher des fournisseurs).

| Matériaux                |                                                                                               | Résistance mécanique                                                                                                                                                             | Corrosion                                                                                                                                          | Milieu                                                              |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| PVC alimentaire          |                                                                                               | Faible résistance mécanique → risque d'écrasement et/ou d'éclatement. Si dénoisement : écrasement facilité.                                                                      | Insensible                                                                                                                                         | Adapté aux forages peu profonds (< 200m)                            |
| PEHD                     |                                                                                               | Modérée. Sensible aux altérations de surface (rayures)                                                                                                                           | insensible                                                                                                                                         | Tout milieu                                                         |
| Acier                    |                                                                                               | Excellente                                                                                                                                                                       | très sensible                                                                                                                                      | Inadapté aux eaux très minéralisées                                 |
| Fibre de verre           |                                                                                               | Modérée. Sensible aux altérations de surface (rayures)                                                                                                                           | Insensible                                                                                                                                         | Adapté à tous milieux                                               |
| Acier inoxydable         | austénitiques                                                                                 | Bonne résistance                                                                                                                                                                 | Sensible à la fissuration par corrosion sous contrainte en présence de chlore                                                                      | Inadapté si présence de chlore<br>Si chlore, ajouter Mo à l'alliage |
|                          | ferritiques                                                                                   | Moins résistant que les autres nuances.                                                                                                                                          | Très peu sensible à la fissuration par corrosion sous contrainte en présence de chlorures                                                          |                                                                     |
|                          | duplex                                                                                        | Bonne                                                                                                                                                                            | Très peu sensible                                                                                                                                  | Adaptés aux environnements marins                                   |
|                          | martensitiques                                                                                | Grande dureté et résistance mécanique,                                                                                                                                           | Résistance limité (la plus faible des aciers inoxydables)<br>Bonne résistance à la fissuration par corrosion sous contrainte en présence de chlore | Utilisable en présence de chlore                                    |
|                          | durcissement par précipitation                                                                | Excellente résistance mécanique et grande dureté                                                                                                                                 | Résistance < duplex                                                                                                                                |                                                                     |
| Acier revêtu (galvanisé) | Dans une eau modérément dure à pH neutre, bonne résistance au chlorure, sulfates et nitrates. | Bonne résistance au chlorure, sulfates et nitrates dans une eau modérément dure à pH neutre<br>Corrosion rapide du Zn dans une eau de faible dureté, pH élevé, alcalinité élevée |                                                                                                                                                    | Adapté à eau modérément dure                                        |

Tableau 6 : Matériaux de tubage et résistance mécanique à la corrosion

| Causes                                                                                                     | Impacts potentiels                                                                                                                                                                                                         | Possibilités de prévention/remédiation |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| Matériau inapproprié au milieu                                                                             | Corrosion → percement → mise en relation d'aquifères, intrusion de pollutions, déstabilisation géologique, concentration en métaux dans l'eau souterraine à proximité du forage (contamination possible de forage voisins) | Adaptation des matériaux au milieu     |
| Assemblage inapproprié de matériaux                                                                        | Corrosion → percement → mise en relation d'aquifères, intrusion de pollutions, déstabilisation géologique, concentration en métaux dans l'eau souterraine à proximité du forage (contamination possible de forage voisins) |                                        |
| Dégradation des propriétés de résistance mécanique dans certains contextes (températures élevées, rayures) | Percement → mise en relation d'aquifères, intrusion de pollutions, déstabilisation géologique, concentration en métaux dans l'eau souterraine à proximité du forage (contamination possible de forage voisins)             |                                        |
| Fragilité potentielles au niveau des points d'assemblage (collage, soudage, vissage)                       | Percement → mise en relation d'aquifères, intrusion de pollutions, déstabilisation géologique, concentration en métaux dans l'eau souterraine à proximité du forage (contamination possible de forage voisins)             |                                        |

Tableau 7 : Impacts potentiels liés aux tubages

## **b Crépines**

Comme pour les tubages, le choix du matériau est susceptible de jouer sur la durée de vie des ouvrages. Il doit être adapté au milieu et à la qualité de l'eau captée. Le dimensionnement des crépines (hauteur crépinée, pourcentage d'ouverture, slot) quant à lui, joue un rôle vis-à-vis du rendement de l'ouvrage, mais doit surtout garantir l'isolement des formations aquifères les unes par rapport aux autres et par rapport à la surface (crépine placée seulement en face de la formation à capter).

## **c Lutte contre la corrosion**

Pour lutter contre la corrosion des métaux des tubages, des inhibiteurs de corrosion peuvent être employés. Une classification de ces substances, selon leur mode d'action, est présentée dans le Tableau 8. Leur efficacité est influencée par les caractéristiques chimiques de l'eau et les conditions physiques comme la température et la vitesse d'écoulement.

Leur caractère polluant n'est pas décrit dans la bibliographie. Il pourrait être utile de l'évaluer en tenant compte des volumes mis en jeu au cours de la vie d'un forage et des milieux dans lequel ils sont utilisés.

| Inhibiteurs de corrosion    |                        | Exemples                                                                                                                | Remarques                                                                                                                                                                |
|-----------------------------|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Anodiques                   | Oxydants               | chromates ( $\text{CrO}_4^{2-}$ ), nitrites ( $\text{NO}_2^-$ )                                                         | Efficacité indépendante de la concentration en oxygène dissous.                                                                                                          |
|                             | Non oxydants           | phosphates ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), benzoates ( $\text{C}_7\text{H}_5\text{O}_2^-$ ), molybdates ( $\text{MoO}_4^{2-}$ ) | Nécessite une concentration minimale en oxygène dissous.                                                                                                                 |
| Cathodique                  |                        | ions zinc ( $\text{Zn}^{2+}$ ), polyphosphates ou phosphonates (conjointement avec $\text{Ca}^{2+}$ )                   | Généralement utilisé pour renforcer l'action d'autres types d'inhibiteurs                                                                                                |
| Mixte anodiques/cathodiques |                        | phosphates/zinc, chromates/zinc, phosphonates/zinc, phosphates/polyphosphates, phosphates/phosphonates                  | Plus efficace qu'un traitement réalisé seul. Il y aura une forte sensibilité à la corrosion par piqûres si le traitement anodique est interrompu, sous-dosé ou incorrect |
| Filmants                    | Inhibiteurs organiques | tensioactifs filmants, amines filmantes                                                                                 |                                                                                                                                                                          |
| Absorbants d'oxygène        |                        | sulfites, hydrogène gazeux, hydrazine, carbohydrazine, réducteurs organiques (érythorbate, hydroquinone, gallate)       | Utilisé dans les systèmes à haute température ou hermétiquement fermé                                                                                                    |

Tableau 8 : Classification des inhibiteurs de corrosion

### 2.4.2 Massif de gravier

Les forages d'eau, peuvent être équipés d'un massif de gravier dans le cas où les formations géologiques sont instables ou pour améliorer les conditions de circulation d'eau entre le réservoir aquifère et le forage.

Il ne présente pas de risque pour le milieu à condition de respecter les règles élémentaires suivantes :

- constitué de graviers lavés et désinfectés ;
- placé dans le forage en face d'un seul niveau aquifère.

### 2.4.3 Cimentation

La cimentation fait partie intégrante de l'équipement d'un forage d'eau. Elle remplit différentes fonctions essentielles pour la préservation du milieu souterrain :

- isolant hydraulique : permet de préserver la qualité des eaux de nappe en empêchant les infiltrations des eaux de surface vers la nappe et les communications entre nappes d'eau de qualité différente ;
- stabilisateur du forage : assure le scellement du tubage d'un forage d'eau au terrain ;
- protection de l'équipement (tubage, crépines, ...) : le ciment constitue un écran contre les eaux agressives qui permet d'assurer la longévité de l'installation ;

Pour assurer ces fonctions, la cimentation doit occulter complètement les formations géologiques non captées, garantir le centrage de l'équipement (tubages et boucle de sonde) et être de qualité adaptée au milieu dans lequel elle est réalisée.

Les plus grands efforts doivent porter sur la qualité de sa réalisation du fait de son rôle direct de protection du milieu, mais aussi parce que ses défauts ne sont plus accessibles et corrigables après mise en place.

La cimentation peut être le vecteur indirect d'impacts sur le milieu souterrain, en particulier, quand sa fonction d'isolant hydraulique n'est pas assurée soit par dégradation de ses propriétés physiques, soit par défaut de mise en place.

Les défauts de cimentation apparaissent la plupart du temps dans les contextes exposés dans le Tableau 9 : conditions de milieu particulières, non respects des préconisations techniques et règles de l'art.

Or, les moyens techniques de cimentation dans ces conditions et les méthodes de travail existent et sont décrites entre autres, dans la norme NF X 10-999. La généralisation de leur mise en œuvre constitue la condition élémentaire à des réalisations respectueuses des milieux souterrains. Elle suppose :

- L'anticipation systématique des particularités physiques des milieux forés qui passe par leur connaissance (cf. chapitre 2.4.5);
- Une bonne technicité des foreurs qui implique leur formation ;
- La disponibilité d'outillages adaptés dans les ateliers de forage.

**Par ailleurs, la consultation de différents experts a mis en évidence une lacune concernant le contrôle des réalisations qui, associée à une pression économique sur les coûts de forages, pourrait amener à des pratiques non conformes. Le contrôle des chantiers constitue certainement un levier d'amélioration de la qualité des forages (et de la cimentation en particulier).**

| Causes                                                                                                                                             | Conséquences                               | Impacts potentiels                                                                                                                                                                                                                                 | Possibilités de prévention/remédiation                                                     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Conditions de milieu particulières non anticipées (artésianisme, milieu fissuré, karst, sulfates, CO<sub>2</sub>, formations gonflantes,...</b> | Difficultés techniques pour la cimentation | Défaut de mise en place (cavités, fissures, discontinuité de la cimentation, vides entre tubage et ciment et/ou entre ciment et sous-sol) → défaut d'isolement → mise en relation d'aquifères, intrusion de pollutions, déstabilisation géologique | Remédiation difficile, mais prévention possible (connaissance du milieu)                   |
|                                                                                                                                                    | Qualité de ciment non adaptée au milieu    | Dégradation du ciment (porosité augmentée, écrasement) → défaut d'isolement → mise en relation d'aquifères, intrusion de pollutions, déstabilisation géologique                                                                                    | Remédiation difficile, mais prévention possible (connaissance du milieu)                   |
| <b>Non-respect des préconisations techniques, techniques non maîtrisées, matériel inapproprié</b>                                                  | Défaut de mise en place                    | Défaut d'isolement (cavités, fissures, discontinuité de la cimentation, vides entre tubage et ciment et/ou entre ciment et sous-sol) → mise en relation d'aquifères, intrusion de pollutions, déstabilisation géologique                           | Remédiation difficile, mais prévention possible (sensibilisation, formation de la filière) |
|                                                                                                                                                    | Réaction exothermique de prise du ciment   | Dégradation de l'équipement PVC du forage d'eau (écrasement)                                                                                                                                                                                       | Remédiation difficile, mais prévention possible (utilisation de ciments adaptés)           |

Tableau 9 : Impacts potentiels liés à la cimentation d'un forage d'eau

#### 2.4.4 Tête de forage

Les prescriptions techniques pour la réalisation des forages d'eau non domestiques ((MEDD, BRGM, 2004)<sup>11</sup> prévoient la réalisation d'une tête de forage garantissant la protection du milieu souterrain contre les infiltrations de surface, le contrôle de l'artésianisme, la protection du forage contre toute dégradations physique.

Ce type de tête de forage ne constitue pas une source d'impact, au contraire elle vise à protéger la ressource.

<sup>11</sup> Guide d'application de l'arrêté interministériel du 11/09/2003 relatif à la rubrique 1.1.1.0 de la nomenclature Eau.

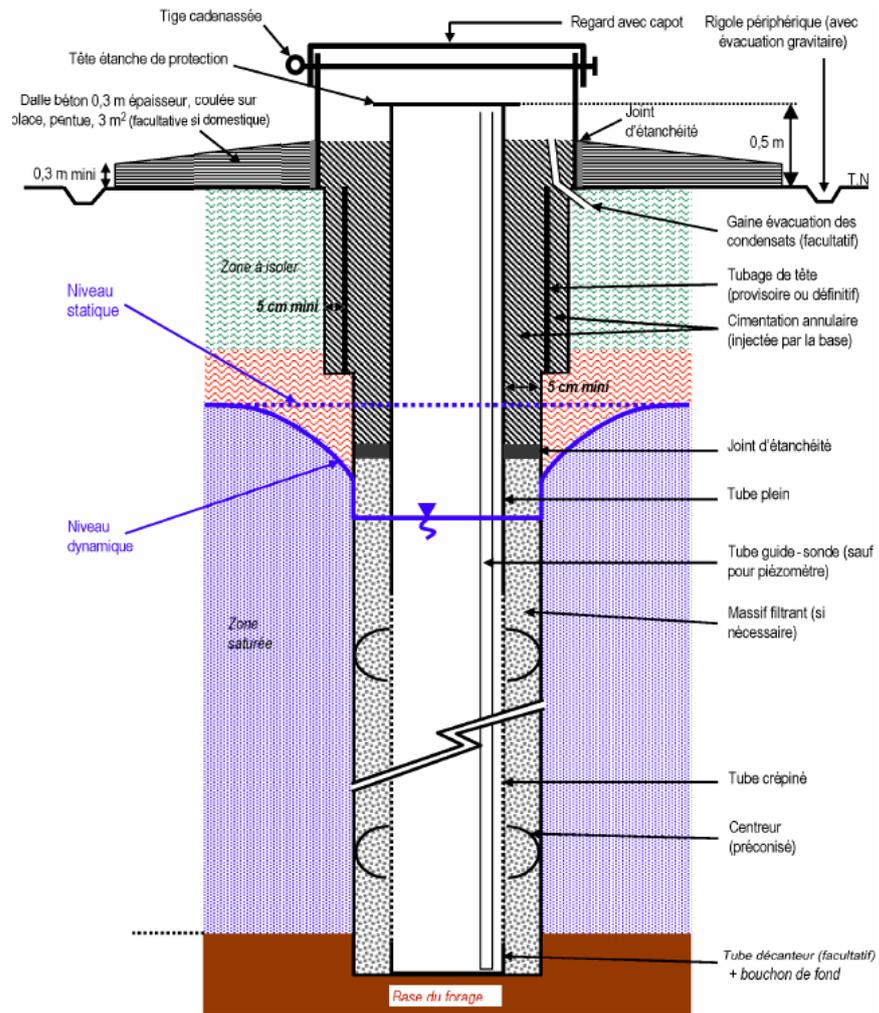


Figure 2 : Exemple de protection de la tête de forage<sup>12</sup>

<sup>12</sup> Source documentaire : BRGM (norme NF X 10-999)

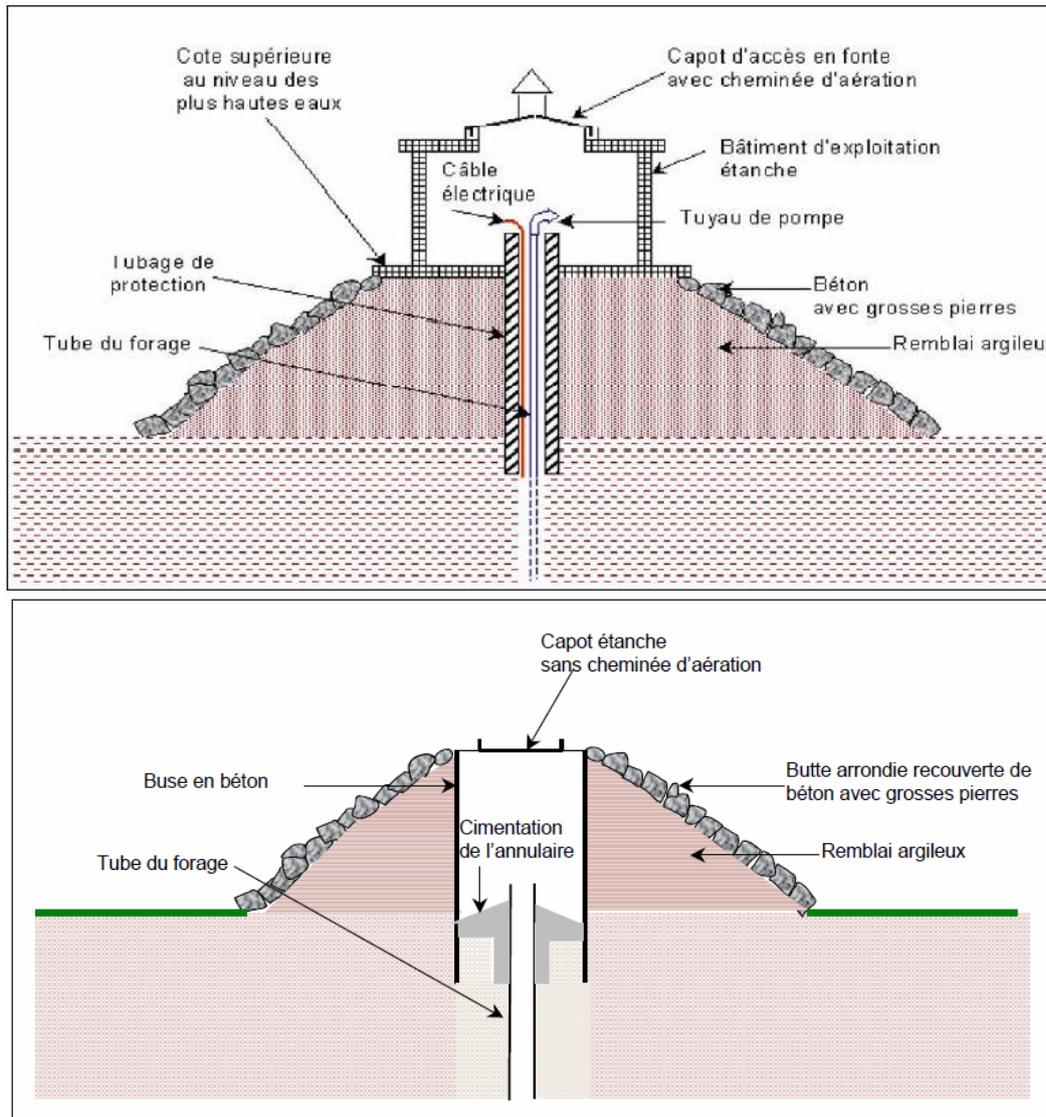


Figure 3 : Exemples de configuration de captage en zone inondable

### 2.4.5 Les milieux particuliers

Le contexte naturel d'implantation d'une installation est un paramètre décisif de la qualité finale de l'ouvrage. En effet, comme déjà évoqué dans les chapitres sur la conception et la cimentation, certains milieux entraînent d'importantes difficultés techniques à la réalisation d'ouvrages géothermiques. Y faire face peut être extrêmement délicat, assurément couteux et parfois nuisible à la préservation du milieu souterrain.

La prévention des risques dans ces contextes délicats repose avant tout sur la connaissance du milieu (et des risques associés) qui conditionne les choix techniques, les choix de matériaux, les choix d'équipement réalisés par le maître d'œuvre.

Les règles élémentaires d'équipement dans ces contextes sont énoncées dans le guide d'application de l'arrêté du 01/09/2003 relatif à la rubrique 1.1.0 de la nomenclature Eau et dans la norme NF X 10-999 ; mais ils relèvent avant tout de la compétence du maître d'œuvre et du foreur.

Dans ces milieux, des mesures de « porté à connaissance » des particularités locales, assorties de règlements et de préconisations techniques spécifiques (pouvant aller jusqu'à l'interdiction de certaines pratiques ou techniques) permettraient de limiter les risques.

| Milieu                                              | Impacts potentiels                                                                              | Possibilités de prévention/remédiation                                                                                                                                                                                                                         |
|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Aquifères superposés</b>                         | Mise en communication de différents aquifères                                                   | Isolement par cimentation, captage d'un seul aquifère par forage                                                                                                                                                                                               |
| <b>Zone de perte (Karsts, milieux fissurés)</b>     | Perte de fluide de forage → arrêt de la foration<br>Cimentation impossible → défaut d'isolement | Adaptation de la cimentation (nature de ciment et technique de cimentation)<br>Isolement de la zone de perte : packer, tubage technique permanent.                                                                                                             |
| <b>Roche non consolidée</b>                         | Non-tenue du trou de forage → arrêt de la foration                                              | Technique de maintien des parois : fluide de forage ou tubage à l'avancement                                                                                                                                                                                   |
| <b>Artésianisme</b>                                 | Mise en communication de différents aquifères<br>Rejets non maîtrisés en surface                | Tête de puits adaptée pendant la foration<br>Adaptation de la technique de foration pour contenir l'artésianisme (densité de boues, vanne, pompage dans forage périphérique,...)<br>Adaptation de la technique de cimentation (packers, chaussette géotextile) |
| <b>Formations salifères, anhydres ou gypsifères</b> | Mouvement de sol (gonflement, affaissement). Déstabilisation du bâti environnant                | Isolement par cimentation<br>Fluide de foration adapté                                                                                                                                                                                                         |
| <b>Argile gonflante</b>                             | Mouvement de sol (gonflement,). Déstabilisation du bâti environnant                             | Isolement par cimentation<br>Fluide de foration adapté (agent anti-gonflement)                                                                                                                                                                                 |
| <b>Mouvements de terrain</b>                        | Risque d'arrachement des installations                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Sols pollués</b>                                 | Infiltration des polluants vers les aquifères                                                   | Isolement par cimentation (éviter l'infiltration)                                                                                                                                                                                                              |
| <b>Gaz</b>                                          | Risque de fuite de gaz en surface                                                               | Connaissance des zones à risque                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Zones inondables</b>                             | Risque d'infiltration des eaux de surfaces vers les aquifères                                   | Tête de puits étanche, ou au-dessus des plus hautes eaux connues                                                                                                                                                                                               |

|                                                                                       |                                              |                        |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------|
| <b>Sous-sol riche en sulfate, Eau acide</b>                                           | Dégradation des ciments → défaut d'isolation | Ciment spéciaux        |
| <b>Environnement marin, Présence de H<sub>2</sub>S, Zone de battement de la nappe</b> | Corrosion des tubages → défaut d'isolation   | Acier et ciment adapté |

Tableau 10 : Milieux naturels particuliers et impacts potentiels des forages d'eau

## 2.5 EQUIPEMENT – SONDE GEOTHERMIQUE VERTICALE

Comme illustré en Figure 4, l'équipement d'une sonde se compose de la boucle de sonde (qui comprend la sonde en PEHD proprement dite et la cimentation complète de l'ouvrage) et du collecteur de surface.

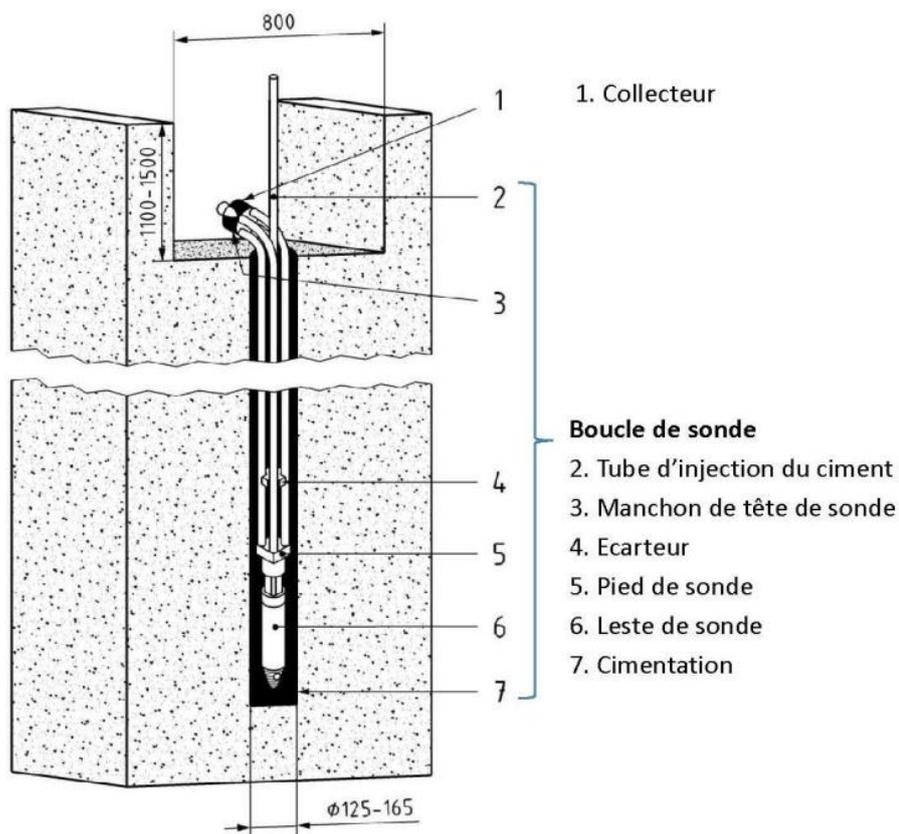


Figure 4 : Exemples d'équipements classiques d'une SGV

### 2.5.1 Cimentation

Comme pour un forage d'eau, la cimentation fait partie intégrante de l'équipement d'une SGV. Elle remplit les mêmes fonctions essentielles pour la préservation du milieu souterrain (isolant hydraulique, stabilisateur de forage, protection des tubes de sonde) et joue en plus le rôle de conducteur thermique (elle assure une continuité du point de vue de la conductivité thermique entre le sous-sol et la sonde).

Pour assurer ces fonctions, la cimentation doit occuper la totalité de la hauteur de la SGV, garantir le centrage de la boucle de sonde et être de qualité adaptée au milieu dans lequel elle est mise en place (norme NF X 10-970).

Comme pour les forages d'eau, la plus grande attention doit être portée à sa qualité car ses défauts ne sont plus accessibles et corrigables après mise en place. Or, elle peut être le vecteur indirect d'impacts sur le milieu souterrain, en particulier, quand sa fonction d'isolant hydraulique n'est plus assurée soit par dégradation de ses propriétés physiques, soit par défaut de mise en place. D'importants désordres géotechniques (pouvant entraîner la déstabilisation de bâtiments) et environnementaux en lien avec des défauts de cimentation ont été rapportés : affaissements associés à des phénomènes de gonflement de formations gonflantes ou de dissolution de formations solubles ; effondrements en lien avec des phénomènes de soutirage (en présence de cavités souterraines) ; débordements associés à de l'artésianisme (avec pour conséquence, la pollution d'eaux de surface). Les exemples de Staufen-en-Brisgau (Allemagne), Hisprich (Lorraine), Lochwiller (Alsace) et Hauterive (Suisse), détaillés au chapitre 5, illustrent ces phénomènes.

Les défauts de cimentation (et les impacts associés) apparaissent la plupart du temps dans les mêmes conditions que pour les forages d'eau : conditions de milieu particulières, non respect des préconisations techniques et règles de l'art (cf. Tableau 9), mais leur occurrence est accrue du fait de deux particularités des SGV :

- la méthode de cimentation d'une SGV préconisée par la norme NF X 10-970 prévoit une seule phase de cimentation qui intervient après la foration de la totalité de la hauteur de la SGV (il n'y a donc pas d'isolement successif des formations traversées). Ce mode de cimentation est susceptible de provoquer des mises en relation d'aquifère sans conséquence la plupart du temps (car très brèves), mais au contraire très lourdes de conséquences dans des contextes sensibles de type formations solubles ou gonflantes (cas de Staufen et Hisprich), mais aussi dans le cas de formations karstiques ;
- la géométrie des SGV : le diamètre de la sonde n'est que très légèrement inférieur au diamètre recommandé du forage (norme NF X 10-970), ce qui implique, selon certains experts, que l'épaisseur résultante pour la cimentation (1 à 3 cm) est insuffisante pour garantir l'étanchéité de l'ensemble et particulièrement de la tête de sonde. Ceci d'autant plus que la souplesse de la sonde rend possible des points de contacts localisés entre la sonde et les parois du forage. Ce point de vue est contredit par d'autres experts et aucune référence bibliographique n'a permis de l'éclaircir. L'épaisseur optimale de

cimentation garantissant l'étanchéité d'un forage devra faire l'objet d'une évaluation expérimentale.

Ces considérations impliquent un aléa associé à la cimentation de sondes (dans des contextes naturels particuliers) plus élevé que dans le cas des forages d'eau ; elles ont conduit à la définition de préconisations techniques spécifiques édictées dans la norme NF X 10-970 relative aux sondes géothermiques verticales. Ces recommandations sont parfois insuffisantes pour garantir l'inocuité des installations :

- En zones de pertes (milieux fissurés, karstiques,...) : , la norme préconise des moyens particuliers à mettre en œuvre (paragraphe 10.2), voire l'abandon du forage en cas de cavités importantes. Or, le surcoût engendré par ces moyens et le manque d'expérience de certains foreurs ne permettent pas de garantir qu'ils soient systématiquement mis en œuvre.
- En présence de gypse, d'anhydrite ou de formation salifère (ainsi qu'en zone karstique) : la norme « déconseille vivement » l'installation d'une sonde géothermique. Or, les techniques de foration utilisées permettent des arrivées d'eau, fussent-elles temporaires, dans les formations susceptibles de provoquer des phénomènes de gonflement ou de dissolution difficilement maîtrisables. En outre, le manque d'informations aisément accessibles sur l'existence et la localisation des zones à risque, surtout lorsqu'aucun bureau d'étude n'intervient lors de la conception, accroît le risque d'impact.
- En cas d'artésianisme, s'il est identifié comme éruptif ou ayant une pression hydrostatique trop importante, la norme (paragraphe 11) recommande l'abandon du forage. Dans les cas d'artésianisme plus modéré, des moyens particuliers à mettre en œuvre sont préconisés, mais ne sont pas toujours mis en œuvre par les foreurs.
- En présence de formations non consolidées, la norme préconise l'usage d'un tubage provisoire, retiré au cours de la cimentation. De l'avis des experts, cette solution n'est que rarement mise en œuvre, ce qui peut entraîner le des mises en communication d'aquifères superposés ;

Dans ces contextes particuliers, la norme mériterait d'être relayée par une réglementation territorialisée, fonction de la connaissance des zones à risque, qui indique :

- les zones où des SGV peuvent ou ne peuvent pas être réalisées ;
- les précautions techniques à respecter ;
- des obligations de moyens pour les foreurs : disponibilité d'outillages et de matériaux adaptés dans les ateliers de forage.

Des mesures de contrôle des réalisations en phase de chantier devraient également accompagner cette réglementation.

Concernant les ciments, la norme (NF X 10-970) préconise l'utilisation de coulis de remplissages adaptés aux échangeurs géothermiques (bonne conductivité thermique, résistance aux contraintes thermiques) et résistants aux contraintes chimiques ; mais ces caractéristiques ne sont pas normalisées. Le comportement des ciments dits « géothermiques » dans le milieu naturel et face aux sollicitations thermiques associées à l'exploitation des sondes n'est pas bien décrit et des travaux complémentaires devraient être menés à ce sujet afin d'alimenter une documentation normative à venir (groupe de travail « Norme ciment géothermique » en cours de réflexion).

### 2.5.2 Tête de forage

Dans le cas d'une SGV, les recommandations existantes pour la réalisation de la tête de forage (norme NF X 10-970) visent essentiellement à assurer la protection de la boucle de sonde en surface et de bonnes conditions pour son raccordement au collecteur. La tête de forage est donc généralement enterrée sauf en cas d'artésianisme.

Cette configuration, idéale pour la protection physique de l'ouvrage, peut avoir pour conséquence négative de ne pas permettre le contrôle de l'installation (de sa cimentation en particulier) et d'aboutir à l'oubli de la localisation de la ou les sondes au bout de plusieurs années. Différents exemples de cas de sondes n'ayant pas pu être contrôlés par les autorités en charge de la police de l'eau ont été rapportés par les experts consultés. De plus cette configuration ne garantit pas une protection idéale contre l'infiltration en zone inondable.

Par ailleurs, et au-delà de la configuration des têtes de SGV, la géométrie des tranchées de liaison entre SGV et collecteur recommandée dans la norme NF X 10-970 est sujette à caution car elle prévoit une pente dont le point bas correspond à la tête de sonde et est susceptible de faire de la sonde l'exutoire d'un ruissellement de surface. Il s'agit d'un impact potentiel présumé, mais non avéré car non observé qui mérite cependant d'être pris en compte.

| Milieu                                          | Impacts potentiels                                                                              | Possibilités de prévention/remédiation                                                                       |
|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Aquifères superposés</b>                     | Mise en communication de différents aquifères                                                   | Isolement par cimentation                                                                                    |
| <b>Zone de perte (Karsts, milieux fissurés)</b> | Perte de fluide de forage → arrêt de la foration<br>Cimentation impossible → défaut d'isolement | Adaptation de la cimentation<br>Isolement de la zone de perte<br>Si % de cavités important : SGV à proscrire |
| <b>Roche non consolidée</b>                     | Non-tenue du trou de forage → arrêt de la foration                                              | Technique de maintien des parois                                                                             |
| <b>Artésianisme</b>                             | Mise en communication de différents aquifères<br>Rejets non maîtrisés en surface                | Tête de puits adaptée pendant la foration<br>Adaptation de la technique de                                   |

|                                                                                       |                                                                                  |                                                                                                                        |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                       |                                                                                  | foration<br>Adaptation de la technique de cimentation<br>Si artésianisme important : SGV à proscrire                   |
| <b>Formations salifères, anhydres ou gypsifères</b>                                   | Mouvement de sol (gonflement, affaissement). Déstabilisation du bâti environnant | SGV à proscrire                                                                                                        |
| <b>Argile gonflante</b>                                                               | Mouvement de sol (gonflement,). Déstabilisation du bâti environnant              | Isolement par cimentation<br>Fluide de foration adapté<br>SGV à proscrire, selon l'épaisseur des formations gonflantes |
| <b>Mouvements de terrain</b>                                                          | Risque d'arrachement des installations                                           |                                                                                                                        |
| <b>Sols pollués</b>                                                                   | Infiltration des polluants vers les aquifères                                    | Isolement par cimentation                                                                                              |
| <b>Gaz</b>                                                                            | Risque de fuite de gaz en surface                                                | Connaissance des zones à risque                                                                                        |
| <b>Zones inondables</b>                                                               | Risque d'infiltration des eaux de surfaces vers les aquifères                    | Tête de puits étanche, ou au-dessus des plus hautes eaux connues                                                       |
| <b>Sous-sol riche en sulfate, Eau acide</b>                                           | Dégradation des ciments → défaut d'isolation                                     | Ciment spéciaux                                                                                                        |
| <b>Environnement marin, Présence de H<sub>2</sub>S, Zone de battement de la nappe</b> | Corrosion des tubages → défaut d'isolation                                       | Ciment adapté                                                                                                          |

Tableau 11 : Milieux naturels particuliers et impacts potentiels des SGV

## 2.6 DEVELOPPEMENTS – FORAGES D'EAU

Le développement est une étape indispensable avant l'exploitation de tout forage d'eau quelle que soit l'utilisation prévue pour cette eau. L'objectif est d'améliorer la productivité du puits. Pour cela il existe différentes méthodes exposées dans le Tableau 12.

D'une façon générale, les techniques de développement sont peu impactantes pour le milieu souterrain (cf. Tableau 12) car la zone d'action du développement est limitée à la proximité immédiate du forage et le développement est de faible durée (quelques heures). Il risque d'affecter essentiellement la productivité de l'ouvrage, sauf dans certains cas particuliers exposés dans le Tableau 13 où l'intégrité du sous-sol peut être atteinte.

| Développement   |                     | Objectif                                     | Impacts potentiels                                                                                                                                                  |
|-----------------|---------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Surpompage      |                     | Éliminer les fines                           | Dégradation du matériel de pompage exploité en sur régime<br>Déstabilisation du massif de graviers<br>Dénoyage de l'aquifère                                        |
| Pompage alterné |                     | Destruction des ponts de sable               | Déstabilisation du massif de graviers                                                                                                                               |
| Air lift        |                     | Nettoyage                                    | Déstabilisation des parois du forage<br>Oxydation des crépines<br>Piégeage d'air et perturbation des écoulements<br>Écrasement des crépines                         |
| Pistonnage      |                     | Éliminer les ponts de sable                  | Déstabilisation des parois du forage                                                                                                                                |
| Jetting         |                     | Lavage sous pression                         | Liés aux agents de développements susceptibles d'être utilisés<br>Endommagement des crépines (oxydation)                                                            |
| Scarification   |                     | Élimination du cake sur les parois du forage | Déstabilisation des parois du forage                                                                                                                                |
| Cracking        | Hydraulique         | Fracturer                                    | Déstabilisation des parois du forages/de la formation rocheuse sur un rayon plus important                                                                          |
|                 | Explosif            | Fracturer                                    | Jamais utilisé en géothermie très basse énergie                                                                                                                     |
| Chimique        | Polyphosphates      | Éliminer les boues                           | Colmatage                                                                                                                                                           |
|                 | Héxaméta-phosphates | Éliminer boues à base d'argile               | Colmatage                                                                                                                                                           |
|                 | Acide               | Attaque des calcaires                        | Dégagement gazeux (CO <sub>2</sub> ) : risque éruptif<br>Formation de H <sub>2</sub> S en présence de sulfure : corrosif pour les ciments et métaux des équipements |

Tableau 12 : Méthodes de développement et risques associés

| Causes                                | Impacts potentiels                                                                                                         | Possibilités de prévention/remédiation                     |
|---------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Spécificité du milieu : karst         | Débouillage de karst → turbidité / forages proches → effondrement (rare) → Conflit d'usage à proximité immédiate du forage | Prévention/remédiation difficile mais impact très ponctuel |
| Acidification en présence de sulfures | Corrosion → percement → mise en relation d'aquifères, intrusion de pollutions, déstabilisation géologique                  | Adaptation de la technique au milieu                       |

Tableau 13 : Développement dans les milieux particuliers

## 2.7 TESTS HYDRAULIQUES – FORAGES D’EAU

Trois types d’essais sont couramment réalisés sur les forages d’eau exploités en géothermie :

- Essais de puits : son but est d’évaluer les propriétés hydrauliques de l’ouvrage équipé (pertes de charges, débit critique) afin de définir ses conditions optimales d’exploitation. Il consiste à réaliser une série de pompages à différents débits (on parle aussi de pompage d’essai par paliers de débit) et d’observer les rabattements de nappe résultants. .
- Essais de nappe : son but est de déterminer les paramètres hydrodynamiques caractéristiques de l’aquifère (transmissivité, coefficient d’emmagasinement, limites) afin de pouvoir évaluer à long terme, l’influence des prélèvements sur les ressources en eau. Il consiste à solliciter l’aquifère à un débit égal ou supérieur au débit d’exploitation projeté et suivre l’évolution du rabattement au cours du temps dans un ou plusieurs piézomètres. La durée de ces essais varie de quelques heures à plusieurs jours, voire plusieurs mois) selon les débits d’exploitation projetés et les enjeux sur la ressource.

La norme NF X 10-999 donne des recommandations pour la réalisation de ces deux types d’essai.

Le principal impact sur les aquifères des essais par pompage correspond à un rabattement (abaissement du niveau d’eau).

- Essai d’injection : il a pour but d’évaluer la capacité d’absorption d’un aquifère et consiste à y injecter de l’eau au débit de pointe envisagé pour l’exploitation en observant la réponse hydraulique de la nappe (hausse piézométrique). Ce type d’essai est pratiqué systématiquement dans le cas des exploitations géothermique par doublet. Sa durée varie de quelques heures à plusieurs jours.

Les principaux risques associés à ce type de test sont de provoquer un débordement de nappe ou l’envoie d’installations souterraines voisines et d’injecter une eau contaminante pour le milieu. Des précautions minimum de surveillance et de préparation du chantier doivent permettre de les éviter.

Globalement, les risques associés à ces essais sont de même nature que les impacts hydrauliques liés à l’exploitation (cf. chapitre 3) mais la durée des tests limite la portée de leurs impacts potentiels.

## 3 Impacts liés à l'exploitation

Après la phase de réalisation d'un forage géothermique (SGV ou forage d'eau), vient la phase d'exploitation proprement dite. L'objet du présent chapitre est de présenter un inventaire des différents phénomènes physiques, chimiques, microbiologiques susceptibles de résulter de l'exploitation géothermique et éventuellement de modifier le milieu. Trois types d'exploitation sont distingués :

- Exploitation sans prélèvements d'eau ;
- Exploitation avec prélèvement d'eau, mais sans réinjection : technologie du puits unique ;
- Exploitation avec prélèvement d'eau et réinjection : technologie du multiplet.

Un rappel relatif au dimensionnement des installations est également proposé ici, son respect étant posé comme moyen de prévention des impacts potentiellement associés à l'exploitation.

Le comportement des ciments, qui concerne l'ensemble des types d'exploitation, est également abordé.

### 3.1 DIMENSIONNEMENT

Le dimensionnement d'une installation de géothermie est réalisé en phase de préféabilité du projet, à partir de la connaissance des besoins en chaud ou en froid du bâtiment et des caractéristiques de la ressource. Selon les cas, sonde géothermique verticale ou forage d'eau, sont définis :

- La longueur de sonde nécessaire pour la fourniture de la puissance recherchée en fonction du type de terrain. Quand une seule sonde ne suffit pas (cas d'installation pour le collectif et le tertiaire), est également défini le nombre de sondes nécessaires. L'outil de base pour ce dimensionnement est le test de réponse thermique (TRT), réalisé *in situ*. Les résultats de ce test permettent de définir les paramètres d'exploitation à respecter au cours de la vie de l'installation.
- L'emplacement des forages (distance interforages et orientation de l'axe interforages dans le cas d'un doublet), à partir de la connaissance des propriétés de l'aquifères et des installations pré-existantes. Le débit de pompage à partir de tests hydrauliques réalisés *in situ* et la température de rejet.

Le dimensionnement est réalisé pour répondre à un besoin énergétique donné dans de bonnes conditions de performance (COP de la pompe à chaleur) tout en étant compatible avec les ressources disponibles et les usages préexistants (forages d'eau et SGV voisins).

Son respect, en phase d'exploitation, est primordial pour assurer le fonctionnement optimal de l'installation et prévenir bon nombre des impacts qui seront détaillés ci-après (gel des terrains autour d'une SGV, recyclages thermiques entre forages d'une installation sur nappe ou avec des forages voisins, variations piézométriques trop importantes au regard des installations souterraines existantes).

De manière à ce qu'une évolution ultérieure des installations de surface (pompes hydrauliques, pompes à chaleur, régime d'utilisation) puisse avoir lieu sans conséquence dommageable, les puissances et débits maximum ainsi que les régimes d'exploitation prévus doivent être conservés par le maître d'ouvrage. Il n'existe actuellement pas de règlement ou de norme fixant les modifications possibles des installations de surface.

### 3.2 DURABILITE ET DEGRADATION DES CIMENTS

Un ciment est un mélange de silice, d'alumine et de carbonate de chaux selon différentes proportions aboutissant à une importante variété de matériaux (cf. Figure 5).

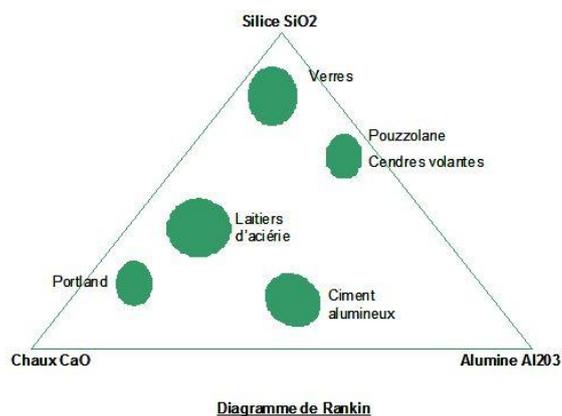


Figure 5 : Variété de compositions possibles des ciments 13

#### 3.2.1 Durabilité

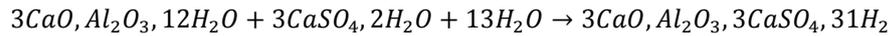
La durabilité d'un ciment est conditionnée par :

- Sa composition chimique au regard du milieu dans lequel il prend place : la formulation du ciment doit être choisie de façon à être compatible avec le milieu au risque d'une dégradation chimique. Le principal exemple d'incompatibilité

<sup>13</sup> <http://recyclprod.com/produits/index.html>

chimique concerne les milieux souterrains riches en sulfates où risquent de se produire les réactions suivantes :

- sulfatation de la chaux libre du ciment et production de gypse (soluble dans l'eau) ;
- transformation des aluminates tricalciques en ettringite très expansive et provoquant l'éclatement du ciment.



*Équation 1 : Action des Sulfates sur les ciments<sup>14</sup>*

Les eaux marines, riches en chlorures, sont également agressives pour certains ciments. Dans un contexte maritime, un ciment Prise Mer doit être utilisé.

- Ses qualités mécaniques : l'opérateur prépare le coulis de ciment selon un rapport produit sec/eau qu'il choisit (pas de normalisation existante) et qui est déterminant pour les propriétés mécaniques du ciment. Ce rapport devrait être adapté au cas par cas afin d'éviter les risques de dégradation (fissuration, éclatement, diminution de la résistance à la compression, diminution de la conductivité thermique) mis en évidence par le LCPC<sup>15</sup> (Lecomte, 2010) sur deux qualités de ciments utilisés sur SGV et qui sont fonction :
  - des conditions du milieu de mise en place du ciment : les travaux du LCPC montrent que la dessiccation entraîne la dégradation physique des ciments par augmentation de leur perméabilité. La question du devenir d'un coulis géothermique en profondeur s'il est en contact avec des couches géologiques non saturées en eau ou peu humides est soulevée par le LCPC (Lecomte, 2010), mais ne pourrait être éclairée que sur la base de travaux complémentaires sur le comportement in situ des coulis géothermiques ;
  - des conditions d'exploitation de l'installation géothermique : l'exposition des ciments à des cycles de gel/dégel successifs (susceptibles d'être rencontré le long de SGV) peut entraîner leur dégradation physique ;
  - de la géométrie de l'ouvrage : une sédimentation au sein d'une colonne de ciment lors de sa phase de prise a une influence sur sa densité et sur sa résistance (densité plus faible porosité plus élevée en sommet de colonne, et donc sensibilité aux altérations accrue dans la partie du forage la plus exposée aux infiltrations de surface).
- Ses conditions de mise en place : temps de prise, méthode de cimentation.

Le Tableau 14 indique différentes causes de dégradation des ciments.

| Causes de la dégradation du béton | Conditions de dégradation | Possibilités de prévention/remédiation |
|-----------------------------------|---------------------------|----------------------------------------|
|-----------------------------------|---------------------------|----------------------------------------|

<sup>14</sup> Memento technique de l'eau

<sup>15</sup> Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

| Causes de la dégradation du béton |                                                          | Conditions de dégradation                                                                                                                                                                                | Possibilités de prévention/remédiation                                                                                                                                    |
|-----------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| mécaniques                        | perméabilité trop grande                                 | Masse volumique < 300 ou 400 kg.m <sup>-3</sup> en présence d'eau agressive                                                                                                                              | adapter le ciment à la qualité de l'eau                                                                                                                                   |
|                                   | existence de cavernes et/ou de fissures                  | problèmes de mise en place (reprise de bétonnage)                                                                                                                                                        | accroître la plasticité du béton                                                                                                                                          |
|                                   | érosion                                                  | vitesse de circulation trop grande, ou gradient thermique trop élevés.                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                           |
| chimiques                         | agressivité du CO <sub>2</sub> libre                     | Dans eau douce ou quand la teneur de CO <sub>2</sub> en excès dépasse 15 mg/l. Cette attaque est superficielle.                                                                                          | Pas de ciment CPA et de lavages abrasifs                                                                                                                                  |
|                                   | attaque par acidité forte                                | D'autant plus grave que les sels de calcium sont solubles. Corrosivité croissante en présence d'acides (phosphorique, sulfurique, nitrique, chlorhydrique). Les acides organiques sont également nocifs. | Dans le cas d'une acidité modéré on augmente la résistance en abaissant le rapport eau/ciment et/ou en utilisant des ciments alumineux.                                   |
|                                   | action de l'ammonium                                     | destruction du béton par, développement des réactions nitrifiantes (en anaérobie), ou dégagement d'ammoniac qui augmente la solubilité de la chaux.                                                      | Éviter concentration élevé en NH <sub>4</sub> et en Mg particulièrement si des sulfates sont également présents.                                                          |
|                                   | action des sulfates                                      | sulfatation de la chaux donne du gypse, transformation des aluminates tricalciques en ettringite (expansives).                                                                                           | Adapter ciment selon agressivité de l'eau (norme AFNOR P 18.011)                                                                                                          |
|                                   | attaque par alcalinité forte                             | nocive pour tous les ciments en raison du risque de solubilisation de certains constituants à base d'alumine.                                                                                            | Il est conseillé en l'absence de revêtement de ne pas admettre d'eau de pH>12 au contact de ciments.                                                                      |
|                                   | Corrosion bactérienne avec formation de H <sub>2</sub> S | en anaérobie : formation et libération de H <sub>2</sub> S, suivie en présence d'air de l'oxydation en H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> . accéléré dans eau chaude et dans eau à pH<6.                     | L'apport d'oxydant (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ), de précipitant (Fe <sup>2+</sup> ) ou de nitrate évite plus ou moins totalement cette formation de H <sub>2</sub> S. |

Tableau 14 : Causes de la dégradation de ciments

Les impacts potentiels dus à la dégradation des ciments sont les mêmes que ceux dus à une mauvaise cimentation et sont rappelés dans le Tableau 15

| Milieu                                       | Impacts potentiels                                                               |
|----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| Tous                                         | Infiltration depuis la surface                                                   |
| Aquifères superposés                         | Mise en communication de différents aquifères                                    |
| Artésianisme                                 | Mise en communication de différents aquifères<br>Rejets non maîtrisés en surface |
| Formations salifères, anhydres ou gypsifères | Mouvement de sol (gonflement, affaissement). Déstabilisation du bâti environnant |
| Argile gonflante                             | Mouvement de sol (gonflement). Déstabilisation du bâti environnant               |
| Sols pollués                                 | Infiltration des polluants vers les aquifères                                    |
| Gaz                                          | Risque de fuite de gaz en surface                                                |
| Zones inondables                             | Risque d'infiltration des eaux de surfaces vers les aquifères                    |

Tableau 15 : Impacts potentiels dus à la dégradation des ciments

### 3.2.2 Pollution directe par le ciment

Outre l'aspect dégradation du ciment et perte de ses propriétés mécaniques, il est également intéressant de prendre en compte son caractère potentiellement polluant. Des travaux expérimentaux (Callier et Haas, 2009) ont mis en évidence la possibilité pour certains ciments (non géothermiques) placés en contexte d'immersion, de libérer des éléments chimiques potentiellement polluants (Tableau 16).

Ce sujet n'a pas pu être analysé plus en profondeur dans le cadre de la présente étude ; mais l'analyse du comportement des ciments géothermiques en condition d'immersion en aquifère pourrait faire l'objet d'un projet spécifique.

| Type de boue et coulis |               | Éléments libérés au cours du durcissement des coulis ou de l'utilisation des boues (notion de flux convectif) |                                                           | Éléments libérés après durcissement des coulis (notion de flux diffusif)                                          |
|------------------------|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                        |               | Ressuage                                                                                                      | Filtration                                                | Lixiviations (selon NF EN 12457-2 qui remplace la NFX 31 210) et lessivages (selon NF X 31 211)                   |
| Coulis de parois       | Formulation 1 | MES, DCO, AOX, Na, Chlorures, Sulfates, NH <sub>4</sub> , NO <sub>2</sub> , Cr                                |                                                           | DCO, AOX, Na, NH <sub>4</sub> , NO <sub>2</sub>                                                                   |
|                        | Formulation 2 | MES, DCO, AOX, Na, Chlorures, Sulfates, NH <sub>4</sub> , NO <sub>2</sub> , Cr                                |                                                           | DCO, AOX, Na, NH <sub>4</sub>                                                                                     |
|                        | Formulation 3 | MES, DCO, AOX, Na, Sulfates, NH <sub>4</sub> , NO <sub>2</sub> , Pb, Cr                                       |                                                           | DCO, AOX, Na, sulfates, NH <sub>4</sub> , NO <sub>2</sub>                                                         |
| Boues de forage        | Formulation 4 | DCO, AOX, Na, NH <sub>4</sub>                                                                                 |                                                           | Lixiviations et lessivages non pertinents, car ces matériaux ne durcissent pas et ne restent pas dans le sous-sol |
|                        | Formulation 5 | Pas de ressuage dans ces boues                                                                                | DCO, AOX, Na, NH <sub>4</sub> , NO <sub>2</sub>           |                                                                                                                   |
|                        | Formulation 6 |                                                                                                               | DCO, AOX, Na, NH <sub>4</sub> , NO <sub>2</sub>           |                                                                                                                   |
| Coulis d'injection     | Formulation 7 | MES, DCO, AOX, Na, Cr, As, NH <sub>4</sub> , NO <sub>2</sub>                                                  | Pas de filtration possible dans ces coulis à prise rapide | DCO, AOX, Na, NH <sub>4</sub> , NO <sub>2</sub>                                                                   |
|                        | Formulation 8 | Pas de ressuage dans ce coulis                                                                                |                                                           | DCO, AOX, sulfates, NH <sub>4</sub>                                                                               |

*Tableau 16 : Potentiel de relargage de certains coulis et boues utilisés dans les forages et les fondations<sup>16</sup>*

Un groupe de travail rassemblé par le BRGM et l'ADEME doit mener, sur la période 2012-2013, une réflexion sur « la normalisation des ciments géothermiques pour échangeurs très basse énergie en circuit fermé mis en œuvre par forage » (projet de norme prNF X 10-950). Il permettra de soulever les problèmes essentiels (dégradabilité, relargage d'éléments polluants), certainement d'améliorer les pratiques et d'identifier les travaux complémentaires à mener en vue d'améliorer la qualité des ciments utilisés en géothermie très basse énergie, à la fois sur forages d'eau et sur SGV.

### **3.3 EXPLOITATION SANS PRELEVEMENT D'EAU (SGV)**

L'exploitation géothermique du sous-sol sans prélèvement d'eau met en œuvre les technologies d'échangeurs enterrés (boucle fermée). Seuls sont abordés ici les échangeurs verticaux ou sondes géothermiques verticales (SGV), les impacts potentiels directement liés à leur fonctionnement (impact thermique, géotechniques, ...) et les impacts potentiels liés aux fluides caloporteurs nécessaires à leur fonctionnement.

#### **3.3.1 Fluide caloporteur**

Les SGV ou échangeurs géothermiques verticaux permettent le transfert des calories du sous-sol jusqu'à une pompe à chaleur via un fluide caloporteur en circulation dans la sonde. Ce fluide caloporteur est composé d'eau la plupart du temps additionnée d'un antigel et d'adjuvants divers.

En France, la norme NF X 10-970 recommande l'utilisation d'un fluide caloporteur « biodégradable à 98 % et de qualité alimentaire » et cite le monopropylène glycol en exemple.

La biodégradabilité d'une substance est un paramètre quantifiable et est défini dans le Vocabulaire de l'environnement ([JORF n°0087 du 12 avril 2009](#)) : « Une substance est dite biodégradable si elle peut, sous l'action d'organismes vivants, se décomposer en éléments divers dépourvus d'effet dommageable sur le milieu naturel ». « La biodégradabilité s'apprécie en prenant en compte à la fois le degré de décomposition d'une substance et le temps nécessaire pour obtenir cette décomposition. »

Par contre, l'appellation « qualité alimentaire » n'a pas de signification officielle et n'est pas une caractéristique quantifiable. La référence à cette « qualité alimentaire » dans un document normatif n'est donc pas adaptée.

---

<sup>16</sup> (Callier et Haas, 2009)

## **a Antigé**

Le rôle de l'antigel associé au fluide caloporteur est de permettre le fonctionnement de la sonde en conditions de températures inférieures à 0 °C :

- Il empêche le gel en surface en cas d'arrêt de fonctionnement de la sonde (panne) ;
- Il permet le fonctionnement de la sonde, même en condition de sous-dimensionnement et de gel des terrains autour de la sonde.

Différents antigels peuvent être utilisés : soit des alcools (glycols divers, méthanol, éthanol), soit des sels (chlorure de calcium, chlorure de magnésium, chlorure de potassium, carbonate de potassium, acétate de potassium, formiate de potassium, chlorure de sodium, carbonate de sodium, ...).

Les glycols constituent une famille chimique définie par la présence de deux fonctions alcool sur une chaîne carboxylique. Cette famille compte de nombreux produits aux propriétés variées dont :

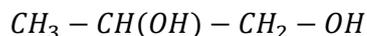
- L'éthylène glycol (1,2-éthanediol) qui est le premier terme de cette série chimique et qui est fréquemment utilisé comme antigé. Il est classé comme nocif pour l'homme en cas d'ingestion, (fiche de toxicité INRS, 2006) et est de plus en plus remplacé par le monopropylène glycol dans les liquides antigels mais n'est pas classé dangereux pour l'environnement.  
Il se dégrade en présence d'oxygène (ou au contact de métaux) selon le schéma de dégradation suivant (Cedheim 1983 dans (Graf et Parriaux, 1996)).

Ethylène glycol (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O<sub>2</sub>) → Glycoaldéhyde (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O<sub>2</sub>) → Acide Glycolique (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O<sub>3</sub>) → Acide glyoxylique (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) → Acide oxalique (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) → Dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>)

Il se biodégrade rapidement : son taux de biodégradation après 20 jours dans une eau légèrementensemencée est de 100 % (Rogers (1993) dans (Graf et Parriaux, 1996)).

- Le monopropylène glycol (ou propylène glycol)

Cet alcool également de la famille des glycols correspond à la formule chimique :



*Équation 2 : Formule semi-développée du monopropylène glycol*

D'autres noms sont parfois utilisés pour le désigner (Cram Bourgogne et Franche-Comté, 2000) :

- 1,2-propylène glycol ;
- méthyléthylène glycol ;
- 1,2-propanediol ;
- 1,2-pg ;
- 1,3-dihydroxypropanol ;

- 1,3-propane diol ;
- triméthyl glycol ;
- 1,3-pg.

Il est utilisé en cosmétique et dans l'industrie agroalimentaire, comme additif (support d'arôme), comme excipient de médicaments, comme solvant ou encore dans les pompes et inhalateurs pour l'asthme. Il est fréquemment utilisé comme antigél notamment dans le domaine agroalimentaire (chambres froides)

Sa fiche de toxicité (INRS, 2010) ne met pas en évidence d'effet toxique majeur pour l'homme. Il n'est pas non plus classé comme dangereux pour l'environnement.

Il se dégrade en présence d'oxygène (ou au contact de métaux) selon les schémas de dégradation suivants (Cedheim 1983 dans (Graf et Parriaux, 1996)).

Propylène glycol ( $C_3H_8O_2$ ) → Hydroxyacetone ( $C_3H_6O_2$ ) → Métoxyacetaldehyde ( $C_3H_6O_2$ ) → Acide lactique ( $C_3H_6O_3$ ) → Acide pyruvique ( $C_3H_4O_3$ )

Propylène glycol ( $C_3H_8O_2$ ) → Hydroxyacetone ( $C_3H_6O_2$ ) → Pyruvialdehyde ( $C_3H_4O_2$ ) → Acide pyruvique ( $C_3H_4O_3$ )

Il se biodégrade rapidement : son taux de biodégradation après 20 jours dans une eau légèrementensemencée est de 79 % (Rogers (1993) dans (Graf et Parriaux, 1996)).

Malgré son coût et sa viscosité plus élevés que l'éthylène glycol, il lui est préféré en France du fait de sa moindre toxicité.

Les analyses de toxicité du monopropylène glycol ne font pas état de risques avérés pour la santé et l'environnement. Cependant, peu de données existent sur sa dégradation et sa biodégradation en milieu souterrain et au-delà de la couverture pédologique. Des analyses complémentaires devraient être menées pour comparer son comportement dans différents milieux naturels et analyser son influence sur la potabilité des eaux souterraines.

## **b**      **Adjuvants**

En plus de l'eau et de l'antigel qui les composent essentiellement, les fluides caloporteurs peuvent être additionnés d'adjuvants aux rôles variés (inhibiteurs de corrosion, anti-tartre, bactéricides, fongicides, anti-mousses, ...) dont la composition et le comportement en milieu naturel (toxicité, dégradabilité et biodégradabilité) ne sont pas décrits dans les fiches de toxicité des produits commerciaux.

## **c**      **Fluides des sondes à détente directe**

Les fluides employés dans les sondes à détente directe sont des gaz à effet de serre (GES) dont certains ne sont plus autorisés mais peuvent encore être présents sur des installations anciennes :

- CFC (ChloroFluoroCarbones) : leur production est arrêtée depuis 1987 (protocole de Montréal). Ils ne sont plus sur le marché depuis 2000 et doivent être récupérés et détruits depuis 2002. Ce sont d'importants destructeur de la couche d'ozone ;
- HCFC (HydroChloroFluoroCarbones) : moins destructeurs que les CFC vis-à-vis de la couche d'ozone, ils contribuent à l'accroissement de l'effet de serre et certains sont déjà interdit pour les installations neuves ;
- HFC (HydroFluoroCarbones) : ils pourraient remplacer les HCFC mais sont également des gaz à effet de serre (inscrit sur la liste du protocole de Kyoto<sup>17</sup>).

#### **d Risque de fuite et cas avéré**

Les dégâts potentiels liés à d'éventuelles fuites de fluide caloporteur dans le milieu naturel seraient faibles du fait de la biodégradabilité du fluide préconisée par la norme (NF X 10-970), mais ils ne sont pas décrits en bibliographie. Ils doivent cependant être relativisés car la probabilité pour les fluides d'être répandus dans l'environnement est peu élevé :

- d'une part, le risque de percement des sondes en PEHD (matériau résistant et inaltérable) installées en forage, testées (par mise en pression) et gainées de ciment est faible et minimisé par le respect des préconisations techniques de la norme NF X 10-970 ;
- d'autre part, les quantités de fluides en jeu sont relativement faibles (de l'ordre de la centaine de litre par sonde).

Un exemple de fuite de fluide caloporteur (propylène glycol) d'un échangeur horizontal ayant entraîné une contamination de l'eau souterraine au fer et au manganèse montre que ce risque est minime, mais avéré : cas de Vallentuna (proximité de Stockholm), 1983. Cet accident n'a pas vraiment entraîné une pollution, les teneurs en fer et manganèse n'ayant pas rendu l'eau toxique. Si le fluide avait été à base d'éthylène glycol, la pollution aurait été beaucoup plus sévère, rendant la consommation dangereuse (Graf et Parriaux, 1996).

Pour pallier ce risque dans les périmètres de protection des captages d'eau destinés à la consommation humaine, l'ANSES<sup>18</sup> recommande<sup>19</sup> l'utilisation d'un mélange eau/propylène glycol non adjuvanté ou de fluide caloporteur inscrit sur la liste « A » de la circulaire DGS/PGE/1.D. n°357 du 2 mars 1987 (liste de fluides et additifs utilisés pour le traitement thermique des eaux destinées à la consommation humaine).

---

<sup>17</sup> [http://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire\\_environnement/definition/protocole\\_de\\_kyoto.php4](http://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/protocole_de_kyoto.php4)

<sup>18</sup> ANSES : Agence nationale de sécurité sanitaire, de l'alimentation, de l'environnement et du travail

<sup>19</sup> Avis et rapport d'août 2011 (saisine n° 2010-SA-0047)

Hors périmètre de protection de captage d'eau destinée à l'alimentation en eau potable, seule la recommandation de la norme NF X 10-970 s'applique.

### 3.3.2 Impact thermique potentiel

#### a *SGV unique – cas standard*

La modélisation de transferts conductifs de chaleur dans des formations géologiques non aquifères montrent que pour une SGV standard (sonde double U à eau glycolée, 75 à 125 m de long), exploitée dans des conditions respectueuses du dimensionnement, l'impact thermique à une distance de dix mètres après vingt-cinq ans d'utilisation est inférieur à un degré Celsius (Maragna, 2009). En effet après la mise en marche de l'installation les changements thermiques dans le sol sont relativement rapides mais atteignent rapidement un pallier et tendent vers une stabilisation.

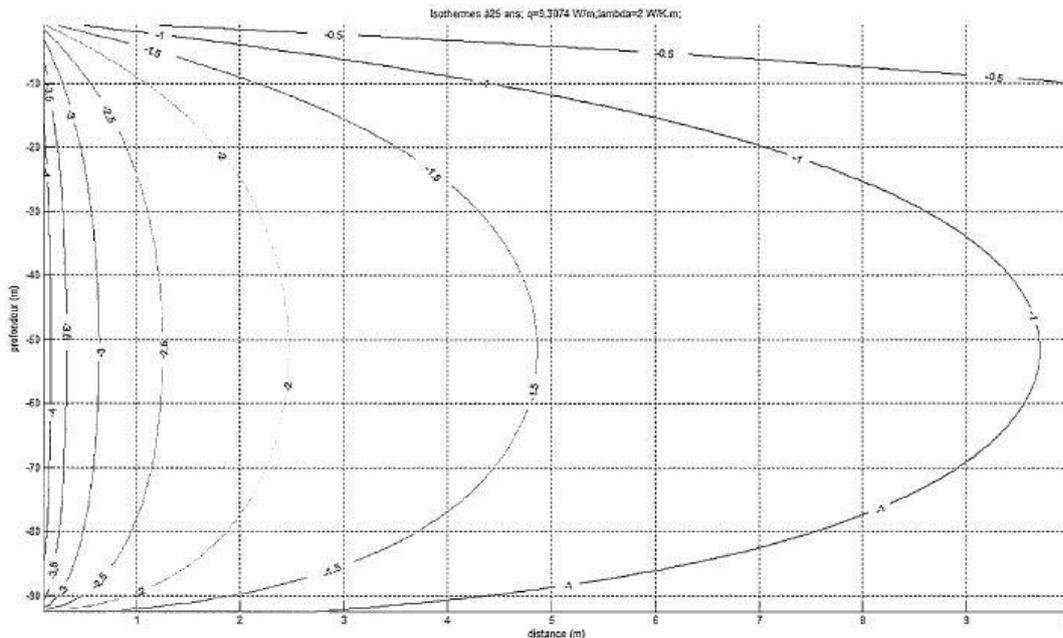


Figure 6 : Isothermes autour d'une SGV après 25 ans d'exploitation (Maragna, 2009)

#### b *SGV unique – milieu aquifère*

Plusieurs études paramétriques visant à caractériser l'interaction thermique des échangeurs géothermiques verticaux avec un aquifère et l'influence de la dissipation de chaleur par circulation d'eau souterraine ont été menées. Qualitativement, la présence d'un aquifère circulant recoupant une sonde géothermique verticale unique dissipe l'énergie thermique par advection/convection et a pour conséquence la formation d'un panache thermique dans la direction de l'écoulement. La géométrie de ce panache est directement liée au contexte hydrogéologique (perméabilité des formations, lithologie, porosité, capacité calorifique, conductivité thermique, direction

d'écoulement). Ceci est illustré ici par les résultats de l'étude de S. Pannike et al (2006) visant à déterminer, autour d'une SGV, la taille du panache thermique pour différents contextes hydrogéologiques (vitesses de Darcy variant de  $7,8 \times 10^{-5}$  m/an à 315 m/an). Un modèle numérique a été développé dans l'environnement SCHEMAT.

Le champ de température après 30 années de fonctionnement pour les différents contextes modélisés est donné en Figure 7.

Le panache thermique le plus long correspondant à une diminution de température de  $1,0 \text{ }^\circ\text{C}$  est observé pour une vitesse réelle d'écoulement de  $1,5 \times 10^{-7}$  m/s (limon,  $i = 2 \text{ ‰}$ ) et vaut 13 m. Le panache thermique le plus long correspondant à une diminution de température de  $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$  est observé pour une vitesse réelle d'écoulement de  $1,5 \times 10^{-6}$  m/s (sable moyen,  $i = 0.5 \text{ ‰}$ ) et vaut 230 m.

Ces résultats mettent en évidence le fait que l'impact thermique théorique d'une SGV unique est limité dans l'espace et que le respect des recommandations actuelles de distance d'écartement entre SGV (10 m recommandés dans la norme NF X 10-970) doit permettre d'éviter d'éventuels conflits d'usage.

De plus, les recommandations actuelles<sup>20</sup> en matière de choix technologique pour une exploitation par géothermie de très basse énergie privilégient le forage d'eau plutôt que la SGV quand une ressource aquifère est accessible. Aussi, les SGV devraient, la plupart du temps, être implantées en milieu non aquifère, donc en condition d'impact thermique minimisé. Cependant, dans la pratique, la présence ou l'absence de nappe au droit d'un site ne préside pas toujours au choix technologique final.

---

<sup>20</sup> Guide technique – Les pompes à chaleur géothermiques sur champ de sondes – Manuel pour la conception et la mise en œuvre. ADEME, BRGM

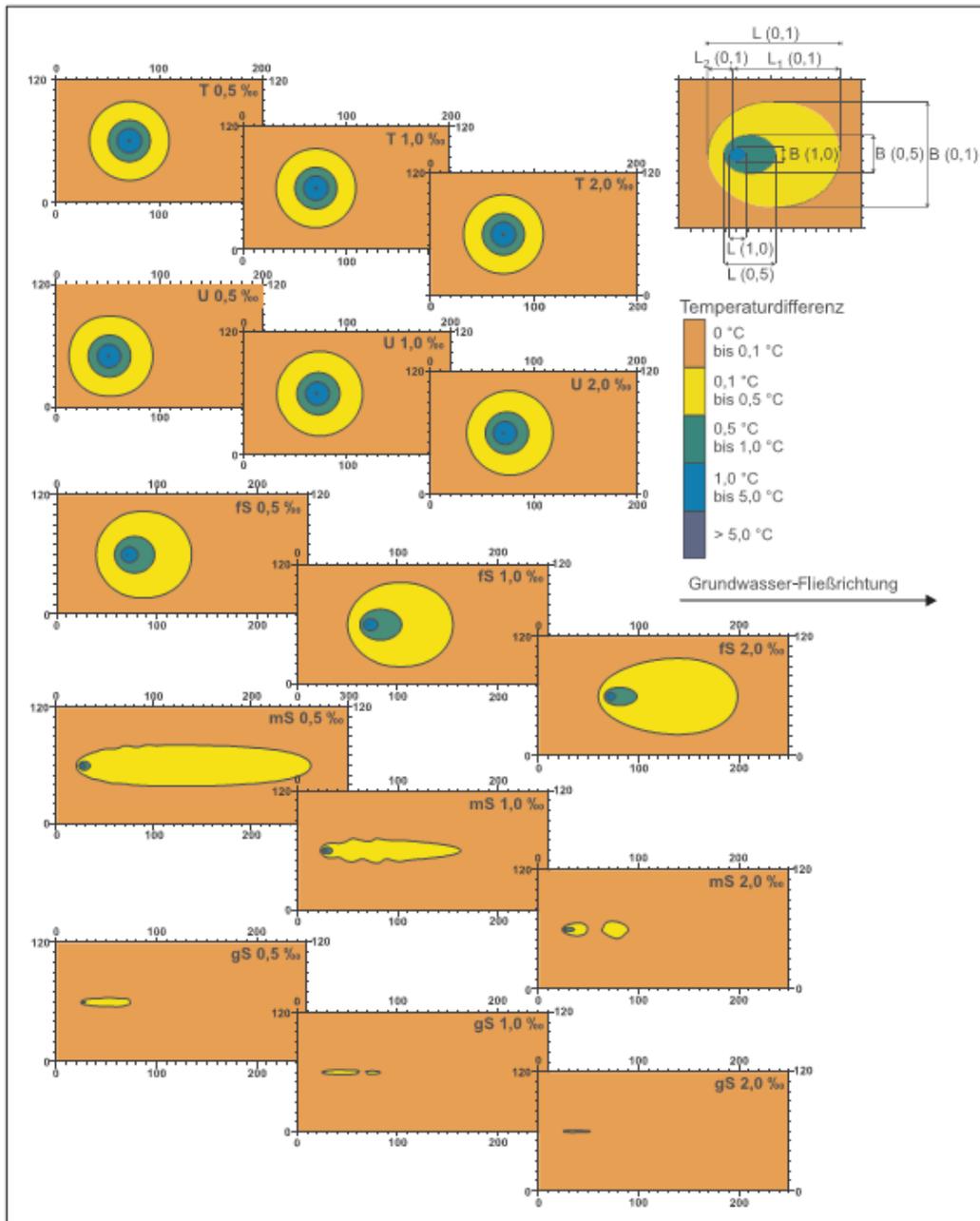


Figure 7 – Champs de température autour de la sonde géothermique verticale à la fin de la 30<sup>ème</sup> saison de chauffe pour les 15 contextes hydrogéologiques modélisés (définis par 5 perméabilités relatives à l'argile (T : Ton), au limon (U), au sable fin (fS : Feinsand), au sable moyen (mS : Mittelsand), au sable grossier (gS : grobsand) et trois gradients hydrauliques  $i = 0.5‰$  ;  $1‰$  ;  $2‰$ ). (Grundwasser-Fließrichtung : Direction de l'écoulement) (d'après (Pannike S., 2006))

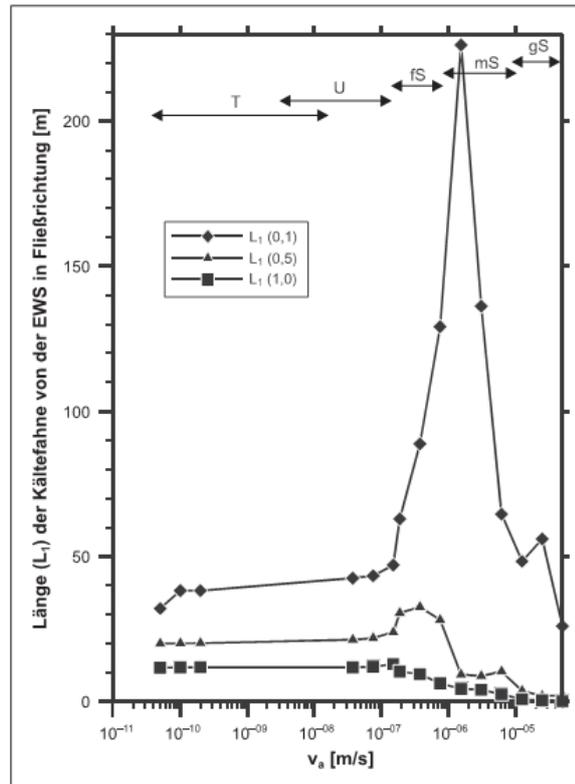


Figure 8 – Taille du panache thermique : longueur des panaches thermiques entraînant une baisse de 0,1 °C, de 0,5 °C, de 1,0 °C en fonction de la vitesse réelle d'écoulement  $v_a$  après 30 années de fonctionnement de la PAC sur SGV (d'après (Pannike S., 2006)).

### c Champs de sondes – milieu aquifère

L'influence des caractéristiques hydrogéologiques sur la température de sous-sol pour un stockage de chaleur par champ de sondes a été étudiée sur la base de modélisations. L'exemple du site de Crailsheim est reporté ici.

L'interaction thermique du champ de sondes de Crailsheim avec son contexte hydrogéologique a été modélisée à l'aide du logiciel FEFLOW (Software). Ce champ de sondes est constitué de 80 sondes de type double-U profondes de 55 m, disposées dans un cercle de 30 m de diamètre. Il est situé dans des formations géologiques comprenant deux aquifères superposés : grès du Keuper (perméabilité moyenne de l'ordre de  $10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$ ) et calcaires du Muschelkalk (perméabilité forte, de l'ordre de  $10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$ ).

Le cycle de sollicitation thermique modélisé consiste en une injection à 55 °C pendant 6 mois (stockage) suivit d'une injection à 10 °C pendant 6 mois (déstockage). Cinq cycles consécutifs de stockage/déstockage sont modélisés.

La Figure 9 présente le champ de température à proximité du champ de sondes à la fin du 5<sup>ème</sup> déstockage.

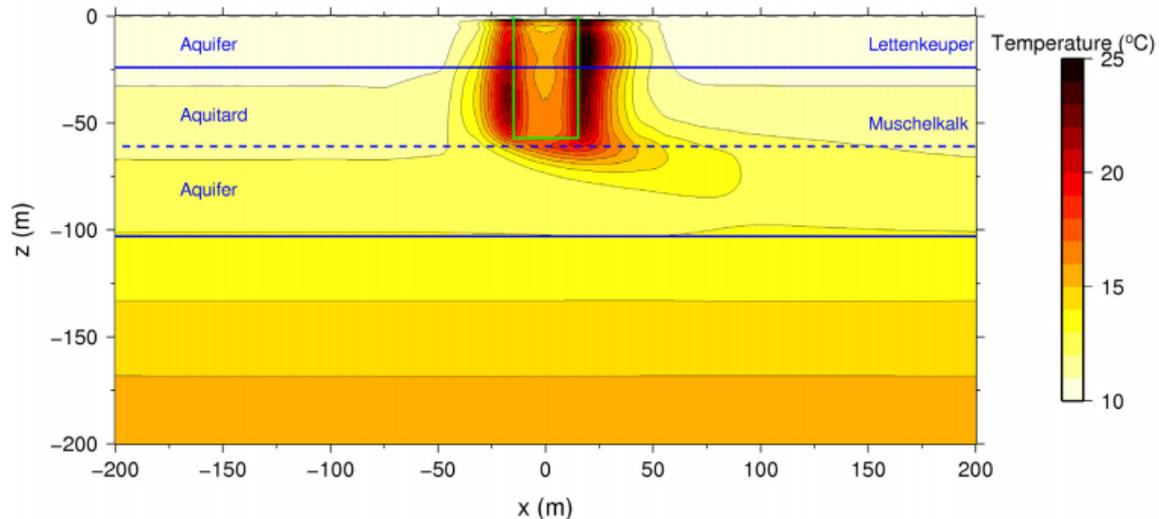


Figure 9 – Vue en coupe dans la direction de l'écoulement du champ de température à la fin de la 5<sup>ème</sup> année d'exploitation du champ de sonde (fin du 5<sup>ème</sup> déstockage). La ligne verte représente l'emplacement du champ de sonde (d'après (Software)).

La vitesse de circulation relativement importante dans le Muschenkalk (vitesse de Darcy = 19 m/an) entraîne la formation d'un panache thermique à la base du champ de sondes dont la taille est bien supérieure à celle d'une SGV unique : une variation de 1°C est observée à environ 70 m du champ de sonde dans l'aquifère du Muschelkalk par exemple.

Ces résultats montrent que l'aire d'influence thermique d'un champ de sondes est très variable selon les contextes géologiques et hydrogéologiques et selon l'usage projeté du champ de sondes (production de chaleur ou stockage thermique). Elle peut être importante, d'autant plus en contexte aquifère et est susceptible d'interférer avec d'autres usages des ressources en eau, provoquant des conflits d'usages.

L'impact thermique d'un champ de sonde doit être évalué au cas par cas et intégré à une gestion plus globale des ressources énergétiques du sous-sol.

### 3.3.3 Impacts géotechniques

Des désordres géotechniques causés par l'exploitation de SGV ont pu être observés en Suisse : cas de Chesalles-sur-Moudon, Le Locle, Le Paquier, Le Bouveret (cf. chapitre 5) . Cependant dans chacun de ces cas les désordres apparus étaient liés à la surexploitation de l'installation en lien avec des erreurs de dimensionnement ou avec le non-respect du dimensionnement initial. Les désordres correspondaient à des

affaissements des terrains à proximité des sondes allant parfois jusqu'à l'arrachement d'une sonde entraînant une fuite du fluide caloporteur et un arrêt de l'installation.

Ces dysfonctionnements relèvent d'une mauvaise utilisation des équipements et ne sont pas intrinsèquement imputables aux SGV.

Lorsque le dimensionnement est conforme aux besoins et à l'utilisation, aucun dommage lié à l'exploitation de SGV n'a été mis en évidence.

### **3.3.4 Impacts géochimiques et microbiologiques**

Le changement des conditions thermiques à proximité des SGV pourrait potentiellement avoir des répercussions sur la géochimie de l'aquifère, sur la diversité et sur l'activité bactérienne. Cependant cela n'a jamais été observé et les expériences sur le stockage d'énergie indiquent des variations de température résultantes de l'exploitation de SGV insuffisantes pour que des changements significatifs se produisent.

Un manque d'observations sur le sujet subsiste cependant et seules des études complémentaires permettraient d'évaluer les effets des champs de sondes (en particulier à usage de stockage de chaleur pour lesquels la sollicitation thermique est la plus importante) sur la biogéochimie des aquifères.

## **3.4 EXPLOITATION AVEC PRELEVEMENT D'EAU, SANS REINJECTION**

Tout prélèvement d'eau par pompage sur aquifère entraîne un appel des masses d'eau environnantes et la formation d'un cône de rabattement autour du forage de pompage (figure 10). La géométrie de ce cône, qui représente une diminution locale du niveau piézométrique de la nappe, est conditionnée par les caractéristiques hydrauliques du milieu (perméabilité, gradient hydraulique de la nappe, direction d'écoulement) et de l'exploitation (débit et programme d'exploitation). L'intensité des rabattements et l'aire d'influence du pompage (zone d'emprise du cône ou aire de dépression piézométrique) varient énormément d'un forage à l'autre et d'un aquifère à l'autre. Ils peuvent être appréhendés au cas par cas avec l'aide en particulier d'un outil de modélisation hydrodynamique.

Ces rabattements induisent une diminution de la ressource pour d'autres usages et une modification des écoulements souterrains à l'intérieur de l'aire d'influence d'un pompage. Des conflits d'usages (cf. Figure 11) sont alors susceptibles d'apparaître et, dans certains contextes hydrogéologiques (renouvellement lent des ressources), un prélèvement intense peut conduire à l'épuisement de la ressource.

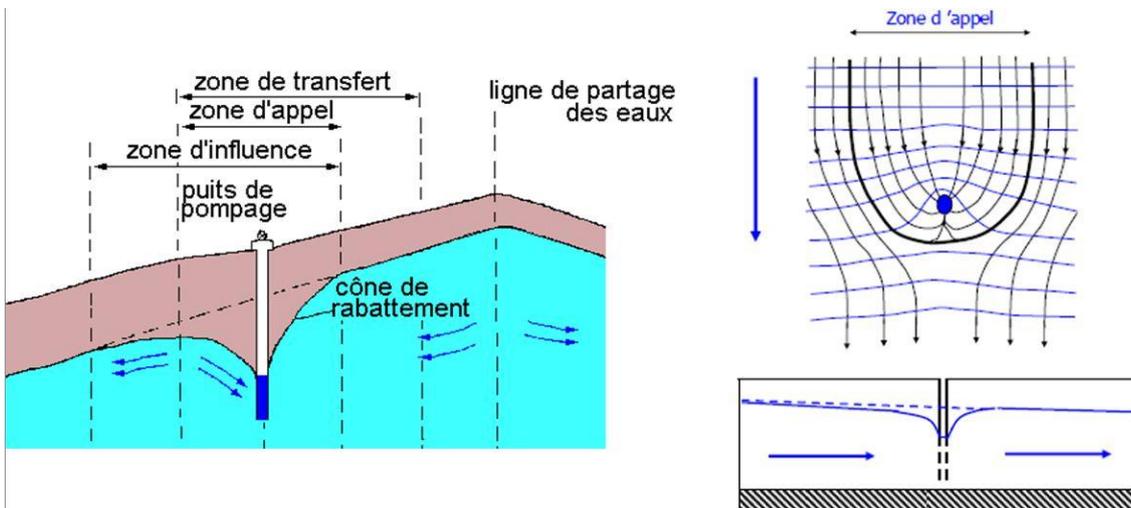


Figure 10 : Géométrie du cône de dépression avec surface piézométrique inclinée (Castany, 1982)

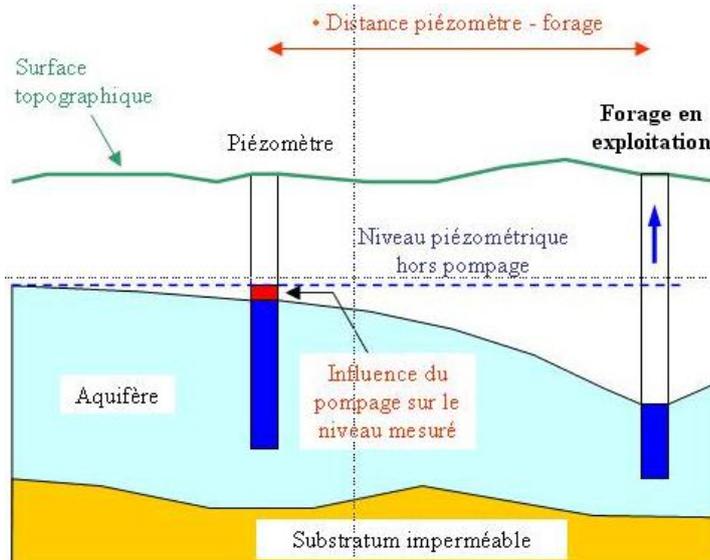


Figure 11: Influence d'un prélèvement sur les forages voisins - Impact potentiel : conflit d'usage

En contexte urbain l'impact sur les écoulements peut devenir extrêmement complexe à appréhender du fait d'un milieu rendu hautement hétérogène par les constructions souterraines (fondations, sous-sol, etc.), (Murzilli et Galia, 2010). Cette complexité est d'autant plus renforcée que l'information en matière d'exploitations géothermiques et d'infrastructures souterraines existantes n'est pas toujours disponible.

Ce mode d'exploitation n'a aucun impact thermique sur le milieu souterrain.

Un autre impact majeur potentiellement liés à ce type d'exploitation est lié au risque d'instabilité géotechnique associée au dénoisement et au tassement de formations supports de fondations (exemple ; tassement de sept mètres de la ville de Mexico associé à l'abaissement de la nappe exploitée pour production d'eau potable. ).

Le rabattement peut également avoir une influence sur la chimie des sols (potentiel d'oxydo réduction – Exemple : oxydation de pyrite en Bretagne).

Ce mode d'exploitation suppose par ailleurs le rejet massif d'eau dans les réseaux de surface ce qui entraîne un risque de saturation de ces réseaux et, pour les milieux naturels de rejet, des impacts chimiques, hydrauliques et thermiques. Aucune étude spécifique aux rejets géothermiques en milieu naturel n'a été entreprise. Néanmoins, il a été montré que des rejets d'eau chaude quantitativement important (industries, centrales nucléaires) pouvaient avoir des conséquences importantes sur les écosystèmes.

### **3.5 EXPLOITATION AVEC PRELEVEMENT ET REINJECTION D'EAU (DOUBLET, MULTIPLET)**

En plus du cône de dépression associé au pompage et décrit au paragraphe précédent, l'exploitation avec réinjection entraîne la formation d'un cône d'injection au droit du forage d'injection. Ce cône correspond à une surcote de la surface piézométrique de la nappe ; sa géométrie est fonction des caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère (comme celle du cône de dépression) et peut être appréhendée par modélisation.

Hormis le risque d'épuisement de la ressource, absent ici du fait du bilan quantitatif nul de ce mode d'exploitation (prélèvements = rejets), les impacts potentiellement liés au prélèvement sont les mêmes que dans le cas de l'exploitation sans réinjection :

- Conflit d'usage lié au rabattement dans la zone d'appel du forage de pompage ;
- Modification des propriétés géotechniques des terrains ;
- Modification du contexte géochimique.

S'ajoutent des impacts potentiels liés à l'injection :

- Conflit d'usage lié au dôme piézométrique résultant de l'injection : risque d'effondrement de constructions souterraines (caves, sous-sols, réseaux de canalisations), risques de débordement ;
- Modification du contexte géochimique : ennoisement de formations géochimiquement différentes de l'aquifère et contamination de celui-ci.  
La possibilité de réinjecter de l'eau dans l'aquifère est conditionnée au respect de seuils qualitatifs ( arrêté du 17 Juillet 2009) ce qui limite le risque de contamination directe (de propagation de contamination) par injection d'eau polluée.
- Impact thermique : l'exploitation énergétique de l'eau prélevée sur l'aquifère entraîne sa modification thermique (réchauffement dans le cas d'un usage de

climatisation et refroidissement dans le cas d'un usage de chauffage). Cette modification thermique est susceptible d'entraîner d'une part des conflits d'usage (recyclage thermique avec des installations voisines) et d'autre part d'entraîner des modifications géochimiques et microbiologiques dans l'aquifère.

Théoriquement, le dimensionnement des installations (éloignement des forages et positionnement des points de pompages et d'injection par rapport à la direction de l'écoulement souterrain et aux forages voisins) doit permettre de minimiser les risques de conflit d'usage (ennoisement, dénoisement, recyclage thermique entre installations). La réalité du terrain fait que le dimensionnement est souvent optimisé, mais pas toujours idéal car il se heurte à des difficultés du type :

- Manque d'espace disponible pour implanter les forages (surtout en contexte urbain) : dans ce cas, le risque de recyclage thermique entre ouvrages du doublet et avec les forages voisins augmente ;
- Capacité d'injection des formations géologiques inférieures à la capacité de pompage d'où la nécessité, dans certains cas, de multiplier les points d'injection.

Les défauts de dimensionnement peuvent concourir à l'accroissement de l'impact thermique des exploitations géothermiques à l'échelle de l'aquifère par l'instabilité des températures de rejet liée au recyclage thermique. D'où l'importance de la disponibilité des données nécessaires au dimensionnement et de la prise en charge de cette phase d'un projet d'exploitation géothermique d'aquifère par un bureau d'étude compétent.

### 3.5.1 Impacts thermiques

Contrairement au prélèvement sans réinjection le système du multiplet entraîne une modification plus ou moins durable selon les caractéristiques de l'aquifère de la température de celui-ci. Il faut distinguer deux échelles :

- Celle de l'installation : l'eau réinjectée après exploitation énergétique entraîne une perturbation thermique au droit du point d'injection qui se propage selon le sens de l'écoulement de la nappe en formant un panache dit « panache thermique », mais à une vitesse nettement inférieure à celle de la nappe. La perturbation thermique ne dure pas ; il est généralement admis qu'après une période de repos égale au temps d'activité le système est quasiment retourné à son état initial (Rybach, 2003).

La géométrie du panache est fonction des propriétés hydrodynamiques et des propriétés thermiques initiales de l'aquifère, des caractéristiques des exploitations voisines et, surtout en contexte urbain, des aménagements souterrains existants. Elle peut être évaluée sur la base de modélisations ; ce qui suppose une bonne connaissance des propriétés pré-citées.

**Chauffage : rejet d'eau froide**

**Climatisation : rejet d'eau chaude**

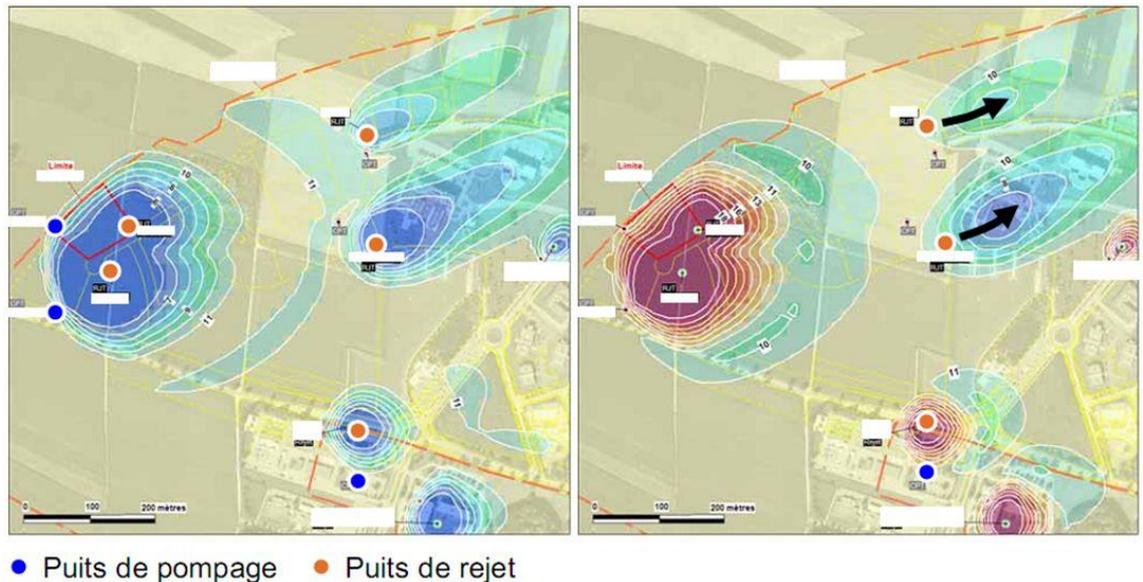


Figure 12 : Panaches thermiques associés à différents doublets géothermiques – Strasbourg (ANTEA)

- Celle de l'aquifère : le cumul dans le temps et dans l'espace des perturbations thermiques causées par chaque installation serait susceptible de modifier les propriétés thermiques globales d'un aquifère (Lepicier, 2009) à forte densité d'exploitation. Cependant, les aquifères à forte densité d'exploitation énergétiques sont essentiellement situés en contexte urbain ce qui implique l'existence conjointe de multiples sources de perturbations thermiques (phénomène d'îlot de chaleur<sup>21</sup>). La prédominance de l'influence de la géothermie sur la température des aquifères urbains n'a pas été démontrée et nécessite des études spécifiques.  
Par ailleurs, l'impact thermique de la géothermie sur la globalité d'un aquifère pourrait être géré à grande échelle par l'équilibre des quantités d'énergie prélevées et réinjectées et le maintien d'un bilan thermique nul (installations réversibles avec chauffage en hiver et climatisation en été (BRGM, 2008b)).

Les mesures de base qui pourraient permettre de limiter les impacts thermiques sont :

<sup>21</sup> Ce phénomène est lié à l'urbanisation et correspond à un accroissement de la température de l'air au droit d'une agglomération. Il dépend de la taille de la ville, de sa population, du climat, de la topographie, de la densité urbaine, etc. La diminution de l'évaporation qui est un phénomène endothermique intervient dans le processus. C'est pourquoi la température de l'eau souterraine sous une ville est généralement plus importante (Allen *et al.*, 2003).

- La mise à disposition des maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre des données nécessaires au dimensionnement en particulier des données relatives aux installations existantes et à leurs paramètres d'exploitation ;
- la prise en charge de la phase de dimensionnement d'un projet d'exploitation géothermique d'aquifère par un bureau d'étude compétant ;
- la mise en place de dispositifs de gestion des aquifères à forte densité d'exploitation (observatoire thermique de nappes, base de données « exploitation », évaluation des impacts, ...).

Elles permettraient un meilleur contrôle des évolutions thermiques des aquifères, garantirait des dimensionnements optimisés et permettrait la gestion des conflits d'usage.

### **3.5.2 Modification de température : impacts géochimique et microbiologique**

La température est un paramètre qui intervient dans nombre de processus chimique et biologique. Sa modification peut avoir des effets multiples en milieu aquifère.

#### **a Impacts microbiologiques**

Les aquifères ne sont pas des réservoirs abiotiques d'eau et de sédiments mais des écosystèmes complexes : ils sont peuplés d'organismes adaptés à l'oligotrophie<sup>22</sup>, (Brielmann *et al.*, 2010).

La température influence à la fois les bactéries présentes dans le milieu et leur activité. La diversité bactérienne augmente clairement avec la température ; on observe l'apparition de nouvelles souches et la disparition d'autres. Les bactéries présentent selon les espèces des préférences pour certaines gammes de température. Sous cette gamme de température leur activité est inhibée et au-dessus les bactéries risquent de subir de graves dommages. Ces températures minimales et maximales sont appelées températures cardinales.

L'activité des bactéries en fonction de la température peut se représenter sous la forme d'une courbe en cloche. Selon le positionnement de l'optimum thermique on peut classer les bactéries dans cinq grands groupes :

- les psychrophiles ;
- les psychrotrophes ;
- les mésophiles ;
- les thermophiles ;
- les hyperthermophiles.

---

<sup>22</sup> Milieu oligotrophe : milieu pauvre en éléments nutritifs

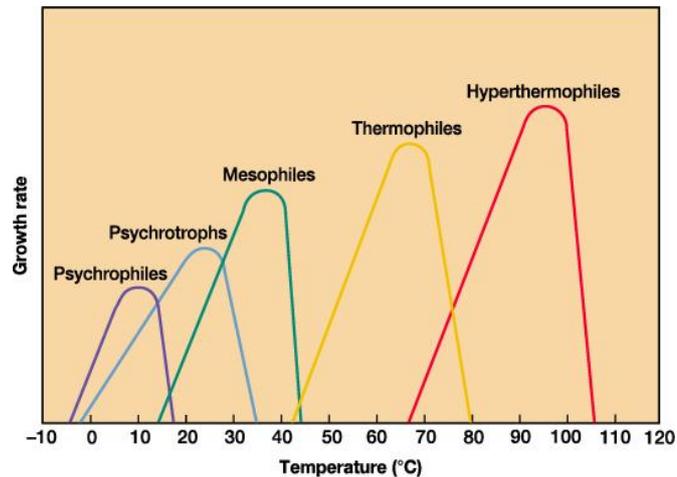


Figure 13 : Groupes bactériens selon la température

Il est alors légitime de supposer que la modification de la température induite par la géothermie ait une influence sur les populations bactériennes. En théorie toute modification de la température d'un milieu a pour effet de modifier la composition de sa microfaune et les vitesses des réactions enzymatiques catalysées par les micro-organismes.

En pratique, l'impact d'une augmentation de température d'aquifère sur le développement de bactéries pathogènes<sup>23</sup> n'est pas mis en évidence, même dans le cas où des températures de 37°C compatibles avec leur développement sont atteintes. Cela s'explique par le fait d'une part que les bactéries pathogènes sont allochtones (d'origine extérieure au milieu) et subissent la concurrence des bactéries autochtones (Garnier, 2011) et d'autre part que pour se développer, elles nécessitent une source de carbone organique assimilable ce qui fait souvent défaut en milieu aquifère.

Concernant les bactéries autochtones (non pathogènes), une influence significative des rejets thermiques (gamme 15-25°C) a été décelée au niveau de paramètres microbiologiques tels que biomasse totale, activité bactérienne, structure et diversité des espèces résidentes, mais les phénomènes observés ne semblent pas entraver le bon fonctionnement de l'écosystème (Garnier, 2011).

## **b Impacts physico-chimiques**

Les équilibres chimiques sont influencés par la température, de même que la solubilité des gaz et des minéraux. Cependant, au-delà de l'aspect théorique, l'impact effectif

<sup>23</sup> Bactéries, virus et protozoaires pouvant être présents dans les eaux souterraines principalement du fait d'une contamination par des matières fécales d'origine humaine ou animale

observé in-situ est faible, non significatif à l'échelle des aquifères, pour les gammes de températures classiquement associées aux exploitations géothermiques (10-30°C). Cela s'explique par les gammes de variations de température relativement faibles (une élévation de 10 °C à 30 °C ne représente qu'une variation de 7 %).

A l'échelle des forages et de leur voisinage immédiat, des problèmes d'exploitation peuvent apparaître tels que du dépôt/colmatage induit par la précipitation de carbonates et d'oxy-hydroxydes de fer et de manganèse (en cas d'oxydation d'un milieu aux concentrations en fer et manganèse significatives et initialement réducteur). Ils sont parfois catalysés par l'activité bactérienne (bactéries appartenant au genre *Gallionella* ou *Leptothrix*). Certains auteurs estiment que l'occurrence de ces phénomènes peut être considérée comme négligeable pour des températures de réinjection inférieures à 40°C. Par ailleurs, ils affectent les forages et alourdissent la maintenance des installations d'exploitation mais n'ont pas d'effet généralisé sur les aquifères.

Les mécanismes réactionnels les plus souvent mis en jeu sont exposés ci-dessous.

- Teneur en gaz dissous

La solubilité des gaz dissous dépend étroitement de la température, comme en témoignent les exemples de l'oxygène ainsi que du dioxyde de carbone ci-dessous.

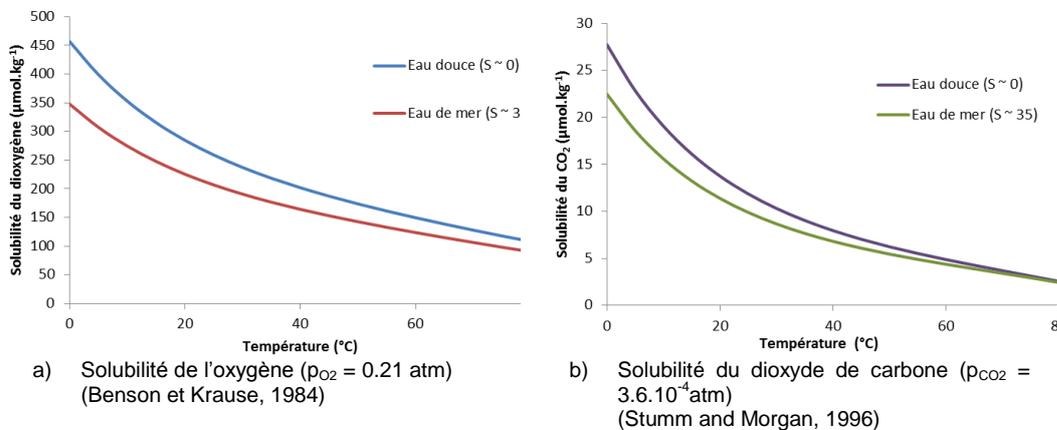


Figure 14 : Solubilité du dioxygène et du dioxyde de carbone en fonction de la température et de la salinité (g/l) pour des pressions partielles atmosphériques

- Equilibres acido-basique

Une augmentation de température d'un système induit une diminution du pH.

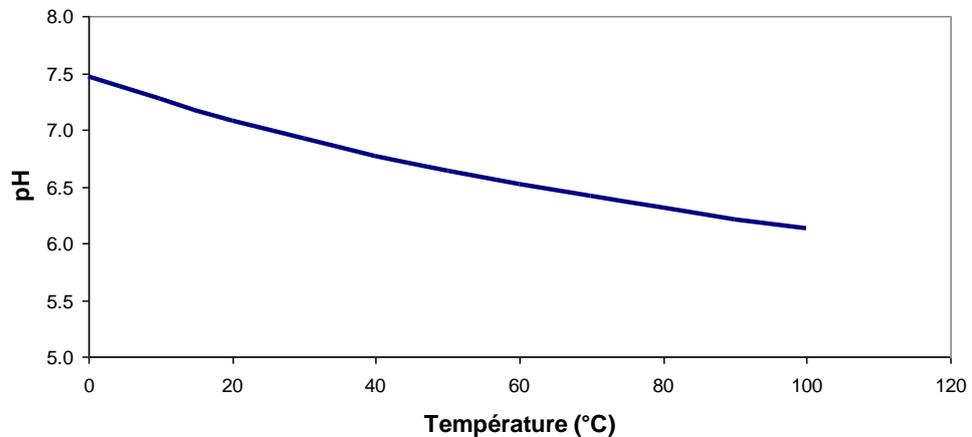


Figure 15 : Variation du pH de neutralité (concentrations équivalentes en  $H^+$  et  $OH^-$ ) en fonction de la température pour de l'eau pure à 1 atm. (Figure obtenue à l'aide du code de calcul PHREEQC)

- Solubilité des phases minérales et organiques

La solubilité de la plupart des phases minérales et organiques augmente avec la température. Les processus chimiques d'altération (dissolution, hydrolyse) seront donc accélérés dans le cas d'une augmentation de la température du milieu.

Le système des carbonates fait toutefois figure d'exception puisque celui-ci présente une solubilité inverse vis à vis de la température : l'équilibre chimique relatif au carbonate de calcium, dit équilibre calco-carbonique, se déplace sous l'action du  $CO_2$ , qui joue notamment sur le pH de l'eau. Lorsque la dissolution du carbonate de calcium est favorisée, l'eau est dite agressive (faibles températures), à l'inverse lorsque la précipitation du carbonate de calcium est favorisée (hausse des températures), l'eau est dite incrustante. Il en découle qu'une hausse de température du système a pour conséquence d'élever les indices de saturation et, dans certains cas, se traduit par l'apparition de dépôts de sels carbonatés (Calcite, Dolomite,...).

- Aspects cinétiques

Dans la plupart des cas, une augmentation de température entraîne une augmentation de la vitesse d'une réaction chimique. La loi d'Arrhenius ci-dessous permet de décrire la variation de la vitesse de réaction en fonction de la température :

$$k = Ae^{\frac{-E_a}{R.T}}$$

Avec : R : la constante des gaz parfaits

$E_a$  : l'énergie d'activation d'Arrhenius

A : facteur pré-exponentiel tenant compte de la fréquence des collisions et des effets stériques

L'ordre de grandeur habituel du phénomène est un doublement de la vitesse de réaction lorsque la température augmente d'une tranche de 10 °C.

En conclusion, les observations des effets d'un changement de température dans le cadre d'études portant sur le stockage d'énergie et sur l'exploitation très basse énergie des aquifères n'ont généralement pas montré d'impact significatif tant du point de vue géochimique que microbiologique. Notamment, la capacité d'autoépuration des aquifères ne semble pas affectée par les variations de températures classiquement associées à la très basse énergie. Des investigations complémentaires doivent cependant être menées pour confirmer ces résultats dans différents contextes d'exploitation et en particulier pour des gammes de variations thermiques élevées (aquifères à forte densité d'exploitation avec recyclage thermique chronique).

## 4 Impacts liés à l'abandon de forage

### 4.1 PROCEDURES D'ABANDON

Un forage abandonné constitue un point fragile qui, s'il n'est pas convenablement traité, peut être à l'origine de pollutions : au fil du temps, l'équipement d'un forage abandonné se corrode et celui-ci se transforme alors en un drain vertical assurant la mise en communication des formations géologiques traversées.

Les risques associés sont :

- de favoriser l'infiltration d'eau de surface dans le milieu souterrain (eaux de pluie, et/ou éventuellement eaux polluées) ;
- de mettre en communication des aquifères de qualité différente ;
- de provoquer l'hydratation (gonflement) ou la dissolution de formations géologiques sensibles à l'eau.

L'objectif lors de l'abandon est donc de rétablir durablement l'étanchéité compromise lors de la foration. Les prescriptions élémentaires d'abandon sont décrites dans les normes relatives aux forages d'eau et aux sondes géothermiques : NF X 10-999 et NF X 10-970 ; elles sont reprises dans le guide d'application de l'arrêté interministériel du 11/09/2003. Elles ont pour but de « garantir l'absence de circulation d'eau et l'absence de transfert de pollution ».

### 4.2 DEVENIR A LONG TERME

Dans tous les cas, et même si les procédures sont réalisées conformément aux normes, un facteur semble pouvoir poser problème à long terme : la tenue dans le temps du ciment utilisé pour l'équipement et pour le comblement du forage ou de la sonde.

- Les risques de dégradation du ciment, lorsqu'ils sont présents en cours d'exploitation, sont amplifiés à long terme ;
- Même lorsqu'aucun risque n'a pu être identifié lors de la foration ou de l'exploitation, les données concernant la durabilité à très long terme des différents types de ciments employés sont absentes du fait du manque de recul temporel et de l'impossibilité de procéder à des investigations sur d'anciens ouvrages abandonnés, du fait même de leur rebouchage. L'étanchéité à très long terme des forages abandonnés n'est donc pas assurée.

Par ailleurs, la conservation des données de forage (localisation, coupe techniques après comblement, ...) préconisée par les normes n'est pas garantie. D'autant plus pour les forages non déclarés. Certains forages peuvent ainsi être ignorés.



## **5 Exemples de cas de désordres provoqués par des installations géothermiques**

La collecte d'informations sur des cas réels de pollutions d'aquifère et de désordres géotechniques ou d'autres impacts résultants directement de la réalisation d'une installation géothermique ou de son exploitation ou de son abandon s'est avérée difficile. Si un certain nombre d'informations circulent par ouï-dire, il est rare de pouvoir obtenir des précisions sur le lieu précis ou la nature réelle de l'incident. Cet état de fait est illustré par les cas de dysfonctionnements recensés par l'Agence environnementale du Bade-Wurtemberg (Allemagne) qui n'ont pas pu être décrits dans le détail ici pour cause de non communicabilité des informations les concernant. Au final, seuls quatorze cas concernant la géothermie de très basse énergie ont pu être suffisamment renseignés pour être exploités. Ces cas sont synthétisés dans le Tableau 17. Il est à noter qu'ils concernent essentiellement des sondes géothermiques, mais également qu'ils sont la plupart du temps consécutifs à des défauts de mise en œuvre des techniques d'installation préconisées ou à une exploitation non-respectueuse des dimensionnements initiaux des installations.

| Nom                       | Type         | Prof.     | Cause de l'incident                                                                 | Conséquences                                             |
|---------------------------|--------------|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Staufen-en-Brisgau (D)    | SGV          | 140 m     | Cimentation non-conforme. Mise en communication aquifère - anhydrite                | Gonflement - Dégâts importants sur bâtiments             |
| Hilsprich (F)             | SGV          | 95 - 98 m | Mauvaise cimentation. Dissolution d'une formation de sels                           | Affaissement - désordre sur les bâtiments et la chaussée |
| Chesalles sur Moudon (CH) | SGV          | 78 m      | Surexploitation - Gel des terrains                                                  | Effondrement lors du dégel                               |
| Le Locle (CH)             | SGV          | 65 m      | Surexploitation - Gel des terrains                                                  | Effondrement lors du dégel                               |
| Hauterive (CH)            | SGV          | 60 m      | Mise en communication d'un aquifère artésien avec les terrains supérieurs           | Entonnoir de dissolution, remontée d'eau en surface      |
| Le Paquier (CH)           | SGV          | 55 m      | Surexploitation (sous dimensionnement) - Gel des terrains                           | Effondrement lors du dégel                               |
| Le Bouveret (CH)          | SGV          | 62 m      | Surexploitation (sous dimensionnement) - Gel des terrains                           | Effondrement lors du dégel                               |
| La Saussaye (F)           | SGV          |           | Mise en communication d'aquifère                                                    | Transfert d'une pollution                                |
| Vallentuna (SU)           | SGH          | 2 m       | Fuite de caloporteur                                                                | Contamination de puits jusqu'à 200 m                     |
| Saint-Pantaléon (AU)      | SGV          | 99 m      | Percement d'une bulle de gaz                                                        | Fuite de gaz en surface                                  |
| Renningen (D)             | SGV          |           | Mise en communication d'aquifères                                                   | Assèchement de puits à proximité                         |
| Eltingen (D)              | SGV          |           | Mise en communication d'aquifères, dissolution d'une formation salifère sus-jacente | Dégâts aux bâtiments                                     |
| Bromley (GB)              | Forage d'eau |           | Ecoulement d'une formation sableuse dans une cavité karstique sous-jacente          | Affaissement, dégâts importants                          |
| Lochwiller (F)            | SGV          | 140 m     | Percement d'un aquifère captif - remontée d'eau dans l'aquifère supérieur           | Inondation d'une cour de ferme en contrebas              |

Tableau 17. Synthèse des cas recensés

- **Staufen-en-Brisgau (Allemagne)**

**Opération** : 7 sondes géothermiques verticales de 140 m de profondeur. Zone considérée comme difficile, la géothermie n'y est autorisée que sous certaines conditions techniques et réglementaires qui n'ont pas été respectées, le moindre coût a été favorisé (pas de ciment résistant aux sulfates).

**Cause** : Mauvaise cimentation sur des SGV et mise en communication d'une masse d'eau souterraine sous pression avec une formation d'anhydrite. L'hydratation de l'anhydrite a pour conséquence la transformation de celle-ci en gypse accompagnée d'une augmentation de volume de 61%, c'est-à-dire un gonflement.

L'épaisseur des formations au-dessus de l'anhydrite était insuffisante pour empêcher le gonflement de se répercuter en surface.

**Impact** : Élévation des terrains de 1cm/mois (total de 26cm) entraînant des dégâts importants sur les bâtiments de la ville (fissuration).

Risque sur les réseaux d'eau et de gaz

**Remédiation** : Pour stopper le phénomène il a été décidé d'isoler la nappe d'eau de l'anhydrite : section des sondes au niveau de l'anhydrite et injection de ciment dans la formation. Depuis le gonflement semble avoir ralenti.

Des raccords en PEHD ont été ajoutés aux réseaux d'eaux et de gaz pour supporter un allongement.

Un pompage de l'eau est également effectué pour rabattre la nappe, la diminution de pression causée a entraîné l'effondrement de deux des puits.

- **Hilsprich (France)**

**Opération** : 2 sondes géothermiques verticales de 95 et 99 m de profondeur.

**Cause** : Mauvaise cimentation. Dissolution d'une formation de sels entraînant un affaissement.

**Impact** : Affaissement des terrains (7,5 cm/an). Désordre sur les bâtiments et la chaussée.

- **Chesalles sur Moudon (Suisse)**

**Opération** : 4 sondes géothermiques verticales de 72 m de profondeur.

**Cause** : L'installation, prévue pour une puissance de 26.7 kW au départ (sous-dimensionnée), a été sur-exploitée à 38 kW.

**Impact :** Cycles de gel dégel des terrains entraînant la formation d'un entonnoir d'effondrement, avec rupture d'un raccord sur une des sondes.

- **Le Locle (Suisse)**

**Opération :** 2 sondes géothermiques verticales de 65 m de profondeur.

**Cause :** L'installation, prévue pour une puissance de 10.6 kW au départ, a été sur-exploitée à 14 kW du fait de défaut d'isolation du bâtiment.

**Impact :** Cycles de gel dégel des terrains provoquant un effondrement de terrain au droit des sondes.

- **Hauterive (Suisse)**

**Opération :** 2 sondes géothermiques verticales de 60 m de profondeur.

**Cause :** Défaut d'étanchéité. Un artésianisme non présent au moment du forage provoque des remontées d'eau lors de la fonte des neiges.

**Impact :** Léger entonnoir d'effondrement au droit de l'une des sondes.

**Remédiation :** Mise en place d'un drain

- **Le Paquier (Suisse)**

**Opération :** 2 sondes géothermiques verticales de 55 m de profondeur.

**Cause :** L'installation a été sous dimensionnée et sur-exploitée.

**Impact :** Cycles de gel dégel des terrains provoquant un effondrement de terrain au droit des sondes.

- **Le Bouveret (Suisse)**

**Opération :** 5 sondes géothermiques verticales de 62 m de profondeur.

**Cause :** L'installation a été sous dimensionnée et sur-exploitée.

**Impact :** Cycles de gel dégel des terrains provoquant un effondrement de terrain au droit de chaque sonde, et l'arrachage de plusieurs têtes de sondes.

- **Vallentuna (Suède)**

**Opération :** Echangeur horizontal.

**Cause :** Inconnue.

**Impact :** Fuite de 150 à 200 litres de liquide d'un échangeur horizontal, contenant 40 à 50 litres de propylène-glycol et de petites quantités d'inhibiteurs. Apparition de mousse, accompagnée d'une forte odeur de produit chimique dans un puits privé situé à proximité. Au final 3 puits ont été contaminés, le plus éloigné situé à 200 m de la fuite. Odeur d'H<sub>2</sub>S, eau qui devient brune et forte teneur en fer et en manganèse ainsi qu'une très forte activité bactérienne. Les teneurs en fer et manganèse résultantes n'ont pas rendu les eaux des puits toxiques.

**Remédiation :** Dégradation par les bactéries autochtones. L'eau est redevenue consommable au bout de 5 mois et aucune trace de propylène-glycol n'a depuis lors été repérée.

- **Lochwiller (France)**

**Opération :** 1 sonde géothermique verticale de 140 m.

**Cause :** Cimentation incomplète, du fait de zones de pertes (fissures), d'une formation imperméable surplombant un aquifère captif sous pression .

**Impact :** Remontée d'eau dans l'aquifère superficiel, puis écoulement gravitaire et résurgence provoquant l'inondation d'une habitation en contrebas.

Faute d'éléments précis de caractérisation, certains des cas cités dans le Tableau 17 ne sont pas détaillés ici.

Par ailleurs, certains cas de dysfonctionnements n'ont pas pu être répertoriés dans le présent rapport pour cause de non communicabilité des informations les concernant. C'est le cas des données issues de la base de données relatives aux désordres causés par des opérations de géothermie administrée par l'Agence environnementale du Bade-Wurtemberg (Allemagne) Le nombre de cas recensés s'élève actuellement à 84 d'après une communication de E. de Haas au salon Geotherm 2012. D'après l'administrateur de la base de données associée à cette étude, seule une dizaine de cas (dont Stauffen, Renningen et Eltigen) seraient réellement problématiques (cf. Tableau 18) : 5 cas d'artésianisme non maîtrisé et 2 cas de mise en communication d'aquifères (dont le cas de Staufen-en-Brigau).

| 2011                                                                                            |                             |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Nature du problème                                                                              | Nombre de cas problématique |
| Artésianisme                                                                                    | 5                           |
| Non-respect de la législation (pas de déclaration, etc..)                                       | 2                           |
| Présence de vides (cavernes, failles) mis en évidence par des pertes de volume de béton injecté | 5                           |
| Mise en communication de deux aquifères naturellement séparés                                   | 2                           |
| Problème de mise en œuvre (concentrations élevées en Fe et Mn par exemple)                      | 5                           |
| TOTAL                                                                                           | 19                          |

Tableau 18. Synthèse des cas recensés en 2011 par l'Agence environnementale du Bade-Wurtemberg (Allemagne)

Compte tenu des difficultés à obtenir des informations et du fait que des dysfonctionnements entraînant par exemple des pollutions diffuses d'une nappe peuvent être difficiles à détecter, les quatorze cas recensés ici ne représentent probablement que la partie la plus visible. Seul un suivi actif des installations, précédé d'un inventaire des opérations passées, permettrait de connaître plus précisément l'étendu des impacts liés à la géothermie très basse énergie.

## 6 Classification des impacts et première analyse de risque

A partir de l'étude bibliographique, de la consultation d'experts et des cas réels recensés, une première classification des impacts a été mise en œuvre, accompagnée d'une analyse de risque.

La méthode retenue a consisté à classer les impacts résultants directement de la foration, l'exploitation ou l'abandon d'installations de géothermie très basse énergie en fonction des processus mis en jeu et à leur attribuer des notes relatives aux aléas associés et à l'importance des impacts associés. En l'état et compte tenu du faible nombre de cas, cette classification reste fortement subjective. Ainsi certains aléas ont été estimés importants alors qu'aucun cas n'a été recensé à l'heure actuelle.

Une note de 1 à 3 a été attribuée à l'aléa (la probabilité d'occurrence) :

- 1 Incident très peu probable.
- 2 Incident peu probable.
- 3 Incident probable et/ou existence de cas avérés.

Une note de 1 à 3 a été attribuée à l'importance de l'impact :

- 1 Impact faible ou facilement remédiable.
- 2 Impact significatif.
- 3 Impact important (pollution durable, dégâts aux bâtiments...).

Le risque résultant (de 1 à 9) est obtenu en multipliant ces deux notes.

Les résultats sont synthétisés dans les Tableau 19, Tableau 20 et.

*(Note : RRA = respect des règles de l'art, CZR = connaissance des zones à risque)*

Même si certains aléas n'ont pas pu être évalués faute de retour d'expérience sur les mécanismes en jeu, il ressort de cette analyse de risques que les actions les plus sensibles sont :

- La foration de SGV en milieu sensible à l'eau (formations solubles et formations gonflantes) ;
- La foration de SGV et de forages d'eau en présence de gaz ;
- La foration de SGV en milieu karstique ;
- La foration de SGV en milieu artésien ;
- La surexploitation des SGV entraînant le gel des terrains.

Les défauts de cimentation (dans les cas de forages d'eau et de SGV) sont également porteurs de risques importants pour les milieux, ceci indépendamment du type de terrains dans lesquelles les installations sont implantées.

Enfin, un risque important est également associé à la perte de mémoire sur la localisation des ouvrages abandonnés.

| Processus                         | Conséquence                                                                                                                    | Cause                       | Possibilités de prévention | Nombre de cas avérés | Type | Aléa (probabilité d'occurrence) | Importance de l'impact | 'Risque' résultant |
|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------|------|---------------------------------|------------------------|--------------------|
| Mise en communication d'aquifères | Hydratation d'une formation d'anhydrite -<br>Gonflement<br>Dissolution d'une formation de sel et/ou de gypse -<br>Affaissement | Foration – Eau              | RRA - CZR                  |                      | Eau  | 2                               | 3                      | 6                  |
|                                   |                                                                                                                                | Foration - SGV              | CZR                        | 1                    | SGV  | 3                               | 3                      | 9                  |
|                                   |                                                                                                                                | Défaut de cimentation – Eau | RRA - CZR                  |                      | Eau  | 1                               | 3                      | 3                  |
|                                   |                                                                                                                                | Défaut de cimentation – SGV | RRA - CZR                  | 1                    | SGV  | 3                               | 3                      | 9                  |
|                                   | Ecoulement vers l'aquifère inférieur -<br>Assèchement de puits/forage                                                          | Défaut de cimentation – Eau | RRA -CZR                   |                      | Eau  | 2                               | 1                      | 2                  |
|                                   |                                                                                                                                | Défaut de cimentation – SGV | RRA - CZR                  | 1                    | SGV  | 3                               | 1                      | 3                  |
|                                   | Ecoulement vers l'aquifère inférieur -<br>déstabilisation des terrains                                                         | Défaut de cimentation – Eau | RRA - CZR                  |                      | Eau  | 1                               | 3                      | 3                  |
|                                   |                                                                                                                                | Défaut de cimentation – SGV | RRA - CZR                  | 2                    | SGV  | 3                               | 3                      | 9                  |

| Processus                         | Conséquence                                                        | Cause                       | Possibilités de prévention | Nombre de cas avérés | Type | Aléa (probabilité d'occurrence) | Importance de l'impact | 'Risque' résultant |
|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------|------|---------------------------------|------------------------|--------------------|
| Mise en communication d'aquifères | Mélange d'eaux de qualités différentes – Dégradation d'un aquifère | Foration – Eau              | RRA - CZR                  |                      | Eau  | 2                               | 1                      | 2                  |
|                                   |                                                                    | Foration - SGV              | CZR                        |                      | SGV  | 3                               | 1                      | 3                  |
|                                   |                                                                    | Défaut de cimentation – Eau | RRA - CZR                  |                      | Eau  | 2                               | 3                      | 6                  |
|                                   |                                                                    | Défaut de cimentation – SGV | RRA - CZR                  | 1                    | SGV  | 3                               | 3                      | 9                  |
|                                   | Ecoulement vers l'aquifère supérieur (artésianisme) - inondation   | Foration – Eau              | RRA - CZR                  |                      | Eau  | 2                               | 1                      | 2                  |
|                                   |                                                                    | Foration - SGV              | CZR                        |                      | SGV  | 3                               | 1                      | 3                  |
|                                   |                                                                    | Défaut de cimentation – Eau | RRA - CZR                  |                      | Eau  | 2                               | 2                      | 4                  |
|                                   |                                                                    | Défaut de cimentation – SGV | RRA - CZR                  | 2                    | SGV  | 3                               | 2                      | 6                  |

| Processus                         | Conséquence                         | Cause                                                      | Possibilités de prévention                                                                                                            | Nombre de cas avérés | Type       | Aléa (proba d'occurrence) | Importance de l'impact | 'Risque' résultant |
|-----------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|------------|---------------------------|------------------------|--------------------|
| Mise en communication d'aquifères | Toutes les conséquences précédentes | Corrosion du tubage - Eau                                  | Utilisation de matériaux adaptés à la chimie de l'eau                                                                                 |                      | Eau        | nc                        | 1 à 3                  |                    |
|                                   |                                     | Dégradation du ciment - Eau                                | Utilisation de matériaux adaptés à la chimie de l'eau – Norme ciments                                                                 |                      | Eau        | nc                        | 1 à 3                  |                    |
|                                   |                                     | Dégradation du ciment - SGV                                | Utilisation de matériaux adaptés à la chimie de l'eau. Dans le cas des SGV, le vieillissement thermique est mal connu - Norme ciments |                      | SGV        | nc                        | 1 à 3                  |                    |
|                                   |                                     | Vieillissement à très long terme des ciments après abandon | Phénomène encore mal connu                                                                                                            |                      | Eau et SGV | nc                        | 1 à 3                  |                    |

Tableau 19 : Impacts potentiels et risques résultants

| Processus                                                                  | Conséquence                         | Cause                                           | Possibilités de prévention                         | Nombre de cas avérés | Type | Aléa (probabilité d'occurrence) | Importance de l'impact | 'Risque' résultant |
|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------|------|---------------------------------|------------------------|--------------------|
| Infiltration depuis la surface                                             | Pollution d'aquifère                | Défaut d'étanchéité au niveau du sol- Eau       | RRA                                                |                      | Eau  | 1                               | 2                      | 2                  |
|                                                                            |                                     | Défaut d'étanchéité au niveau du sol- SGV       | Protection des têtes de sonde                      |                      | SGV  | 2                               | 2                      | 4                  |
| Fuite de liquide caloporteur                                               | Pollution au propylène-glycol       | Rupture du tubage - SGH                         | Utilisation de fluide caloporteur aux normes       | 1                    | SGH  | 3                               | 2                      | 6                  |
|                                                                            |                                     | Rupture du tubage – SGV – défaut de cimentation | Utilisation de fluide caloporteur aux normes - RRA |                      | SGV  | 1                               | 2                      | 2                  |
| Perçement d'une bulle de gaz                                               | Fuite en surface                    | Foration – Eau                                  | CZR                                                |                      | Eau  | 2                               | 3                      | 6                  |
|                                                                            |                                     | Foration - SGV                                  | CZR                                                | 1                    | SGV  | 2                               | 3                      | 6                  |
| Ecoulement d'une formation sableuse dans une cavité karstique sous-jacente | Affaissement de terrain             | Foration – Eau                                  | RRA - CZR                                          | 1                    | Eau  | 1                               | 3                      | 3                  |
|                                                                            |                                     | Foration - SGV                                  | CZR                                                | 1                    | SGV  | 2                               | 3                      | 6                  |
| Pollution par les produits de forages                                      | Pollution ponctuelle lors du forage | Foration                                        | RRA – Produits aux normes                          |                      |      | 3                               | 1                      | 3                  |
| Pollution par les ciments et leurs adjuvants                               | Pollution diffuse dans le temps     | Cimentation                                     | Produits aux normes                                |                      |      | 3                               | 1                      | 3                  |

Tableau 20. Impacts potentiels et risques résultants.

| Processus         | Conséquence                                                                 | Cause                                                                           | Possibilités de prévention                                              | Nombre de cas avérés | Type       | Aléa (proba d'occurrence) | Importance de l'impact | 'Risque' résultant |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|----------------------|------------|---------------------------|------------------------|--------------------|
| Impact thermique  | Gel/dégel des terrains - affaissement/effondrement                          | Surexploitation par rapport au dimensionnement                                  | Conservation et respect des puissances maximales                        | 4                    | SGV        | 3                         | 2                      | 6                  |
|                   | Modification de la température du sous-sol/de l'aquifère - conflits d'usage | Concentration d'ouvrages trop importante                                        | Estimation des impacts thermiques<br>Connaissance des ouvrages existant | 2                    | Eau et SGV | 3                         | 1                      | 3                  |
|                   | Prolifération bactérienne                                                   | Exploitation de l'installation ou de l'ensemble des installations d'un aquifère | nc                                                                      |                      | Eau et SGV | nc                        | 2                      | nc                 |
|                   | Modification de volume des argiles gonflantes due à l'impact thermique      | Exploitation de l'installation                                                  | nc                                                                      |                      | SGV        | nc                        | nc                     | nc                 |
|                   | Impact sur le milieu naturel environnant                                    | Rejets en surface<br>Modification de la température de la nappe                 | Prise en compte des zones de protection du milieu                       |                      | Eau        | nc                        | nc                     | nc                 |
| Abandon d'ouvrage | Perte de mémoire sur l'existence des ouvrages                               | Défaut de déclaration                                                           | Meilleures incitation à la déclaration – Campagnes de recensement       |                      | Eau et SGV | 3                         | 2                      | 6                  |

Tableau 21. Impacts potentiels et risques résultants



## 7 Préconisations

La consultation d'experts associée à une recherche bibliographique ont permis d'établir un inventaire d'impacts potentiels de la géothermie de très basse énergie sur le sous-sol et les eaux souterraines susceptibles d'intervenir au cours des phases de réalisation, d'exploitation et d'abandon des ouvrages. Il ressort que le respect de prescriptions et de la réglementation existantes permettrait de prévenir une grande partie de ces impacts, mais que des moyens de prévention complémentaire peuvent être développés pour encadrer le développement rapide de la filière géothermie. Plusieurs pistes sont préconisées. Elles visent :

- à l'amélioration de la connaissance de l'existant en matière d'exploitation énergétique du sous-sol et des aquifères ;
- à l'amélioration de la connaissance de zones à risque et à la définition de règlements spécifiques à ces zones ;
- à l'amélioration de la qualité des matériaux utilisés ;
- à l'amélioration du respect des règles de l'art en matière de réalisation des ouvrages d'exploitation ;
- au développement de politiques locales de gestion des ressources énergétiques du sous-sol associées au développement d'outils de gestion spécifiques ;
- à la mise en place de programmes d'évaluation de risques actuellement méconnus.

Ces pistes sont détaillées dans la suite de ce chapitre

### 7.1 CONNAISSANCES ET BANCARISATION DES INSTALLATIONS

L'amélioration de la connaissance de l'existant en matière d'exploitation énergétique du sous-sol et des aquifères passe par :

- L'incitation des maîtres d'ouvrage à déclarer leurs installations avec, pour effet secondaire, de responsabiliser ses derniers et de les inciter à plus de qualité dans leur réalisation ;
- La réalisation de campagnes de recensement des installations existantes particulièrement dans les zones urbaines ou industrielles connues pour la concentration d'installations géothermiques ;
- L'obligation, pour les maîtres d'ouvrage, de conserver les documents précisant les puissances et/ou débits maximum ainsi que les régimes d'exploitation prévus (au moment du dimensionnement des installations) de manière à éviter les risques liés à la surexploitation en cas de modification de l'installation ;
- Le développement de bases de données dédiées aux installations géothermiques et permettant l'accès à l'information sur les installations existantes pour les maîtres d'ouvrages.

## 7.2 CONNAISSANCE DES ZONES A RISQUES

L'amélioration de la connaissance de zones à risque et leur gestion passe par :

- Le développement d'une offre d'information facilement accessible sur la localisation de zones à risque géologique et des zones où des règlements particuliers s'appliquent ;
- Le développement d'une réglementation territorialisée qui permette :
  - o de définir des zones d'interdiction ou de régimes d'autorisation pour chaque type d'exploitation géothermique
  - o de relayer les documents normatifs en rendant obligatoire et éventuellement en renforçant leurs prescriptions techniques dans les zones à risques ;
  - o de mettre en place une obligation de moyens pour les foreurs : disponibilité d'outillages et de matériaux adaptés dans les ateliers de forage.
- Les pistes à envisager en matière de réglementation des réalisations en contexte géologique à risque sont : Zones à sel, gypse, anhydrite : les forages de SGV devraient probablement y être interdits ( sous réserve d'une évaluation au cas par cas du risque), sauf éventuelle dérogation si le maître d'ouvrage peut justifier sa capacité à isoler les niveaux concernés, y compris en cours de forage. Il pourrait être judicieux d'y soumettre les forages d'eau à autorisation ;
- Zones comportant des nappes superposées : la cimentation des forages de type SGV devrait y être obligatoire. Lorsque des différences de niveaux hydrostatiques importantes entre les nappes sont connues ce type de forage devrait être proscrit ;
- Zone d'artésianisme connues : les préconisations de la norme NF X 10-970 en cas d'artésianisme pourraient être rendues obligatoires. Des préconisations similaires en cas de risque de drainance descendante pourraient être mises en œuvre ;
- Zones de karst ou de fissuration importantes : les préconisations de la norme NF X 10-970 concernant les zones de pertes pourraient être rendues obligatoires ;
- Zone de présence potentielle de bulle de gaz : tout forage en vue d'une installation géothermique très basse température devrait être prohibé.

## 7.3 QUALITE DES MATERIAUX

- Une norme qualité des ciments géothermique est actuellement en cours d'élaborations. Le respect de certaines de ses préconisations pourrait être rendu obligatoire ;
- Concernant les différents fluides de forage, les adjuvants et les fluides caloporteurs, une liste des produits autorisés pourrait être mise en place de manière à limiter l'impact d'éventuelles pollutions.

## **7.4 RESPECT DES REGLES DE L'ART**

Tout au long des chapitres précédents, l'existence de préconisations techniques permettant de prévenir et/ou de minimiser les impacts inventoriés a été mise en avant. Le respect de ces préconisations n'est pas toujours effectif et des efforts doivent porter sur :

- La formation des acteurs de la filière Géothermie très basse énergie à ces règles de l'art ;
- L'incitation à de bonnes pratiques par la certification qualité par exemple ;
- La mise en place de mesures de contrôle des réalisations en phase de chantier ;
- La limitation de la pression économique sur la qualité des forages (par exemple, révision des règles d'attribution de marché).

Par ailleurs, certaines règles pourraient être précisées ou modifiées (notamment celles concernant les têtes des forages de sondes géothermiques verticales et celles concernant les températures d'exploitation autorisées) ;

## **7.5 GESTION DES RESSOURCES ENERGETIQUES DE TRES BASSE ENERGIE**

Une véritable gestion des ressources énergétiques du sous-sol devrait être développée afin d'arriver à une adéquation besoins/ressources optimale et à une répartition des installations de très basse énergie respectueuse des différents usages et garante de leur durabilité. Elle passe par la mise en œuvre de différents moyens :

- Recensement des installations existantes et de leur puissance en milieu à forte densité d'exploitation (urbain) en particulier et développement de bases de données spécifiques ;
- Réseaux de surveillance des températures et de la flore bactérienne en milieu à forte densité d'exploitation en particulier ;
- Développement d'outils de gestion des ressources énergétiques du sous-sol et des aquifères : outils de recensement des installations et de prédiction des impacts hydrauliques et thermiques ;
- Définition de règlements locaux permettant d'encadrer la concentration d'installations géothermiques.

## **7.6 ETUDES COMPLEMENTAIRES**

Certains phénomènes pouvant engendrer des impacts sont actuellement méconnus et pourraient faire l'objet d'études complémentaires. Notamment :

- La résistance des ciments aux cycles de températures imposés par une sonde géothermique verticale et dans un contexte de champ de sondes ;

- Le comportement à très long terme des ciments dans le cas d'ouvrages abandonnés (cela concerne l'ensemble des forages quel que soit leur usage et dépasse le cadre de la géothermie) ;
- Les impacts thermiques et biogéochimiques associés à des températures extrêmes (concentration de rejets chauds ou froids et stockage d'énergie sur champs de sondes) ;
- Risques induits par une modification du volume des argiles gonflantes en réponses aux contraintes thermiques imposées par une sonde géothermique verticale ;
- Evaluation de la toxicité d'adjuvants de foration, d'inhibiteurs de corrosion et de fluides caloporteurs couramment utilisés dans le milieu naturel ;
- Evaluation de la part de la géothermie dans les phénomènes d'îlot de chaleur souterrains urbain.

## 8 Conclusion

La consultation d'experts associée à une recherche bibliographique ont permis d'établir un inventaire d'impacts potentiels de la géothermie de très basse énergie sur le sous-sol et les eaux souterraines susceptibles d'intervenir au cours des phases de réalisation, d'exploitation et d'abandon des ouvrages.

Elle a également permis de recueillir des exemples de cas avérés de désordres environnementaux provoqués par des opérations de géothermie de très basse énergie ; mais seulement un faible nombre de cas documentés ont pu être intégrés au rapport.

Une analyse de risques associés à chaque étape de la réalisation d'ouvrages géothermique tenant compte des particularités géologiques et hydrogéologiques de certains milieux a aussi été réalisée dans le but de hiérarchiser les différents impacts inventoriés.

Enfin, des recommandations visant à améliorer l'encadrement de la filière ont pu être proposées.

L'inventaire des impacts potentiels fait ressortir que chaque phase de la construction d'une installation géothermique peut être vectrice 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) :

- foration de SGV en milieu sensible à l'eau (formations solubles ou gonflantes) ;
- foration de SGV et de forages d'eau en présence de gaz ;
- foration de SGV en milieu karstique ;
- foration de SGV en milieu artésien.

Elles concernent particulièrement la réalisation des sondes géothermiques verticales.

Il ressort également que le non-respect des préconisations d'utilisation des équipements (dimensionnement), en particulier des sondes géothermiques verticales est susceptible de provoquer des impacts majeurs : surexploitation des SGV entraînant le gel des terrains.

Les défauts de cimentation (dans les cas de forages d'eau et de SGV) sont également porteurs de risques importants pour les milieux, ceci indépendamment du type de terrains dans lesquelles les installations sont implantées.

Enfin, un risque important est associé à la perte de mémoire sur la localisation des ouvrages abandonnés.

Cette étude met également en relief le fait que des solutions de prévention des impacts existent pour la plupart d'entre eux et sont énoncées dans les documents normatifs et

réglementaires disponibles. Le respect de ces « règles de l'art » permettrait de prévenir une grande partie des impacts, mais des moyens de prévention complémentaire peuvent être développés pour encadrer le développement rapide de la filière géothermie. Plusieurs pistes sont préconisées. Elles visent :

- à l'amélioration de la connaissance de l'existant en matière d'exploitation énergétique du sous-sol et des aquifères ;
- à l'amélioration de la connaissance de zones à risque et à la définition de règlements spécifiques à ces zones ;
- à l'amélioration de la qualité des matériaux utilisés ;
- à l'amélioration du respect des règles de l'art en matière de réalisation des ouvrages d'exploitation ;
- au développement de politiques locales de gestion des ressources énergétiques du sous-sol associées au développement d'outils de gestion spécifiques ;
- à la mise en place de programmes d'évaluation de risques actuellement méconnus.

De nouvelles pistes d'études ou de recherches sont également proposées au fil du rapport.

## 9 Bibliographie

**Abdo J.** (2011) - Ciments. p. 11.

**Adrian N. R., Arnett C. M.** (2007) - Anaerobic biotransformation of explosives in aquifer slurries amended with ethanol and propylene glycol. *Chemosphere*, 66, p. 1849-1856.

**AFNOR : NF X 10-970** (2011) - Forage d'eau et de géothermie Sonde géothermique verticale (échangeur géothermique vertical en U avec liquide caloporteur en circuit fermé). *Norme*, NF X 10-970, p. 1-37.

**AFP** (28 nov. 2008) - La géothermie vire au cauchemar à Staufen-en-Brigau. , 2011, p. 1.

**Allen A., Milenic D., Sikora P.** (2003) - Shallow gravel aquifers and the urban 'heat island' effect: a source of low enthalpy geothermal energy. *Geothermics*, 32, p. 569-578.

**Anderson M. P.** (2005) - *Ground Water*, 43, p. 951-968.

**ANSES (2011)** - Avis et rapport d'août 2011 (saisine n° 2010-SA-0047).

**ATLAS, Lupe E., Renaud F.** (2006) - Surveillance de la qualité microbiologique de la nappe phréatique de Lyon en fonction de la température : relations avec les caractères physicochimiques tels que DBO5, DCO, turbidité, pH, teneur en nitrates, conductivité. 1-35 p. (06095-1).

**Axtmann R. C.** (1975) - Environmental-Impact of a Geothermal Power-Plant. *Science*, 187, p. 795-803.

**Barcelona M. J., Helfrich J. A.** (1986) - Well Construction and Purging Effects on Groundwater Samples. *Environ. Sci. Technol.*, 20, p. 1179-1184.

**Bel A., Bezelgues-Courtade S., Jorio M. et al.** (2010) - La géothermie en Rhône-Alpes : comparatif technique et mesures d'encadrement. (59048-FR).

**Bergeron G., Dehays H., Pointet T.** (1983) - Remontées des nappes d'eau souterraine cause et effet. 50 p.

**Birkle P., Merkel B.** (2000) - Environmental impact by spill of geothermal fluids at the geothermal field of Los Azufres, Michoacan, Mexico. *Water Air and Soil Pollution*, 124, p. 371-410.

- Bonnet S., Khelidj A.** La durée de vie des ouvrages en béton armé situés sur la façade atlantique. Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique. 1-33 p. (2-1).
- Brette G.** (1992) - Climatisation du palais des congrès (porte maillot, paris 17) par eau de nappe. Etude de préfaisabilité hydrogéologique. Orléans : BRGM. 1-22 p. (BRGM/RR-36173-FR).
- BRGM** (2008a) - La géothermie Quelles technologies pour quels usages ? 2e édition ed. 64 p.
- BRGM** (2008b) - Pompe à chaleur géothermique sur aquifère conception et mise en œuvre. 1ère édition ed. 72 p.
- BRGM.SPG** (1985) - Prescriptions minimales et recommandations spécifiques aux forages géothermiques - dogger du bassin parisien. Orléans : BRGM. 1-68 p. (BRGM/85-SGN-325-SPG).
- Brielmann H., Schmidt S. I., Ferraro F. et al.** (2010) - Does shallow geothermal energy use threaten groundwater ecosystem functions? *EGU General Assembly 2010*, 12, p. 1.
- Bromley C. J.** (2005) - The ying and yang of geothermal environmental management. *Transactions - Geothermal Resources Council*, 29, p. 595-600.
- Brons H. J., Griffioen J., Appelo C. A. J. et al.** (1991) - (Bio)geochemical reactions in aquifer material from a thermal energy storage site. *Water Res.*, 25, p. 729-736.
- Callier L., Haas H.** (2009) - Potentiel de relargage de certains coulis et boues utilisés dans les forages et les fondations. *Travaux*, 864, p. 49-50.
- Castany G.** (1982) - Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Bordas. Paris : Bordas. 236 p.
- Cheradame J. M., Ignatiadis I.** (1997) - Contrôle de l'évolution de l'activité bactérienne et des pertes de charge dans les tubages d'un doublet géothermique du bassin de Paris. 1-113 p. (BRGM/RR-39445-FR).
- Chiasson A. D., Rees S. J., Spitler J. D.** (1999) - A preliminary Assessment of the Effects of Groundwater Flow on Closed-Loop Ground-Source Heat Pump Systems. *ASHRAE*, DA-00-13-5 (4365), p. 1-15.
- Cooper A. H.** (1998) - Subsidence hazards caused by the dissolution of Permian gypsum in England: geology, investigation and remediation. *Geohazards in Engineering Geology*, 15, p. 265-275.

**Cooper A. H. Farrant A.R. Price S.** (2009) British Geological Survey - Karst, GIS and geological hazard planning and management in Great Britain.

**Cotiche C., Abou.Akar A., Amalhay M. et al.** (1995) - Analyse et conséquences de la prolifération bactérienne sur les tubages et dans le réservoir (proche ou lointain) des doublets géothermiques du bassin de paris. Orléans : BRGM. 1-53 p. (BRGM/RR-38684-FR).

**Cram Bourgogne et Franche-Comté** (2000) - Glycol  
Qu'est-ce que c'est ?  
Comment les identifier ?  
Que faire ? Cram Bourgogne et Franche-Comté. 1-45 p. (00-15).

**Daysh S., Chrisp M.** (2009) - Environmental planning and consenting for Wairakei; 1953-2008; Wairakei geothermal field, New Zealand; 50 years generating electricity [modified]. *Geothermics*, 38, p. 192-199.

**Degrémont** (2005) - Mémento technique de l'eau. Degrémont SA ed. 1928 p.

**Detay M.** (1993) - Le forage d'eau. Paris : Masson. 379 p.

**Diao N. R., Li Q. Y., Fang Z. H.** (2004) - Heat transfer in ground heat exchangers with groundwater advection. *International Journal of Thermal Sciences*, 43, p. 1203-1211.

**Diao N., Li Q., Fang Z.** (2004) -  
Heat transfer in ground heat exchangers with groundwater advection. *International journal of thermal sciences*, 1, p. 1-9.

**Environment Agency UK.** (2011) – Environmental good practice guide for ground source heating and cooling.

**Eugster W. J.** (2009) - Exploitation de la chaleur tirée du sol et du sous-sol Aide à l'exécution destinée aux autorités d'exécution et aux spécialistes de géothermie. l'environnement pratique. Berne : office fédéral de l'environnement. 51 p.

**Bureau de recherches géologiques et minières, France. Ministère de la qualité de la vie, environnement, Electricité de France, Agence française pour la maîtrise de l'énergie, Jaudin, Florence** (1988) - Eaux souterraines et pompes à chaleur : guide pour l'utilisation de l'eau souterraine à des fins thermiques. 141 p.

**Goldscheider N., Bechtel T. D.** (2009) - Editors' message: The housing crisis from underground-damage to a historic town by geothermal drillings through anhydrite, Staufen, Germany. *Hydrogeol. J.*, 17, p. 491-493.

- Goyeneche O., Foucher J. C., Albouy L.** (2005) - Capteurs géothermiques verticaux pour pompes à chaleur. Aspects réglementaires, règles de l'art et qualification des entreprises de forage. Rapport final.
- Graf M. A., Parriaux A.** (1996) - Risques de contamination du sous-sol par les sondes géothermiques. Suisse : EPFL/DGC/GEOLEP. 1-75 p. (194534).
- Ground med, CETIAT** (2010) - Séminaire pompes à chaleur géothermiques : état de l'art des modes de captage géothermique. p. 1-49.
- Groupe de travail PGN** (2008) - Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel (PGN). Neuchâtel :
- Gustafsson A. M., Westerlund L.** (2009) - Multi-injection rate thermal response test in groundwater filled borehole heat exchanger. *Renewable Energy*, 35, p. 1061-1070.
- Gutierrez A.** (2008) - Le forage d'eau. BRGM.
- Hähnlein S., Bayer P., Blum P.** Review on the international legal status for the thermal use of groundwater. 25-29 avril 2010, Bali. Ed. by Proceedings World Geothermal Congress 2010. , p.1-2.
- HERVE J. Y.** (2009) - Etat de l'art relatif à la conception et à la mise en œuvre des forages géothermiques au Dogger. Rapport final. Orléans : BRGM. 1-99 p. (BRGM/RP-57245-FR).
- Hunt T. M., Brown K. L.** (1996) - Environmental effects of geothermal development and countermeasures; 1995-1996 APEC Energy R&D and technology transfer and renewable energy resource assessment seminar proceedings. In : APEC Energy R&D and technology transfer and renewable energy resource assessment seminar, Beijing, Feb. 6-9, 1996, China. Environmental effects of geothermal development and countermeasures; 1995-1996 APEC Energy R&D and technology transfer and renewable energy resource assessment seminar proceedings. Information Research Institute, Ministry of Electric Power (China), Beijing, China (CHN)
- Ignatiadis I., Abou.Akar A., Amalhay M. et al.** (1994) - Manuel corrosion.- recommandations relatives au suivi de l'efficacité des traitements par inhibiteurs de corrosion en géothermie basse énergie (dogger de la région parisienne). Convention ademe - brgm 3070001. 1-92 p. (BRGM/RR-38123-FR).
- Ignatiadis I., Herve J. Y.** (2007) - Nappes de l'Albien et du Néocomien : Définition des conditions d'accès à la ressource géothermique en Ile-de-France. Rapport final. 1-55 p. (BRGM/RP-55990-FR).

**INRS** (2010) - Propylène-glycol. *Fiche toxicologique*. 1-6.

**INRS** (2006) - Ethylène- glycol. *Fiche toxicologique*. 1-6.

**Jaudin F.** (1998) - Géothermie. Rapport d'activité. Convention ADEME-BRGM n° 96.05.024. Orléans : BRGM. 1-128 p. (BRGM/RR-40059-FR).

**Javey C.** (1990) - Projet de forage d'exploitation de saumure pour l'établissement thermal de lons-le-saunier (39). Etude d'impact.

**Kaya E., Zarrouk S. J., O'Sullivan M. J.** (2011) - Reinjection in geothermal fields: A review of worldwide experience. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 15, p. 47-68.

**Klotzbücher T., Kappler A., Straub K. L. et al.** (2007) - Biodegradability and groundwater pollutant potential of organic anti-freeze liquids used in borehole heat exchangers. *Geothermics*, 36, p. 348-361.

**Lauga R.** (1990) - Pratique Du Forage D'eau Et Utilisation Des Crepines En Genie Civil Et Forages Profonds

**LCPC, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Centre d'Etude Technique de l'Equipement de l'Est** (2010) - Cartographie des forages géothermiques réalisés dans l'Est de la France et recouplement avec la réglementation Suisse. 1-21 p. (Op 11L103).

**CONSEIL D'ÉTAT de la République et canton de Genève** (2010) - Règlement sur l'utilisation des eaux superficielles et souterraines (RUESS). , L 2 05.04,

**Lecomte J.** (2010) - Caractérisation des propriétés thermiques et mécaniques des ciments géothermiques et de leurs évolutions au cours du temps et après des cycles gel-dégel. Nancy : LCPC. 1-137 p.

**Lehr J. H.** (1977) - Last - Basic Guide to Water Well Construction Specifications. *Ground Water*, 15, p. 2-4.

**Lenotte J.** (2003) - Utilisation des fondations thermoactives avec les pompes à chaleur. Saint remy les chevreuse cedex : Costic. 1-61 p. (41005).

**Lepicier V.** (2009) - Impacts thermiques des pompes à chaleur utilisées en climatisation sur les eaux souterraines de la ville de Lyon. Ingénieur du Génie Sanitaire ed. Thèse, Ecole des Hautes Etudes en Santé Publique. 1-50 p.

**Lopez S., Millot R., Brach M. et al.** (2008) - Problématique de réinjection des fluides géothermiques dans un réservoir argilo-gréseux : retour d'expériences et apport de

l'étude des fluides du Trias du Bassin de Paris. Rapport final. Orléans : BRGM. 1-196 p. (BRGM/RP-56630-FR).

**Lucha P., Cardona F., Gutierrez F. et al.** (2008) - Natural and human-induced dissolution and subsidence processes in the salt outcrop of the Cardona Diapir (NE Spain); Karst processes, landforms, and environmental problems. *Environmental Geology (Berlin)*, 53, p. 1023-1035.

**Lucha P., Gutierrez F., Guerrero J. et al.** (2008) - Environmental problems and geological implications derived from evaporite dissolution in the Barbastro salt anticline (NE Spain); Karst processes, landforms, and environmental problems. *Environmental Geology (Berlin)*, 53, p. 1045-1055.

**Mabilot A.** (1971) - Le forage d'eau\_guide pratique. 237 p.

**MEDD, BRGM** (2004) - Guide d'application de l'arrêté interministériel du 11 septembre 2003 relatif à la rubrique 1.1.0 de la nomenclature eau. Ministère de l'écologie et du développement durable ed. 90 p.

**Mercilespros.com** (25 mai 2010) - , 2011, p. 1.

**Murzilli O., Galia H.** (2010) Exploitation géothermique des eaux souterraines en milieu urbain. Bilan et perspectives issus du retour d'expérience lyonnais. *Géologues*, n°167, p. 85-91.

**Normand B., Pébère N., Richard C. et al.** (2004) - Prévention et lutte contre la corrosion: Une approche scientifique et technique. Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes. 798 p.

**Noyer M. L., Matray J. M., Lesueur H. et al.** (1996) - Comportement des doublets géothermiques exploitant le réservoir du dogger et analyse du contexte de la percée thermique. Bassin parisien (France). Rapport final. (Convention ADEME-DER n. 4.05.0040.-).

**NVOE** (2004) - Effets de la température sur la qualité des eaux souterraines. Synthèse des connaissances actuelles. Pays-bas : if technology. 1-26 p. (1/53232/GW).

**Ouzounian G., Gauthier B.** (1989) - Les dépôts de fer dans les forages d'eau pour pompes à chaleur. *L'eau, l'industrie, les nuisances*, 125, p. 1-4.

**Pannike S., Kölling M., Panteleit B., Reichling J., Scheps V., Schulz H.** (2006) - Auswirkung hydrogeologischer Kenngrößen auf die Kältefähnen von Erdwärmesondenanlagen in Lockersedimenten . Grundwasser - Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie,

- Peralta G. L., Kirk D. W., Graydon J. W. et al.** (1998) - Assessing the environmental impact of geothermal residues. *Waste Manage. Res.*, 16, p. 225-232.
- Personenkreis geothermie der ad-hoc-arbeitsgruppe geologie.** (2011) – Fachbericht zu bisher bekannten auswirkungen geotermischer vorhaben in den dundeslandern. ???
- Pitt W. A. J., Meyer F. W., Hull J. E.** (1977) - Disposal of Salt-Water during Well Construction - Problems and Solutions. *Ground Water*, 15, p. 276-283.
- Rampnoux N., Vallaes S.** (1999) - Evaluation des risques des anciens forages pétroliers pour les eaux souterraines et l'environnement de la région PACA. (R 40347).
- Rey L.** (2006) - Le forage géothermique doit se faire avec délicatesse. *Au fil de l'eau*, Environnement, p. 32-34.
- Robert J.** (2010) - Forage et carottage dans les roches. , 2011, p. 3.
- Rochon J., Menjoz A.** (1979) - Evaluation des effets des reactions géochimiques lors de l'exploitation d'un doublet géothermique. Orléans : BRGM. 1-24 p. (BRGM/79-SGN-585-MGA).
- Rodicq M.** (2008) - Géothermie, qualité des eaux souterraines et périmètres de protection : Quelles compatibilité ?  
. Ingénieur d'études sanitaires ed. Thèse, Ecole des Hautes Etudes en Santé Publique. 1-54 p.
- Ruhard J. P., Martin J. C.** (1981) - Ville de Pessac. Etude d'impact du forage géothermique de formanoir.
- Rybach L.** (2003) - Geothermal energy: sustainability and the environment. *Geothermics*, 32, p. 463-470.
- Sadiq R., Husain T., Veitch B. et al.** (2003) - Evaluation of generic types of drilling fluid using a risk-based analytic hierarchy process. *Environ. Manage.*, 32, p. 778-787.
- Saivin S., Lavit M., Houin G.** (2000) - Les glycols. *Revue Française des Laboratoires*, 2000, p. 65-69.
- Sass I., Burbaum U.** (2010) - Damage to the historic town of Staufen (Germany) caused by geothermal drillings through anhydrite-bearing formations; Research frontiers and practical challenges in karst hydrogeology. *Acta Carsologica*, 39, p. 233-245.

- Schroeder F. C., Jardine R. J., Kovacevic N. et al.** (2008) - Assessing well drilling disturbance effects on offshore foundation piles in clay. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 134, p. 1261-1271.
- Sims I., Huntley (née Hartshorn) S. A.** (2004) - The thaumasite form of sulfate attack-breaking the rules. *Cement and Concrete Composites*, 26, p. 837-844.
- Slagstad T., Midttomme K., Ramstad R. K. et al.** (2008) - Factors influencing shallow (<1000 m depth) temperatures and their significance for extraction of ground-source heat; Geology for society. Norway (NOR) : Geological Survey of Norway, Trondheim, Norway (NOR). 99-109 p. (11).
- Sourisseau B., Daum J., Longin G.** (1998) - Guide de bonne pratique et de contrôle des forages d'eau pour la protection de l'environnement. BRGM. orléans : BRGM. 78 p.
- Stefansson V.** (1997) - Geothermal reinjection experience. *Geothermics*, 26, p. 99-139.
- Stenuick international** Tubage à l'avancement. *fiche technique*, équipement de forage, p. 1-2.
- Van Beelen P., Schijven J.F., De Roda Husman A.M., Van der Aa N.G.F.M., Otte P.F.** (2011) – De mogelijke risico's van warmte-en koudeopslag voor de grondwaterkwaliteit. Rapport 607050009/2011.
- Vernoux J. F., Bretteville V., Denis L. et al.** (2003) - Inventaire et évaluation des risques engendrés par les forages profonds sur les nappes d'eau souterraine du bassin Seine-Normandie. Orléans : BRGM. 1-193 p. (52102-FR).
- Vernoux J. F., Degouy M., Machard.De.Gramont H. et al.** (2002) - Etude bibliographique sur le suivi des risques engendrés par les forages profonds sur les nappes d'eau souterraine du bassin Seine-Normandie. Orléans : BRGM. 1-126 p. (BRGM/RP-51312-FR).
- Vernoux J. F., Herbrich B.** (2005) - Evaluation des opérations de réhabilitation d'ouvrages pour le suivi piézométrique de la nappe de l'Albien. Rapport final. Orléans : BRGM. 1-37 p. (BRGM/RP-54349-FR).
- Vuataz F. D.** (1997) - Slimhole drilling techniques for deep groundwater exploration: A review. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 90, p. 497-512.
- wdr** (05. Mai 2009) - Wie eine Bohrung nach Erdwärme zur Katastrophe wird. , 2011, p. 1.

**Weres O.** (1988) - Environmental protection and the chemistry of geothermal fluids. *Geotherm Sci Technol*, 1, p. 253-302.

**York K. P., Jahangir S. Z. M. G., Solomon T. et al.** Effects of a large scale geothermal heat pump Installation on aquifer microbiota. p. 1-9.

**Zarrouk S., Kaya E., O'Sullivan M. J.** (2007) - A review of worldwide experience of reinjection in geothermal fields; New Zealand geothermal workshop 2007 and New Zealand Geothermal Association seminar. *Proceedings of the New Zealand Geothermal Workshop*, 29, p. 7.

**Zhou X. X., Ghassemi A.** (2009) - Finite element analysis of coupled chemo-poro-thermo-mechanical effects around a wellbore in swelling shale. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 46, p. 769-778.



## 10 Sites internet consultés.

<http://novatrix.free.fr/pages/preservation/antigels.html>

<http://sovema.pagesperso-orange.fr/8-PRODUIT%20DE%20FORAGE.htm>

<http://www.agroterra.eu/p/monopropylene-glycol-3026872/3026872>

<http://www.guideperrier.com/article1328/Geothermie-a-antigel-Problemes-au-Quebec>

<http://www.hyprodis.fr/A-3496-monopropylene-glycol-like-bidon-de-5-litres.aspx>

[http://www.inchem.org/documents/cicads/cicads/cicad\\_22.htm#PartNumber:6](http://www.inchem.org/documents/cicads/cicads/cicad_22.htm#PartNumber:6)

<http://www.inchem.org/documents/pims/chemical/pim443.htm>

<http://www.oenotechnic.com/Nos-produits,112>

<http://www.portail-beton.fr/ciment/>

<http://www.synad.fr/index.php>

<http://www.techniques-ingenieur.fr/>

<http://www.veximchem.com/fr/propylene%20glycol.htm>

<http://www.vital-concept.com/monopropylene-glycol.html>

[https://poitou-charentes.sante.gouv.fr/accueil/eau\\_robinet/enjeux/pdf/reglementation/approne2.htm](https://poitou-charentes.sante.gouv.fr/accueil/eau_robinet/enjeux/pdf/reglementation/approne2.htm)

<http://www.ineris.fr/reach-info/index.jsp?content=guidesrips#general>

[http://echa.europa.eu/chem\\_data/list\\_registration\\_2010\\_en.asp](http://echa.europa.eu/chem_data/list_registration_2010_en.asp)

<http://www.echemportal.org/echemportal/page.action?pageID=9>

[http://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire\\_environnement/definition/chlorofluocarbone\\_cfc.php4](http://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/chlorofluocarbone_cfc.php4)

<http://www.xpair.com/lexique/definition/hcfc.htm>

[http://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire\\_environnement/definition/hydrofluorocarbures\\_hfc.php4](http://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/hydrofluorocarbures_hfc.php4)

[http://www.arap.org/docs\\_fr/hfc.html](http://www.arap.org/docs_fr/hfc.html)



## **Annexes**



# **Annexe 1**

## **Experts consultés – Compte-rendu de réunion de concertation**



| <b>Société</b>       | <b>Contribution</b>                            |
|----------------------|------------------------------------------------|
| ANTEA                | Entretien<br>Participation au comité d'experts |
| Archambault Conseils | Entretien<br>Participation au comité d'experts |
| G2H Conseils         | Participation au comité d'experts              |

24

| <b>Société</b>       | <b>Contribution</b>                            |
|----------------------|------------------------------------------------|
| VAUTHRIN-FORAGES     | Entretien<br>Participation au comité d'experts |
| RAFFNER FRERES SARL  | Participation au comité d'experts              |
| AUVERGNE FORAGE Sarl | Entretien<br>Participation au comité d'experts |
| COTRASOL             | Entretien                                      |
| Augsburger Forages   | Entretien                                      |
| SFE                  | Participation au comité d'experts              |

| <b>Organisme</b> | <b>Contribution</b> |
|------------------|---------------------|
| AFPG             | Entretien           |

| <b>Organisme</b>   | <b>Contribution</b>                            |
|--------------------|------------------------------------------------|
| Forages assistance | Entretien<br>Participation au comité d'experts |
| IFSTTAR (LCPC)     | Participation au comité d'experts<br>Entretien |

| <b>Organisme</b>                    | <b>Contribution</b>                                |
|-------------------------------------|----------------------------------------------------|
| DRIEE IdF (Cellule Police de l'Eau) | Entretien<br>Participation au comité d'experts     |
| DRIEE IdF (Dossiers code Minier)    | Entretien<br>Participation au comité d'experts     |
| Région Centre                       | Souhaitent être tenus informés du travail en cours |
| MEDDTL DGALN/DEB/GR0                | Participation au comité d'experts                  |
| MEDDTL DGALN/DEB/GR1                | Participation au comité d'experts                  |
| MEDDTL DGEC                         |                                                    |

<sup>24</sup> Autres sociétés consultées mais n'ayant pas souhaité participer : Burgeap, Sogreah, Groupe Sovema/Promafor, SANFOR

| <b>Organisme</b>   | <b>Contribution</b>                            |
|--------------------|------------------------------------------------|
| BRGM - Eau         | Entretien<br>Participation au comité d'experts |
| BRGM - SAR/SGR-AQI | Entretien                                      |
| BRGM - SAR/SGR-LOR | Entretien                                      |
| BRGM - SAR/SGR-LIM | Entretien                                      |
| BRGM - SAR/SGR-LRO | Entretien                                      |
| BRGM - SAR/SGR-LRO | Entretien                                      |
| BRGM - DPSM        | Entretien<br>Participation au comité d'experts |
| BRGM - GTH         | Entretien<br>Participation au comité d'experts |
| BRGM - EPI         | Participation au comité d'experts              |
| BRGM - RIS         | Entretien                                      |



Réf. : GTH/DMCG 180/11 SB/EO

Orléans, le 05/07/2011

| <b>COMPTE RENDU DE RÉUNION</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                              |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| Rédacteur : S. Bezelgues-Courtade                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Entité : GTH/DMCG            |
| Diffusion externe : Oui<br>Visa et nom du responsable : A. Desplan                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                              |
| Projet : Impacts potentiels de la géothermie très basse énergie sur le sous-sol et les eaux souterraines – Synthèse bibliographique                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Numéro : PSP11GTH32          |
| Objet : <ul style="list-style-type: none"> <li>- Présentation de l'avancement de la synthèse bibliographique et des consultations d'experts GTH réalisées par le BRGM</li> <li>- Discussion : avis des experts sur la hiérarchisation des impacts à retenir</li> <li>- Visite de la plate-forme expérimentale du BRGM dédiée à la géothermie très basse énergie et présentation des projets associés</li> </ul>                                                                                     |                              |
| Date : 04 Juillet 2011                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Lieu : BRGM, Orléans, J3-358 |
| Participants : cf. fiche de participation ci-jointe                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                              |
| Absents : S. Croguennec (MEDDTL/DGALN/DEB), C. Oeser (MEDDTL/DGEC), C. Boisavy (AFPG), N. De Varreux (AFPG - Augsburg Forages), E. Garroustet (SFE - COTRASOL), D. Chazal (Auvergne forages), G. Sancier (SANFOR), H. Galia (Archambault Conseils), S. Ferland (Archambault Conseils), O. Murzilli (Archambault Conseils), L. Pyot (Burgeap), S. Guedon-Dubied (IFSTTAR), E. NAULEAU (IFSTTAR), R. Vernier (BRGM- GTH), C. Maragna (BRGM – GTH), F. Garnier (BRGM- GTH), I. Ignatiadis (BRGM - EPI) |                              |
| Diffusion : Présents + absents                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                              |

| <b>RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>1 – Présentation de l'avancement du projet par le BRGM :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Présentation du comité d'experts et de ses représentants présents à la réunion</li> <li>- Bilan des impacts potentiels inventoriés pour chaque phase de la réalisation d'exploitation et d'abandon d'un forage d'eau et d'une sonde géothermique verticale.</li> <li>- Proposition de classification de ces impacts en : <ul style="list-style-type: none"> <li>o <b>peu sensible</b> : impact potentiel reconnu, mais jugé peu sensible car maîtrisable par la compétence et l'anticipation (donc la connaissance fine du contexte géologique et hydrogéologique) ou remédiation aisée possible ou affecte principalement la productivité de l'ouvrage et non le milieu</li> <li>o <b>sensible</b> : impact potentiel reconnu sur le milieu souterrain, éventuellement maîtrisable par la compétence et l'anticipation, mais remédiation difficile voire impossible</li> <li>o <b>très sensible</b> : impact potentiel reconnu sur le milieu souterrain, mais maîtrise, anticipation et/ou remédiation difficiles voire impossibles.</li> </ul> </li> </ul> |

IM 192 (22/07/09)

1/7

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Bilan de l'encadrement administratif actuel de la filière en France (Code minier/code de l'environnement/normes)</li> <li>- Bilan des impacts majeurs qui ressortent de la recherche bibliographique et des consultations d'experts réalisées.</li> <li>- Propositions de pistes de limitation de ces impacts :             <ul style="list-style-type: none"> <li>o contrôle du respect des prescriptions techniques pour la réalisation, l'exploitation et la maintenance des installations géothermiques</li> <li>o amélioration des moyens de « porté à connaissance » des maîtres d'ouvrages, BE et foreurs des contraintes géologiques, hydrogéologiques, d'exploitations existantes et réglementaires locales à prendre en compte pour l'analyse de la faisabilité d'un projet géothermique et son dimensionnement</li> <li>o développement d'outils d'aide au dimensionnement</li> <li>o évolution des contraintes au niveau de techniques de forage, de comblement, de dimensionnement, de conservation de l'information pour garantir des comblements efficaces et sans effet sur l'environnement aujourd'hui et dans le futur</li> <li>o Précautions lors de la phase chantier et étude préalable.</li> </ul> </li> </ul>                                                                                                                                                                                                                            |
| <p>2 – Bilan des points de l'étude bibliographique restant à compléter :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Inhibiteurs de corrosion, agents de développement, fluides caloporteurs : toxicité dans le milieu naturel</li> <li>- Ciments : vieillissement, comportement sous contraintes thermiques</li> <li>- Foration et présence de gaz (quels impacts possibles, quelles précautions)</li> <li>- Impacts thermiques, physico-chimiques et microbiologiques (pathogènes et impact sur la diversité bactérienne endogène aux aquifères)</li> <li>- Impacts biogéochimiques</li> <li>- Encadrement réglementaire : comparaison France /Europe</li> <li>- Points ajoutés par les membres du comité d'experts :             <ul style="list-style-type: none"> <li>o Incidence des variations thermiques des eaux souterraines liées aux exploitations GTH sur les écosystèmes associés (zones humides, réseau hydrographique en relation avec les eaux souterraines, ...)</li> <li>o Echangeurs à détente directe : fonctionnement, risques associés</li> <li>o Forages et biseau salé</li> <li>o Adjuvants utilisés en cours de foration</li> <li>o Impact des délais entre réalisation du forage et mise en service de l'exploitation</li> <li>o Impact des variations cycliques de température sur la faune microbienne</li> <li>o Biodégradabilité : à quoi correspond ce terme en contexte naturel ?</li> <li>o Qualité alimentaire : à quoi correspond ce terme ?</li> </ul> </li> </ul> |
| <p>3 – Le BRGM fait état de ses difficultés à rassembler des exemples (illustrés par des rapports techniques, articles, ...) de cas réels de pollutions d'aquifère et de désordres géotechniques résultants directement de la réalisation d'une installation géothermique ou de son exploitation ou de son abandon. Il est demandé aux membres du comité d'experts de lui faire part d'exemples illustrés susceptibles d'être intégrés au rapport du projet. Sont recherchés surtout des illustrations de :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- mise en relation d'aquifères par des forages ;</li> <li>- incidents géotechniques associés à des rabattements ou surcotes piézométriques</li> <li>- intrusions de pollutions dans un aquifère par migration depuis la surface le long de forages</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- pollution d'aquifère en phase chantier de foration (infiltration d'hydrocarbures, d'agents chimiques stockés sur le chantier, ...)</li> <li>- intrusion de pollution ou mise en relation d'aquifères en lien avec une corrosion d'équipements ou de la cimentation d'un forage</li> <li>- pollution d'aquifère par des adjuvants de foration</li> <li>- pollution d'aquifère par des agents de développement ou de désinfection</li> <li>- pollution d'aquifère par des fluides caloporteurs</li> <li>- pollution d'aquifère par des agents anti-corrosion</li> <li>- ennoisement d'aménagements souterrains en lien avec une injection non maîtrisée</li> <li>- défauts d'équipement en lien avec un contexte artésien et provoquant des mises en relation d'aquifères ou des pollutions d'aquifères</li> <li>- défauts d'équipement en lien avec un contexte d'aquifère discontinu (karst, aquifère fissuré) et provoquant des mises en relation d'aquifères ou des pollutions d'aquifères</li> <li>- dégradation de forage en relation avec un risque naturel (mouvement de terrain, inondation, ...)</li> <li>- pollution d'aquifère via un forage en contexte littoral (intrusion saline)</li> <li>- pollution thermique à l'échelle d'une installation (recyclage), de plusieurs installations GTH (conflit d'usage) et d'un aquifère</li> <li>- pollution physico-chimique ou bactériologique liée à une exploitation GTH et affectant la productivité d'un ouvrage GTH</li> <li>- pollution physico-chimique ou bactériologique liée à une exploitation GTH et affectant un aquifère ou une portion d'aquifère.</li> </ul> |
| <p style="text-align: center;"><b>3 – Hiérarchisation des impacts inventoriés : avis du comité d'experts</b></p> <p>La classification proposée des impacts inventoriés est trop intégratrice de concepts divers. Pour la suite de l'étude, une classification plus détaillée sera proposée. Elle distinguera : la probabilité d'occurrence des risques associés aux pratiques (aléa), une hiérarchisation des risques associés aux milieux (vulnérabilité) et l'impact potentiel résultant du croisement des aléas et des vulnérabilités.</p> <p>Une nouvelle classification sera proposée au comité d'experts dans le rapport intermédiaire (remise prévue fin août) pour avis.</p> <p>Elle sera complétée par la définition de moyens disponibles pour limiter la probabilité d'occurrence de l'aléa et remédier aux impacts.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| <p style="text-align: center;"><b>4 – Pistes de limitation des impacts : avis du comité d'expert</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Le comité est d'accord pour dire que la base de la limitation des impacts réside dans le respect des règles de l'art en matière de réalisation, d'équipement et d'exploitation des forages d'eau et de sondes géothermiques verticales et qu'il s'agit là d'un objectif à atteindre à la fois pour des projets de géothermie et pour les projets d'exploitation d'eau souterraines pour d'autres usages. Il précise cependant que des compléments devront être apportés aux « règles de l'art » actuellement en vigueur. Ex : ciments (nature et comportement au vieillissement, ...)</li> <li>- Que cet objectif nécessite :             <ul style="list-style-type: none"> <li>o la mise en place d'un dispositif de <b>contrôle</b> du bon dimensionnement des projets, du respect des prescriptions techniques en matière de réalisation d'ouvrages souterrains et du respect des prescriptions d'exploitation associées</li> <li>o la mise à disposition d'éléments de <b>connaissance</b> des contraintes environnementales à prendre en compte dans le dimensionnement des projets (cartes de vulnérabilité du sous-sol vis-à-vis de l'usage géothermique)</li> </ul> </li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>○ la mise à disposition d'éléments de <b>connaissance</b> des installations existantes à prendre en compte dans le dimensionnement des projets ; ce qui passe par le développement d'un outils d'<b>archivage</b> des données de dimensionnement et d'exploitation des opérations qui soit utilisable par les différents acteurs de la filière (administration chargées d'instruire les dossiers réglementaires, maître d'ouvrages, BE, foreurs) ;</li> <li>○ systématiser le <b>caractère obligatoire</b> des prescriptions techniques de la norme NF X 10-970 (/sondes géothermiques verticales) qui n'est obligatoire actuellement que dans le cas des marchés publics. Ce caractère obligatoire permettrait de limiter le rôle de la concurrence non maîtrisée (abaissement des coûts au détriment de la qualité) dans le contrôle du marché de la filière géothermie et d'améliorer ainsi la qualité des réalisations. Le service juridique du BRGM sera consulté quant à l'obligation du sachant (foreur, BE) de signaler l'existence des normes et prescriptions techniques aux maîtres d'ouvrage ;</li> <li>○ l'interdiction de réalisations d'opérations dans certains contextes.</li> </ul> <p>- Le comité d'expert signale une <b>évolution souhaitable des prescriptions techniques</b> de la norme NF X 10-970 (/sondes géothermiques verticales) :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Protection des têtes de sondes (prévoir une tête de sonde dans la norme (NF X10-970) au même titre que la norme sur les forages d'eau (NF X10-999) prévoit une tête de forage) et ainsi limiter les risques d'infiltration de polluants depuis la surface vers le milieu souterrain via les drains verticaux qu'elles constituent (et qui by-passent les sols au pouvoir autoépuration)</li> <li>○ Tranchées de liaison entre tête de forage et collecteur de sondes : la norme prévoit que ces tranchées soient pentues et que le collecteur soit situé en position haute par rapport à la tête de forage. Cette disposition fait de la sonde géothermique verticale l'exutoire des tranchées de liaison, donc, potentiellement, un point d'infiltration privilégié d'eaux de surface.</li> <li>○ Une question est soulevée sur la gestion à très long terme des ouvrages abandonnés : quels risques représentent-ils pour les milieux souterrains ? De quels moyens d'anticipation de ces risques dispose-t-on ? Cette question est valable pour tout type de forage et n'a pas de réponse actuellement.</li> </ul> |
| <p>5 – Etude du Ministère de la Santé en cours</p> <p>Une étude en cours sur les risques associés au développement de différentes installations de type « énergie renouvelable » à proximité de captages d'eau diligentée par le Ministère de la Santé est signalée.</p> <p>Après vérification, il s'agit d'une étude menée par l'ANSES intitulée « analyse des risques sanitaires liés à l'installation, à l'exploitation, à la maintenance et l'abandon de dispositifs d'exploitation d'énergies renouvelables (géothermie, capteurs solaires et éoliennes) dans les périmètres de protection des captages d'eau destinés à la consommation humaine ».</p> <p>Ce travail est achevé, en cours de publication et sera remis en septembre ; il sera consultable à partir de ce moment-là.</p> <p>L'ANSES est par ailleurs consultée dans le cadre de l'étude BRGM.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| <p>6 – Prochaine réunion du comité d'expert prévue en Septembre</p> <p>Une date sera prochainement proposée pour la tenue d'une réunion du comité d'expert en Septembre.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |

| Action                                                                                                                                     | Responsable                | Délai   | Soldé |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|---------|-------|
| Compléments sur les points de l'étude identifiés comme restants à compléter                                                                | S. Bezelgues-Courtade      | 26 août |       |
| Nouvelle classification des impacts                                                                                                        | S. Bezelgues-Courtade      | 26 août |       |
| Contacts au Ministère de la Santé susceptibles de fournir des informations sur l'étude en cours (Energies renouvelables et captages d'eau) | Membres du comité d'expert | Juillet |       |



## **Annexe 2**

# **Prévention des impacts en phase de conception d'une installation géothermique**



Lors de la conception d'une installation géothermique, une bonne prise en compte, des zones réglementaires, des particularités du milieu et un dimensionnement approprié de l'installation peuvent prévenir une partie des impacts potentiels d'une installation de géothermie. Ces travaux préliminaires doivent être réalisés par le foreur ou un bureau d'étude spécialisé le cas échéant.

## **CONTRAINTES ET ZONES REGLEMENTAIRES**

Avant la réalisation de tout forage, le Maître d'Ouvrage doit engager les démarches administratives en conformité avec la législation applicable en France :

- Vérification de l'existence d'ouvrages souterrains, aériens ou subaquatiques susceptibles d'être impactés par son projet par le biais d'une démarche auprès de la mairie, de demandes de renseignements (DR) à chacun des exploitants de ces ouvrages, d'une Déclaration d'Intention de Commencement de Travaux (DICT) et d'un repérage des réseaux (câbles électriques, conduites d'eau ou de gaz, etc.) avant l'engagement des travaux (décret n° 91-1147 du 14 octobre 1991).
- Obtention des autorisations administratives nécessaires et/ou réalisation des déclarations requises conformément au Code Minier (dans le cadre de la législation actuelle, les ouvrages de géothermie très basse énergie ne sont souvent concernés que par la déclaration).
- Vérification du respect de la réglementation relative aux périmètres de protection des captages d'eau. En effet, tout forage est interdit dans les périmètres de protection immédiate (article L.1321-2 du code de la santé publique). Dans les périmètres de protection rapprochée, il convient de se référer à l'acte portant déclaration d'utilité publique instaurant les périmètres de protection du captage pour savoir si ceux-ci sont autorisés ou pas.
- Vérification de la compatibilité du projet vis-à-vis des plans de prévention des risques naturels et des règlements d'urbanisme.
- Vérification de la compatibilité du projet avec les règlements associés aux zones de protection des milieux naturels (contraintes à la réalisation de forages ou interdiction).

Le Maître d'Ouvrage peut en outre se rapprocher du service en charge de la Police de l'Eau (Direction Départementale des Territoires), ou du service qui gère les installations classées (Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement), pour connaître les démarches à entreprendre. Les services de la préfecture peuvent utilement être consultés pour préciser le service compétent.

Il serait néanmoins utile que les foreurs et les bureaux d'études disposent d'un moyen simple d'accès à ces informations. De plus, il est actuellement constaté que nombre d'opérations de petites envergure ne sont pas déclarées, prévenant par là même un contrôle efficace de l'évolution du nombre et de la localisation des installations de géothermie très basse température et ne permettant pas de maintenir la mémoire de leur existence.

## ZONES A RISQUES

Certaines zones présentent des risques propres qui peuvent amener à prendre des précautions particulières ou à utiliser des techniques spécifiques lors du forage ou de l'exploitation. Dans certains cas, le surcout induit par ces mesures ou les difficultés à les mettre en œuvre peut amener à l'abandon de l'opération.

Concernant les techniques de forages utilisés il s'agit de prêter une attention particulière dans les cas où il existe un risque d'impact significatif lors de la foration :

- Le forage traverse deux aquifères superposés et où il faut prévenir le risque de mise en communication.
- Le forage traverse un aquifère artésien.
- Le forage traverse une formation de minéraux anhydres, salifères ou d'argiles gonflantes.
- Le forage traverse un sol pollué.
- Il y a des risques de rencontrer une poche de gaz.

Il est à noter que concernant ces cas, les techniques utilisées pour la mise en place des sondes géothermiques verticales ne permettent pas de garantir une bonne prévention de ces risques. Il pourrait être judicieux de faire évoluer la réglementation en vigueur de manière à se prémunir contre la réalisation de forages de ce type dans les secteurs où ces risques ont été identifiés.

Certains cas induisent des risques sur la réussite du forage :

- Zone fracturé.
- Roche non consolidées.

Enfin, certains milieux nécessitent l'emploi de matériaux adaptés pour éviter un vieillissement prématuré qui impacterait non seulement la durée de vie de l'installation mais aussi son rôle de protection contre les impacts potentiels :

- Environnement marin.
- Eau acide.
- Présence de H<sub>2</sub>S.
- Zone de battement de la nappe.
- Sols riche en sulfate.

Les possibilités d'accès à la connaissance de ces zones varient considérablement selon les endroits. De ce fait, à l'heure actuelle, si dans le cas d'une opération d'envergure suffisante impliquant un bureau d'étude ces risques ont de grandes chances d'être identifiés, dans le cas d'une opération plus modeste, un foreur ne disposant pas d'une expérience suffisante de la région concerné est susceptible de ne pas les prendre en compte.

Il semble nécessaire de mettre en place un outil permettant de mettre à disposition les données connues sur la localisation de ces zones et de mettre en œuvre leur cartographie lorsque celle-ci n'a pas encore été effectuée.

## **DIMENSIONNEMENT**

A partir des besoins déterminés en chaud ou en froid et des caractéristiques de la ressource, le foreur ou le bureau d'étude définit :

- La longueur de sonde nécessaire en fonction du type de terrain et si besoin, le nombre de sondes nécessaires si une seule ne peut suffire (dans le cas d'installation pour le collectif et le tertiaire). L'outil de base pour ce dimensionnement est le test de réponse thermique (TRT), réalisé in situ. Les résultats de ce test permettent de définir les paramètres d'exploitation à respecter au cours de la vie de l'installation.
- Le débit de pompage et les températures de rejet dans le cas d'une installation sur nappe à partir de tests hydrauliques réalisés in situ.

Le dimensionnement est primordial :

- Pour assurer un fonctionnement optimal de l'installation ; c'est-à-dire un fonctionnement qui permette de répondre au besoin énergétique dans de bonnes conditions de performance (COP de la pompe à chaleur) tout en étant compatible avec les ressources disponibles et les usages préexistants (forages d'eau et SGV voisins).
- Pour éviter les impacts indésirables comme des cycles de gel/dégel des sols autour d'une SGV, des recyclages thermiques entre forages d'une installation sur nappe ou avec des forages voisins, des variations piézométriques trop importantes au regard des installations souterraines existantes.

De manière à ce qu'une évolution ultérieure des installations de surface (pompes hydrauliques, pompes à chaleur, régime d'utilisation) puisse avoir lieu sans conséquence dommageable, les puissances et débits maximum ainsi que les régimes d'exploitation prévus doivent être conservés par le maître d'ouvrage. Il n'existe actuellement pas de règlement ou de norme fixant les modifications possibles des installations de surface.



## **Annexe 3**

### **Note Technique, Produits adjuvants utilisés en forage**





**Juillet 2011**

## **NOTE TECHNIQUE**

### **PRODUITS ADJUVANTS UTILISES EN FORAGE**

Ce document fournit une liste des principaux produits adjuvants pouvant être utilisés dans les forages. Pour chaque classe de produit il est précisé les usages et les impacts attendus sur le forage lui-même et sur son environnement.

Compte tenu du très grand nombre de produits utilisés, cette liste ne cherche pas à être exhaustive mais à faire apparaître les produits les plus couramment présents sur les chantiers de forage d'eau ou de géothermie.

Il n'est volontairement pas fait mention des dénominations commerciales.

## 1. Matériel de forage

Certains produits sont introduits indirectement ou de façon fortuite dans le forage ou dans les fluides de forage :

- par percolation depuis la surface, de façon plus ou moins accidentelle.
- par l'intermédiaire du matériel de foration.
- par le biais des équipements descendus dans le forage.

| Produits                           | Usages                                                                                      | Commentaires                                                                                                                                                                                                                                    |
|------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Graisses                           | Sur filetages des trains de tiges et des tubages                                            | Vérifier la composition des graisses utilisées. Certaines graisses peuvent avoir une forte teneur en métaux lourds : Pb, Cr, Zn, Cu, Mo, graphite ...                                                                                           |
| Huiles moteur<br>Lubrifiants       | Moteur, pompe                                                                               | Fuites possibles ou probables du matériel de surface.                                                                                                                                                                                           |
| Carburants (gaz-oil, FOD, essence) | Moteur, pompe, énergie                                                                      | Prévoir des réservoirs avec bac de rétention ou des citernes double-parois.<br><br>Poser des bâches étanches de récupération sous le matériel sensible.                                                                                         |
| Huiles hydrauliques                | Moteur hydraulique, tête rotative et matériel annexe                                        | Omniprésente sur les machines hydrauliques ou sur les éléments de machine (tête rotative).<br><br>Fuites fréquentes.<br><br>Protection de la plateforme au moyen de bâches étanches, ou récupération sur dalle béton par caniveau périphérique. |
| Dispersants, absorbants            | Produits utilisés pour traiter, récupérer et absorber les fuites d'hydrocarbures en surface | Produits absorbants généralement inertes.<br><br>Des produits chimiques de dégradation peuvent également être utilisés.                                                                                                                         |
| Coating                            | Revêtement protégeant les tubages neufs pendant le stockage                                 | Souvent à base de bitume ou de résine.<br><br>Composition variable selon fabricant.                                                                                                                                                             |

**Remarques et recommandations :**

- Quelques précautions prises en surface au niveau de la plateforme de forage (bâches, bacs de rétention) doivent permettre, sauf accident majeur, de récupérer la quasi-totalité des fuites sur le matériel et éviter que des hydrocarbures puissent pénétrer dans le sol ou à l'intérieur des forages.
- En ce qui concerne les graisses utilisées pour le matériel de forage, il faut s'assurer qu'elles soient autant que possible biodégradables, qu'elles ne comportent pas de métaux lourds et qu'elles soient utilisées avec modération.

**2. Produits boue**

De très nombreux adjuvants sont utilisés pour la fabrication, le contrôle et le traitement des boues de forage. On ne retiendra que les produits les plus couramment et largement utilisés.

Les boues spécifiques de complétion (saumures, biopolymères) ou de remplissage d'annulaire (tels le Kenpack et les saumures passivées) ne sont pas abordées de manière directe.

On trouvera ci-dessous la liste de quelques fournisseurs ou fabricants (groupes du domaine pétrolier). L'actualisation des groupes n'est pas toujours assurée compte tenu des évolutions permanentes.

- Magcobar (groupe MI – Drilling Fluids)
- Baroid (groupe Halliburton)
- IMC – IMCO (groupe MI – Drillings Fluids)
- Milchem (groupe Baker International)
- CECA (France)
- SFG
- IMC
- International Drilling Fluids (Canada)
- Progil – Foraf fluid
- Dowell (groupe Schlumberger)
- Schlumberger Drilling Fluids
- Pechiney Saint-Gobain

énergie – Synthèse bibliographique

- Progil
- Solvay

Dans le domaine du forage d'eau, de nombreux fournisseurs indépendants existent au niveau national ou régional, dont certains proposent leurs propres produits ou dérivés de produits sous des dénominations variées. Ces fournisseurs proposent très souvent des produits « prêts à l'emploi », faciles à mettre en œuvre, mais dont la formulation exacte n'est pas toujours connue.

| Produits          | Usages                                                                                | Commentaires                                                                                                                                                                                                              |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Fluides de base   | Servent de support à la fabrication des boues de forage                               | Eau douce<br>Saumures (sel, mer)<br>Forage à l'air.<br>Boue à l'huile.<br>Boue inverse et boue émulsionnée (mélange huile-eau).<br>Nota : les boues à base d'huiles ne sont en principe jamais utilisées en forage d'eau. |
| Colloïdes         | Déterminent les caractéristiques de la boue aqueuse                                   | Argileux : bentonite, attapulgite.<br>Organique : amidon, CMC.                                                                                                                                                            |
| Polymères         | Viennent en complément ou en remplacement des colloïdes et des viscosifiants          | Polymères dégradables (biopolymères).<br>Polyacrylates (polymères résistants aux températures).                                                                                                                           |
| Additifs minéraux | Principaux additifs minéraux permettant de contrôler les caractéristiques de la boue. | Soude caustique<br>Carbonate de soude<br>Bicarbonate de soude<br>Chaux éteinte                                                                                                                                            |

|                              |                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                              |                                                                                           | Sel<br>Gypse                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Densifiants                  | Permettent d'alourdir la boue (saumure, carbonate de calcium, baryte)                     | Saumures (NaCl le plus souvent) : facile à utiliser et à doser.<br><br>Carbonates de calcium : plus ou moins acidifiables selon les impuretés.<br><br>Baryte : produit colmatant et non éliminable à exclure des forages d'eau sauf cas particulier spécifique. Ce produit est toutefois chimiquement inerte (mais peut être très légèrement radioactif). |
| Viscosifiants                | Charge minérale (argiles) ou polymères fournissant la base visqueuse du fluide de forage. | Les polymères sont généralement dégradables -> ce qui induit un développement bactérien inévitable.<br><br>Certains polymères dits « dégradables » ne le sont que partiellement et laissent des résidus parfois polluants.                                                                                                                                |
| Stabilisants                 | Permettent le contrôle des formations argileuses.                                         | Phosphates                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| pH                           | Contrôle le pH de la boue.                                                                | Soude caustique, acide, chaux                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Fluidifiants et défloculants | Contrôle des caractéristiques rhéologiques du fluide                                      | Polyphosphates de sodium<br><br>Tanin, lignosulfonates (FLC) et lignines (LC).<br><br>Tourbes, acides humiques, lignites<br><br>Nota : les lignines chromées et les lignosulfonates ferrochromés sont particulièrement polluants                                                                                                                          |
| Déviscosifiants              | Dégradation des polymères                                                                 | Acide, ferment                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Réducteurs de filtrat        | Servent à contrôler le filtrat                                                            | Carboxyméthylcellulose (CMC)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |

énergie – Synthèse bibliographique

|                       |                                                                   |                                                                       |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
|                       |                                                                   | Amidon<br>Certains polymères polyanioniques                           |
| Inhibiteurs d'argiles | Contrôle des réactions entre boue et formations argileuses        | Chaux, gypse, KCl, tanin                                              |
| Anti-ferments         | Utilisés avec les polymères pour retarder leur dégradation        | Certains dérivés phénoliques                                          |
| Anti-mousses          | Permettent un meilleur dégazage de la boue                        | Stéarate d'alumine<br>Alcools supérieurs<br>Tensio-actifs             |
| Floculants            | Séparation des argiles et de l'eau pour le traitement des résidus | Gomme de guar (+ anti-ferments)<br>Composés cationiques ou anioniques |
| Dispersants           | Maintiennent les particules colloïdales en suspension             | Lignosulfonates de ferrocrome                                         |

**Remarques et recommandations :**

- Depuis quelques années, la tendance des fournisseurs est de proposer des produits « prêt à l'emploi ». Il est ainsi souvent difficile de connaître la formulation exacte de certains produits, tenue plus ou moins « secrète » par les fabricants. Ces derniers ne fournissent souvent qu'un nom générique ou une liste très incomplète des multiples composants.
- Pour les forages d'eau et de géothermie, il est impératif de s'assurer que les produits utilisés aient un impact minimal, que ce soit pour l'environnement du chantier (stockage), pour le puits et les nappes (fluides de foration) et à l'issue des travaux (traitement et évacuation des effluents et des résidus de boue).
- L'usage des polymères biodégradables est à favoriser. Mais ces polymères peuvent induire des développements bactériens qu'il faudra prévoir de contrôler par des traitements appropriés. On s'assurera également du caractère réel des biodégradabilités annoncées par les fabricants et de la composition des éléments résiduels de cette dégradation.
- On notera enfin qu'en cas de pertes de circulation, d'importantes quantités de fluides peuvent être injectées dans les formations ou les aquifères .... Fluides qui peuvent s'avérer par la suite difficile à éliminer. Dans le cas de polymères, une prolifération bactérienne peut en résulter.

### 3. Forage à l'air

Le forage à l'air, le plus souvent exécuté au MFT (Marteau Fond de Trou), est généralement considéré comme peu polluant. Il est vrai que l'on trouve relativement peu de produits adjuvants dans les forages réalisés à l'air. On notera toutefois trois classes de produits couramment utilisés, dont certains sont rarement mentionnés dans les rapports.

| Produits           | Usages                                                                                      | Commentaires                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Produits moussants | Permettent de mieux émulsionner le mélange air/eau.<br><br>Facilite la remontée des déblais | Généralement un surfactant anionique +/- dégradable<br><br>Il est important de vérifier le niveau de dégradabilité des produits utilisés.<br><br>Un peu de chaux est parfois rajoutée pour contrôler le pH ainsi qu'un inhibiteur de corrosion pour protéger la garniture de forage. |
| Lubrifiants        | Lubrification imposée pour un bon fonctionnement du MFT et limiter son usure.               | Utilisation systématique bien que rarement indiquée dans les rapports.<br><br>Il faut s'assurer du niveau de dégradabilité et de l'absence de nocivité des lubrifiants injectés dans le train de tiges.                                                                              |
| Tensio-actifs      | Permettent la destruction de la mousse                                                      | Rarement utilisés dans les forages d'eau.                                                                                                                                                                                                                                            |

Remarques et recommandations :

- Une attention particulière sera apportée à la qualité des lubrifiants utilisés avec les MFT.
- La même attention sera apportée dans le cas d'usage de produits moussants (mousse, tensio-actifs).
- Les recommandations faites au § 1 sont également totalement applicables.

**4. Adjuvants ciment**

Comme pour la boue, il existe de très nombreux adjuvants pour les laitiers de ciment. On ne retiendra que les plus usuels.

| Produits                 | Usages                                                                                                  | Commentaires                                                                                                                                                      |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Densité                  | Produits pour alléger ou alourdir un laitier                                                            | Air, pouzzolane, perlite, sable, baryte.                                                                                                                          |
| Contrôle de la rhéologie | Fluidifiants, gélifiants, contrôle de filtration                                                        | Nombreux produits.                                                                                                                                                |
| Accélérateurs de prise   | Permettent une prise plus rapide                                                                        | Les accélérateurs de prise à base de Chlorure de Calcium sont à proscrire (corrosif).                                                                             |
| Retardateurs de prise    | Permettent de retarder la prise du ciment                                                               | Du gypse peut être utilisé comme retardateur de prise                                                                                                             |
| Tensio-actifs            | Anti-moussants                                                                                          | Limite les excès de mousse à la fabrication des laitiers                                                                                                          |
| Spacers                  | Bouchon visqueux utilisé pour séparer le laitier de la boue pendant l'injection et nettoyer l'annulaire | Volume généralement faible, mais peut contenir de nombreux produits +/- polluants.<br><br>Chaque opérateur dispose d'une « recette » combinant différents effets. |

|                        |                                                           |                                                                                                               |
|------------------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Conductivité thermique | Produits favorisant la conductivité thermique des ciments | Certains métaux sont inclus en quantité variable dans les laitiers pré-préparés (Cu en particulier, graphite) |
|------------------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

**Remarques et recommandations :**

- De la même manière que pour les produits constituant les boues, la tendance des fournisseurs est de proposer des ciments « prêt à l'emploi ». De ce fait il est souvent difficile de connaître la composition exacte de certains produits, tenue « secrète » par les fabricants. Ces derniers ne fournissent souvent qu'un nom générique ou une liste très incomplète des multiples composants.
- Pour les forages d'eau et de géothermie, il est impératif de s'assurer que les produits utilisés aient un impact minimal, ce soit pour l'environnement du chantier (stockage des produits), pour le puits lui-même ou pour les nappes qui seront en contact avec le ciment.

**5. Adjuvants pour interventions spécifiques ou instrumentation**

Les produits suivants sont assez fréquemment utilisés en cas d'incident de forage.

| Produits                           | Usages                                            | Commentaires                                                           |
|------------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| Lubrifiants (fuel, huile, pétrole) | Utilisés pour décoincer un train de tiges         | Hydrocarbures<br>Tensio-actif cationiques                              |
| Alourdissants                      | Contrôle de la densité et des risques d'éruptions | Saumure<br>Carbonate de calcium<br>Baryte<br>Galène (sulfure de plomb) |
| Colmatants                         | Contrôle des pertes                               | Colmatants granulaires (coquilles, graines)                            |

énergie – Synthèse bibliographique

|               |                                    |                                                                                                                                                               |
|---------------|------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|               |                                    | Colmatants fibreux (déchets de bois)<br>Colmatants lamellaires (cellophane, micas)<br>Colmatant gonflants (gomme)<br>Colmatant « à prise » (ciments, résines) |
| Viscosifiants | Pertes                             | Polymères<br>Gomme guar                                                                                                                                       |
| Acidifiants   | Décoincement en terrains calcaires | HCl plus ou moins passivé                                                                                                                                     |

**Remarques et recommandations :**

- Quand elles surviennent, les instrumentations peuvent facilement conduire les opérateurs à mettre de côté les consignes environnementales et à utiliser sans discernement des produits fortement polluants (hydrocarbures par exemple).
- D'autres part les opérateurs ont tendance à ne pas fournir le détail des opérations d'instrumentation dans les rapports d'exécution. L'usage de produits (plus ou moins) toxiques peut de ce fait ne pas apparaître directement à la seule lecture des documents remis par le foreur en fin de travaux.

**6. Stimulation et développement des puits**

Trois gammes de produits sont utilisées pour le développement des ouvrages d'eau :

- Pour détruire les résidus de polymères.
- Pour développer les réservoirs calcaires : injection d'acides.
- Pour nettoyer les réservoirs sablo-argileux : traitement aux polyphosphates.

| Produits      | Usages                     | Commentaires         |
|---------------|----------------------------|----------------------|
| Acidification | Acidification du réservoir | Acide chlorhydrique. |

|                         |                           |                                                                                                                     |
|-------------------------|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                         |                           | Des passivants sont souvent incorporés dans les bouchons acides pour protéger les pompes et le matériel d'injection |
| Floculation des argiles | Contrôle des argiles      | Polyphosphates                                                                                                      |
| Activation              | Destruction des polymères | Acide.<br>Eau oxygénée                                                                                              |

**Remarques et recommandations :**

- La destruction des polymères (biopolymères ou polymères dits réversibles) doit s'accompagner d'une désinfection du puits pour détruire les bactéries introduites pendant la foration.
- On portera attention aux types de passivants éventuellement utilisés.
- Enfin on notera que l'usage de produits chlorés ou de l'eau oxygénée doit s'accompagner de précautions particulières (forte toxicité, effet corrosif important).

**7. Produit désinfectant et anti-corrosion**

Les produits désinfectants et anti-corrosion sont principalement utilisés pour protéger le matériel pendant les travaux de forage ou pendant son exploitation.

La désinfection d'un ouvrage de captage d'eau devrait être considérée comme une opération à imposer en fin de travaux.

| Produits      | Usages                 | Commentaires               |
|---------------|------------------------|----------------------------|
| Désinfectants | Désinfection du forage | Chlore et produits chlorés |

énergie – Synthèse bibliographique

|                |                                                                                             |                                                                                      |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|                |                                                                                             | Bactéricides<br><br>Attention : les produits chlorés sont particulièrement corrosifs |
| Anti-corrosion | Utilisé en cours de forage pour protéger le matériel ou pendant l'exploitation de l'ouvrage | Chromate de soude<br>Bichromate de potassium<br>Dérivés d'amines grasses             |
| Anti-ferments  | Protection des boues fermenticibles (gommes et polymères dégradables)                       | Dérivés phénoliques                                                                  |

**Remarques et recommandations :**

- On portera attention aux choix des produits anti-corrosion. Il en existe une grande variété dont certains sont très fortement toxiques.
- Enfin on notera également ici que l'usage des produits chlorés doit s'accompagner de précautions particulières (forte toxicité, effet corrosif important).

-----

**Documentation :**

- Voir en particulier le « Manuel pratique des fluides de forage » (aux éditions Technip)

-----

Suite annexe 1 si nécessaire. Si pas nécessaire, supprimer cette page sans supprimer le « saut de section (page impaire) » qui doit alors se retrouver sur la page précédente. Pour cela, effacer les « retours-marges », jusqu'à positionner le « saut de section page impaire » en page précédente.



**Centre scientifique et technique  
GTH**

3, avenue Claude-Guillemin  
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34