



Prévenir les désordres,
améliorer la qualité
de la construction

PÔLE
PRÉVENTION
PRODUITS MIS
EN ŒUVRE



INSTALLATIONS GÉOTHERMIQUES BASSE TEMPÉRATURE : POINTS DE VIGILANCE



LIBERTÉ • ÉGALITÉ • FRATERNITÉ
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

MINISTÈRE
DE L'ENVIRONNEMENT,
DE L'ÉNERGIE
ET DE LA MER

MINISTÈRE
DU LOGEMENT
ET DE L'HABITAT
DURABLE

Ce document a été réalisé par monsieur
Guillaume Gautier du réseau



| | | | |
|---|-----------|---|-----------|
| I. AVANT-PROPOS | 4 | Désordres des corbeilles géothermiques | 16 |
| II. GÉOTHERMIE, RÉGLEMENTATION ET PÉRIMÈTRE DU RAPPORT | 5 | Désordres des PAC sol/ | 16 |
| | | Désordres des PAC eau/ | 16 |
| | | Désordres des puits climatiques | 17 |
| II. 1 Géothermie et réglementation : le nouveau régime | 5 | III. 4 Principes réparatoires et coûts | 17 |
| Géothermie de basse ou haute température | 5 | Introduction | 17 |
| Géothermie de minime importance | 5 | Départ de feu d'une PAC | 17 |
| Zones réglementaires | 7 | Défaillance de la PAC | 17 |
| Régime déclaratif | 8 | Fuite sur circuit de captage horizontal à eau glycolée | 17 |
| Désignation d'un expert agréé | 9 | Fuite sur circuit de captage vertical à eau glycolée | 18 |
| Synthèse des régimes déclaratifs | 10 | Fuite de fluide frigorigène sur capteur horizontal | 18 |
| Entreprises de forage | 10 | Canalisations non étanches / puits climatique | 18 |
| Exigences techniques réglementaires | 10 | Encrassement et corrosion des équipements / PAC eau/eau | 18 |
| | | Mauvais dimensionnement de l'installation | 18 |
| II. 2 Pompes à chaleur géothermiques | 11 | Mauvaise réalisation du forage | 19 |
| PAC géothermiques | 11 | | |
| Définitions | 11 | III. 5 Focus sur les PAC | 19 |
| Poids de la géothermie dans la filière PAC | 11 | Problématique | 19 |
| | | Certifications NF PAC | 19 |
| II.3 Périmètre du rapport | 12 | Commentaires | 20 |
| Sources d'analyse | 12 | | |
| Périmètre du rapport | 12 | III.6 Focus sur les risques majeurs | 21 |
| | | Introduction | 21 |
| III. ANALYSE DES RAPPORTS D'EXPERTISE | 13 | Exemples de sinistres | 21 |
| III. 1 Introduction | 13 | Staufen-en-Brigau | 21 |
| Éléments d'analyse | 13 | Plusieurs sinistres dans le Bade-Wurtemberg | 22 |
| Commentaires | 13 | Un sinistre en Alsace | 22 |
| Répartition par type de bâtiment | 13 | Autres sinistres en France | 23 |
| Classement par année d'expertise | 13 | Remédiation | 23 |
| Répartition des rapports par année après la DOC | 13 | Cartographie des risques majeurs | 23 |
| III. 2 Typologie d'installations | 14 | Techniques de foration | 24 |
| Installations | 14 | Abandon de forage | 25 |
| Typologie de bâtiments | 14 | Commentaires | 25 |
| Localisation des désordres | 14 | | |
| III. 3 Typologie de désordres et causes principales | 14 | IV. ÉLÉMENTS DE MAÎTRISE DES RISQUES | 26 |
| Désordres des PAC eau glycolée | 14 | V. CONCLUSION | 27 |
| Répartition | 14 | VI. RÉFÉRENCES | 28 |
| Désordres des installations à capteur horizontal | 14 | VII. LISTE DES FIGURES | 29 |
| Désordres des installations à capteur vertical | 15 | VIII. LISTE DES TABLEAUX | 30 |

AVANT-PROPOS

La géothermie est une des alternatives aux moyens de production de chaleur à partir de ressources fossiles. Elle représente un potentiel quasi-inépuisable, disponible en toute saison et en tout lieu.

Ce document traite exclusivement de la géothermie basse température, et vise à synthétiser les éléments de pathologie récoltés au travers de rapports d'expertise.

Les rapports collectés proviennent du Dispositif Alerte géré par l'AQC, ainsi que de la bibliothèque de rapports d'expertise du GIE Socabat.

La première partie du document traite de la récente réforme de la géothermie de minime importance ainsi que du périmètre du rapport.

Dans une deuxième partie sont détaillés les enseignements issus de l'analyse des rapports d'expertise collectés. Deux focus sont faits sur les pompes à chaleur et sur les risques majeurs de la géothermie.

Enfin, des éléments de maîtrise des risques sont proposés par rapport à la pathologie observée.

I. GÉOTHERMIE, RÉGLEMENTATION ET PÉRIMÈTRE DU RAPPORT

I.1 Géothermie et réglementation : le nouveau régime

Géothermie de basse ou haute température

Dans le code minier, on distingue deux types de géothermie à partir de la température de prélèvement de chaleur dans le sous-sol (art L112-2 code minier) :

- La géothermie de haute température : la température d'exploitation des eaux de géothermie dépasse 150 °C. En général, ce type de géothermie concerne les centrales de génération d'électricité (comme Soultz Sous Forêt, Bouillante). L'ordre de grandeur des forages pour ce type d'installation est de 1 500 à 4 000 m.
- La géothermie de basse température : la température d'exploitation des eaux de géothermie est inférieure à 150 °C. Les forages correspondants ont une profondeur inférieure à 1 000 m. Souvent, les températures de prélèvement sont de l'ordre de 70 à 80 °C, alimentant des réseaux de chaleur (comme par exemple dans le Val de Marne). La géothermie de basse température de minime importance fait partie de cette catégorie.

Géothermie de minime importance

Le décret du 8 janvier 2015 modifie la définition de la géothermie de minime importance (introduite par le décret n° 78-498 du 28/03/1978). Elle a pour objet d'alimenter en chauffage des bâtiments (maisons individuelles, collectifs, tertiaires).

Les températures sont beaucoup plus faibles, autour de 20 °C à 30 °C, et les profondeurs de forage sont inférieures à 200 m. Les faibles températures imposent l'utilisation d'une pompe à chaleur (PAC) pour permettre une restitution de chaleur suffisante. C'est pourquoi il est parfois évoqué le terme de géothermie assistée par pompe à chaleur, ou de pompe à chaleur géothermique, qualifiant ainsi l'ensemble de l'installation (de la source de chaleur à l'émission de chaleur à l'intérieur de l'ouvrage).

Pour alimenter les PAC en énergie du sous-sol, il est nécessaire d'avoir une circulation de fluide de la source de chaleur (sol, eau de nappe) vers la PAC. On distingue alors deux types d'échanges : l'un qui nécessite de faire circuler en boucle fermée un fluide caloporteur entre le sous-sol

et la PAC (échangeur fermé) ; l'autre qui nécessite de faire circuler en boucle ouverte l'eau de nappe prélevée vers la PAC avant de la réinjecter (échangeur ouvert).

- Parmi les échangeurs fermés, le capteur peut être horizontal, vertical, intégré dans les structures des ouvrages, ou de type corbeille.

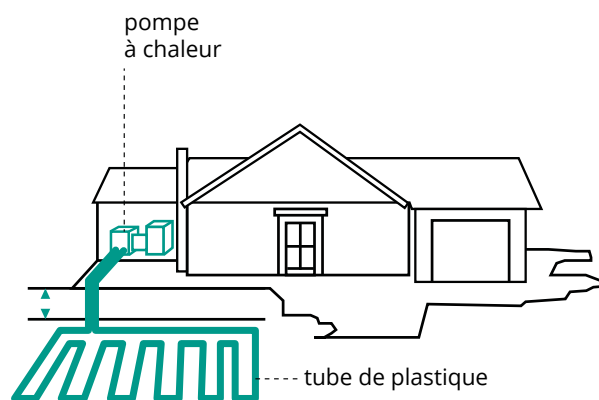


Figure 1 : échangeur fermé, capteur horizontal

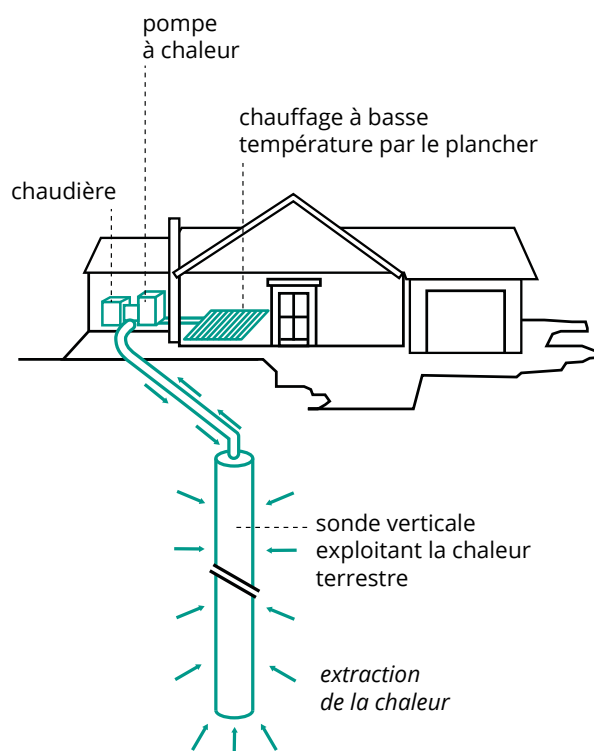


Figure 2 : échangeur fermé, sonde géothermique verticale

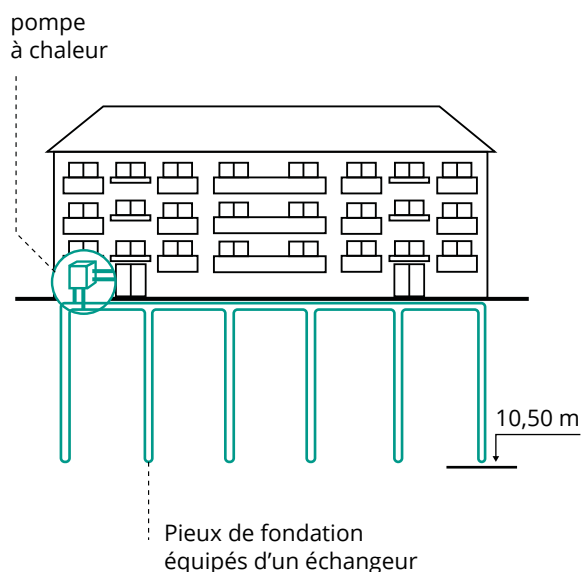


Figure 3 : échangeur fermé, fondation thermoactive (circulation dans les pieux, radier, parois moulées)

- Parmi les échangeurs ouverts, on distinguera le prélèvement sur eau de nappe du puits climatique (ou puits provençal ou puits canadien).

Certaines installations de géothermie ne relèvent pas du code minier, comme celles dont la profondeur d'exploitation est inférieure à 10 m. C'est pourquoi les installations suivantes sont exclues de la géothermie de minime importance :

- les puits climatiques, canadiens ou provençaux (termes synonymes) ;
- les géostructures thermiques ;
- les échangeurs géothermiques fermés d'une profondeur inférieure à 10 mètres, à savoir les capteurs enterrés horizontaux ;
- les échangeurs géothermiques ouverts dont au moins un échangeur fonctionne en circuit ouvert et dont aucun des ouvrages de prélèvement ou de réinjection ne dépassant pas la profondeur de 10 mètres.

Donc la géothermie de minime importance concerne les installations dont les échangeurs sont fermés et ouverts, avec les conditions suivantes :

- Échangeurs fermés : sondes géothermiques verticales
 - profondeur du forage inférieure à 200 m ;
 - puissance calorifique prélevée dans le sous-sol : 500 kW.
- Échangeurs ouverts :
 - la température de l'eau prélevée en sortie des ouvrages est inférieure à 25 °C ;
 - la profondeur du forage est inférieure à 200 mètres ;
 - la puissance thermique maximale prélevée du sous-sol et utilisée pour l'ensemble de l'installation est inférieure à 500 kW ;
 - les eaux prélevées sont réinjectées dans le même aquifère et la différence entre les volumes d'eaux prélevés et réinjectés est nulle ;
 - les débits prélevés ou réinjectés sont inférieurs à 80 m³/h.



Figure 4 : échangeur fermé, corbeille géothermique ©AQOC

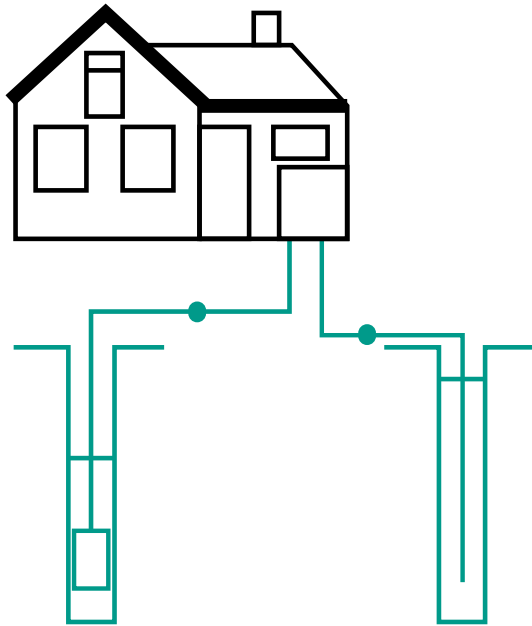


Figure 5 : échangeur ouvert, prélèvement sur aquifère

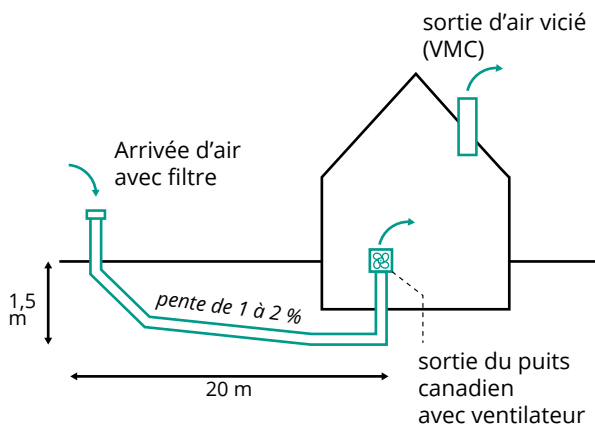


Figure 6 : échangeur ouvert, prélèvement d'air extérieur

La figure suivante résume les différents types d'installation de géothermie en fonction de la température de prélèvement :

| | |
|---|--|
| <p>GÉOTHERMIE BASSE TEMPÉRATURE</p> <p>Autorisation de recherches Permis d'exploitation</p> <p>< 150 °C</p> | <p><i>Activités de moins de 10 m de profondeur, en partie exclues du code minier</i></p> <p>GÉOTHERMIE DE MINIME TEMPÉRATURE</p> <p>Régime déclaratif spécifique</p> <p>< 200 m et < 500 kW et < 25 °C</p> |
| <p>> 150 °C GÉOTHERMIE HAUTE TEMPÉRATURE</p> <p>Permis exclusif de recherches - Concession d'exploitation - AOTM*</p> <p>Soultz (Alsace) : 200 °C en fond de puits à 5000 m de profondeur et 180 °C en tête de puits. Bouillante (Guadeloupe) : 250 °C en fond de puits à 1000 m de profondeur et 220 °C en tête de puits</p> | |

* autorisation d'ouverture de travaux minier : étude d'impact, enquête publique

Figure 7 : géothermie de haute température, basse température, et basse température de minime importance (source : <http://sigesbre.brgm.fr>)

Zones réglementaires

Une cartographie a été mise en place par le BRGM et accessible sur le site : <http://www.geothermie-perspectives.fr/>

Cette cartographie définit trois zones : vert, orange et rouge. Ces zones ont été déterminées par rapport aux phénomènes redoutés suivants :

- Affaissement/surrection lié aux niveaux évaporitiques.
- Affaissement/effondrement lié aux cavités (hors mines).
- Affaissement/effondrement liés aux cavités minières.
- Mouvements de terrain (ou glissements de terrain).
- Pollution des sols et des nappes d'eau souterraines.
- Phénomène d'artésianisme.
- Mise en communication d'aquifères.
- Remontée de nappe.
- Biseau salé.

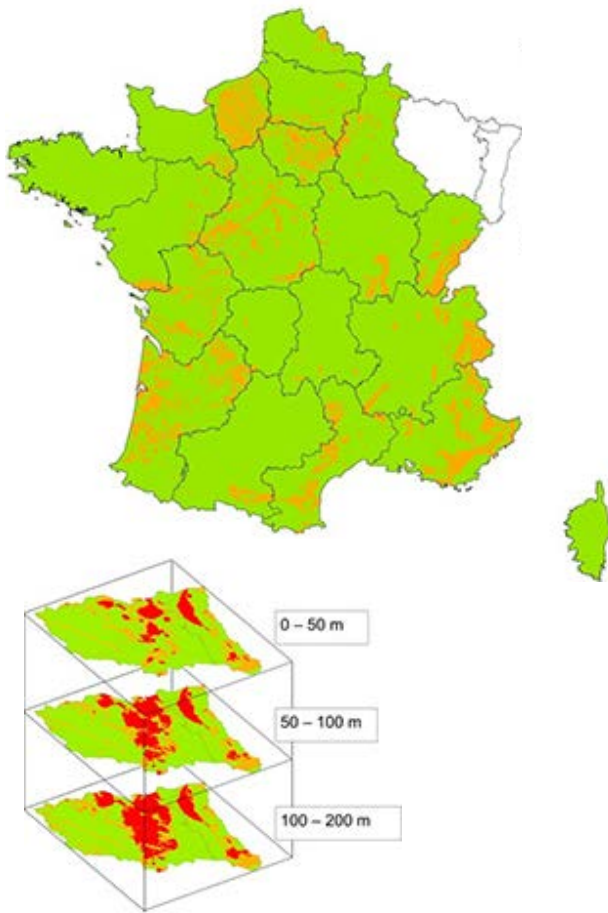


Figure 8 : carte de France des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance pour doublet sur nappe (source : www.cfms-sols.org)

La cartographie est réalisée pour 3 niveaux de profondeur :

- 10-50 m,
- 10-100 m,
- 10-200 m.

Également, une différenciation a été réalisée pour distinguer les forages pour prélèvement/réinjection sur aquifère, et les forages pour sondes géothermiques verticales.

Cela permet de qualifier un risque en fonction du type de forage envisagé et de sa profondeur.

L'arrêté du 25 juin 2015 relatif à la carte des zones en matière de géothermie de minime importance définit donc le zonage et la méthodologie d'établissement.

Un projet qui se situerait dans une zone rouge ne serait plus considéré comme un projet relevant de la géothermie de minime importance.

Régime déclaratif

L'article 22-2 du décret 2006-649 du 2 juin 2006 précise les pièces constituant la déclaration de l'ouverture des travaux d'exploitation d'un gîte géothermique de minime importance. Celle-ci est à effectuer via un téléservice dédié à l'accomplissement des procédures relatives à la géothermie de minime importance.

Le pétitionnaire déclare l'ouverture de travaux d'exploitation auprès d'un téléservice dédié. Il reçoit un récépissé de déclaration et la qualification de la zone d'implantation du projet vis-à-vis de la carte des zones réglementaires :

- en zone « verte » : le régime déclaratif s'applique ;
- en zone « orange » : le régime déclaratif s'applique, la déclaration comporte en outre une attestation de compatibilité d'un expert agréé ;
- en zone « rouge » : les risques géologiques identifiés par la carte des zones réglementaires excluent le bénéfice du régime administratif de la minime importance. Une installation géothermique présentant les caractéristiques techniques de la minime importance située en zone rouge est considérée comme présentant des dangers et inconvénients graves au sens de l'article L161-1 du code minier. Une installation géothermique relève alors de la géothermie de basse température qui nécessite le dépôt d'une demande d'autorisation.

Désignation d'un expert agréé

L'arrêté du 25 juin 2015 relatif à l'agrément d'expert en matière de géothermie de minime importance : l'arrêté expose le cadre et les modalités d'agrément des experts, les modalités dans lesquelles ce dernier établit l'attestation de compatibilité d'un projet géothermique prévue dans la déclaration d'ouverture des travaux d'exploitation d'une activité de géothermie de minime importance.

Pour établir l'attestation de compatibilité d'un projet de géothermie de minime importance, l'expert agréé prend en considération le contexte géologique de la zone d'implantation et vérifie l'absence de dangers ou inconvénients graves pour la protection des intérêts mentionnés à l'article L. 161-1 du code minier.

Pour délivrer l'attestation de compatibilité, l'expert tient compte :

- des informations qui lui sont transmises relatives au projet d'activité géothermique ;
- de la localisation de l'ouvrage géothermique envisagé et son environnement proche ;
- de la carte en vigueur fixée conformément à l'article 22-6 du décret du 2 juin 2006 susvisé, et particulièrement des aléas qui ont justifié le classement en orange de la zone d'implantation du projet ;
- des caractéristiques géologiques et hydrogéologiques de la zone de forage de l'ouvrage géothermique ;
- des prescriptions techniques, qui seront mises en œuvre lors de l'ouverture des travaux d'exploitation, prévues par l'arrêté du 25 juin 2015 relatif aux prescriptions générales applicables aux activités géothermiques de minime importance ;
- des usages de la ressource en eau notamment, s'il y a lieu, les déclarations d'utilité publique protégeant les points de prélèvement d'eaux destinées à la consommation humaine et les sources d'eau minérale naturelle ;
- les dispositions réglementaires applicables à l'activité géothermique, visant à la protection des intérêts mentionnés aux articles L. 161-1 du code minier et mentionnées au chapitre 2 de l'annexe de l'arrêté du 25 juin 2015 relatif aux prescriptions générales applicables aux activités géothermiques de minime importance.

Le texte précise les compétences requises pour obtenir cet agrément. L'expert ou organisme dispose :

- obligatoirement d'une expérience professionnelle sur la zone géographique sollicitée. L'expérience professionnelle est d'au minimum cinq références d'études dans le domaine de la géologie, hydrogéologie. Parmi ces références, au moins deux concernent des projets géothermiques ou des projets sur lesquels des forages de plus de 10 mètres ont été réalisés ;
- obligatoirement, de connaissances d'ordre général sur les thématiques suivantes : géologie, hydrogéologie et chimie de l'eau, géothermie et son utilisation dans les bâtiments, techniques de forage, réglementations associées aux usages du sous-sol (géothermie, eau, mines et carrières, stockages souterrains) ;
- le cas échéant, de connaissances d'ordre général sur les thématiques suivantes : fonctionnement des pompes à chaleur, utilisation des fluides frigorigènes susceptibles d'être utilisés dans un échangeur géothermique, ingénierie thermique des bâtiments.

L'organisme qui demande l'agrément d'expert en matière de géothermie de minime importance nomme des référents techniques au sein de sa structure. L'expérience professionnelle et les connaissances mentionnées ci-dessus sont démontrées par les compétences des référents techniques. L'acquisition des connaissances est justifiée par une formation initiale et/ou par la formation professionnelle.

Chaque référent technique nommé est titulaire :

- de trois ans d'expérience professionnelle et d'un diplôme ou titre d'ingénieur d'un établissement habilité à délivrer un titre d'ingénieur en application de la loi du 10 juillet 1934 susvisée ou titres sanctionnant un troisième cycle d'études scientifiques universitaires ;
- ou de cinq ans d'expérience professionnelle et d'un diplôme sanctionnant un premier cycle d'études supérieures ou d'un titre ou diplôme classé au moins au niveau II.

La liste des experts agréés est disponible sur le site <http://www.geothermie-perspectives.fr/>, en allant à la page <http://www.geothermie-perspectives.fr/document/foreurs-expertsGMI>.

Synthèse des régimes déclaratifs

| TYPE DE GÉOTHERMIE | CONDITIONS GÉNÉRALES | RÉGIME ADMINISTRATIF |
|---|--|---|
| Géothermie avec puits canadiens, géostructures thermiques ou corbeilles | Aucune | Code minier non applicable |
| Géothermie avec des échangeurs thermiques fermés horizontaux (prof < 10 m) | Profondeur inférieure à 10 m | Code minier non applicable |
| Échangeurs géothermiques ouverts | Profondeur < 10 m, puissance < 500 kW, température < 25 °C, débit < 80 m³/h et réinjection même nappe et en zone verte ou orange | Code minier non applicable |
| | Profondeur > 10 m, et < 200 m, puissance < 500 kW, température < 25 °C, débit < 80 m³/h, réinjection même nappe et en zone verte ou orange | Déclaration |
| | Profondeur > 200 m ou puissance > 500 kW ou température > 25 °C ou débit > 80 m³/h ou pas de réinjection en même nappe ou zone rouge | Autorisation instruite par les services de l'État |
| Échangeurs géothermiques fermés (capteurs verticaux) d'une profondeur de 10 à 200 m | Puissance < 500 kW et zone verte ou orange | Déclaration |
| | Puissance > 500 kW ou zone rouge | Autorisation instruite par les services de l'État |
| Échangeurs géothermiques d'une profondeur supérieur | Profondeur > 200 m | Autorisation instruite par les services de l'État |

Récapitulatif des procédures applicables aux différents types de géothermie utilisés

- Code minier non applicable
- Déclaration
- Autorisation instruite par les services de l'État

Entreprises de forage

L'arrêté du 25 juin 2015 relatif à la qualification des entreprises de forage intervenant en matière de géothermie de minime importance impose que les entreprises de forage disposent d'attestation de qualification. L'arrêté définit les exigences de la qualification.

La qualification Qualiforage, désormais gérée par Qualit'enr, est la seule qualification en France répondant aux exigences de l'arrêté.

Exigences techniques réglementaires

L'arrêté du 25 juin 2015 relatif aux prescriptions générales applicables aux activités géothermiques de minime importance impose des caractéristiques techniques pour la conception et la réalisation des installations.

Des contraintes d'implantation sont définies pour les échangeurs fermés et ouverts. Il est défini également les documents à conserver durant la totalité de la durée d'exploitation plus une année de l'installation de géothermie. Des prescriptions assez précises sur le choix des matériaux, la tenue du chantier sont décrites dans le texte.

Pour les échangeurs fermés, on retiendra principalement les conditions techniques suivantes :

- La puissance thermique maximale extractible est imposée et doit être prise égale à 50 W/m linéaire. Il s'agit d'un ratio conservateur permettant de limiter les risques de mauvais dimensionnement des installations.
- Obligation de cimenter sur toute la longueur.
- Les températures du fluide circulant dans les sondes doivent être comprises entre -3 °C et +40 °C.
- Le diamètre intérieur des tubes des sondes verticales doit être de 25 mm minimum.
- Les rayons de courbure des fabricants doivent être respectés.

Pour les échangeurs ouverts, on retiendra principalement les conditions techniques suivantes :

- La variation de température à 200 m du forage ne doit pas varier de plus 4 °C.

La température de réinjection ne doit pas dépasser +32 °C.

II.2 Pompes à chaleur géothermiques

PAC géothermiques

Définitions

En matière de géothermie, les installations dont le captage est réalisé par sonde verticale ou dans l'eau de nappe nécessitent l'usage de pompes à chaleur afin de restituer l'énergie puisée à l'intérieur des ouvrages de bâtiment.

Une installation complète comporte donc trois éléments principaux : une source de chaleur (sous-sol, eau de nappe) et son système de captage, une PAC et un émetteur de chaleur.

Dans la définition réglementaire largement développée ci-avant, il est question d'échangeur ouvert et d'échangeur fermé. Lorsque l'échangeur est ouvert, le fluide caloporteur est l'eau de nappe. Lorsque l'échangeur est fermé, le fluide caloporteur est de l'eau glycolée, ou bien du fluide frigorigène.

Pour les émetteurs, il s'agit le plus souvent de planchers chauffants, auquel cas le fluide caloporteur pour l'émission de chaleur est de l'eau.

Donc, pour une PAC sur eau de nappe avec un plancher chauffant, le terme à employer est PAC eau/eau. Pour une PAC avec un échangeur fermé et de l'eau glycolée et un plancher chauffant, le terme à employer est PAC eau glycolée/eau. Dans le cas d'un échangeur fermé et un fluide frigorigène et un plancher chauffant, le terme est PAC sol/eau.

Poids de la géothermie dans la filière PAC

Les pompes à chaleur géothermiques s'inscrivent plus généralement dans la filière des pompes à chaleur, et les chiffres de ce type d'installation sont à comparer avec ceux des autres types de pompes à chaleur. En effet, l'autre grande famille de pompes à chaleur est celle qui utilise l'air comme source de chaleur, et non l'énergie du sous-sol. Dans ce cas, on parle de PAC air/eau ou de PAC air/air selon le vecteur de restitution d'énergie dans les ouvrages. Il est à noter que les chauffe-eau thermodynamiques sont intégrés à cette filière.

Les chiffres 2015 du syndicat des industries thermiques, aérauliques et frigorifiques Uniclimate ont été publiés en février 2016. Ils sont basés sur les informations que les industriels ont communiquées au syndicat.

Les chiffres de la filière des pompes à chaleur au global atteignent 554 299 installations thermodynamiques. Ce chiffre est à comparer aux 594 000 installations de chauffage par chaudière gaz ou fioul.

Parmi les 554 299 installations de pompes à chaleur, les PAC air/air sont encore marginalement utilisées comme système principal de chauffage : il s'agit plutôt de systèmes de rafraîchissement. De même les chauffe-eau thermodynamiques ne peuvent être comparés avec les PAC air/eau, géothermiques ou les chaudières, dont la destination est le chauffage.

Ainsi, les PAC air/eau représentent 75 273 installations, les PAC air/air représentent 399 697 installations, les chauffe-eau thermodynamiques représentent 76 250 installations, et les pompes à chaleur géothermiques (eau/eau, eau glycolée/eau, sol/sol et sol/eau) représentent 3 079 installations.

La géothermie représente donc une très faible part de marché parmi les installations de chauffage.

De plus, ce type d'installation est en baisse constante. Cela est sans doute dû à la baisse de prix d'équipements concurrents, à une pression économique accrue sur les consommateurs, et à des contraintes techniques fortes. Depuis 2010, les installations géothermiques ont ainsi diminué de 66 %. Entre 2014 et 2015, le nombre d'installations de PAC géothermiques a diminué de 5 % alors que dans la même période, les PAC air/eau ont crû de 8 %.

Parmi les 3 080 installations de géothermie :

- les PAC sol/sol représentent 383 installations (13 %),
- les PAC sol/eau représentent 320 installations (10 %),
- les PAC eau glycolée + eau/eau représentent 2 377 installations (77 %).

La figure 9 reprend le tableau publié par Uniclimate sur l'évolution des installations géothermiques depuis 2010.

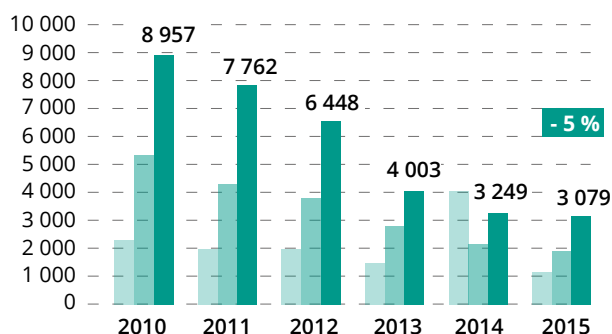


Figure 9 : Évolution du marché des PAC géothermiques (eau/eau + eau glycolée/eau + sol.) de 2010 à 2015 (source : www.uniclimate.fr)

II.3 Périmètre du rapport

Sources d'analyse

Ce rapport est issu de l'analyse de 66 rapports d'expertise liés à des désordres sur des installations géothermiques. Les rapports d'expertise ont été collectés par deux sources différentes : le Dispositif Alerte de l'AQC, et la bibliothèque interne du Gie Socabat.

Les rapports d'expertise du Dispositif Alerte représentent environ la moitié des dossiers reçus.

Les rapports des deux sources représentent des expertises qui font suite à des déclarations de sinistre auprès d'assureur « construction ». Et c'est sur le volet décennal que ces sinistres sont déclarés et expertisés.

Les systèmes de récolte d'information ne traitent donc pas, la plupart du temps, de désordres qui ont trait à d'autres fondements juridiques.

D'autre part, les causes de désordres, leurs conséquences et les coûts évoqués dans ce rapport ne préjugent en rien du traitement assurantiel de la déclaration, et de la suite qui en est donnée.

La plupart des coûts cités ne sont que des approches à dire d'expert et ne reflètent pas la réalité d'un devis, ou d'une étude de prix approfondie. En effet, les rapports analysés sont souvent rédigés suite à une unique expertise dont la suite donnée n'est pas connue, car elle relève de relations entre l'assureur et l'assuré.

Périmètre du rapport

Le rapport traite des désordres recensés sur des installations géothermiques assistées par pompe à chaleur et des puits climatiques.

Les installations de fondation thermoactives sont exclues : ces installations sont encore en faible nombre et sont très spécifiques.

Le rapport traite des causes de désordres provenant des sources d'énergie et leur système de captage, ainsi que ceux affectant la pompe à chaleur elle-même. Les désordres affectant les émetteurs de chaleur (par exemple les planchers chauffant, les ventilo-convecteurs,...) ne sont pas considérés. Ainsi, dans la suite du rapport, il n'est plus fait mention des émetteurs dans le nom de la PAC : par exemple, les « PAC eau/eau » sont notées « PAC eau/ »

Le tableau ci-dessous synthétise donc les types d'installations traitées dans ce rapport.

| TYPE D'INSTALLATION | TYPE DE CAPTEUR | TYPE D'ÉCHANGEUR | CONCERNÉ PAR LA RÉGLEMENTATION SUR LA GÉOTHERMIE DE MINIME IMPORTANCE | TRAITÉ DANS CE RAPPORT |
|---------------------|------------------------------|------------------|---|------------------------|
| PAC eau glycolée | capteur horizontal | fermé | non | oui |
| PAC eau glycolée | sonde géothermique verticale | fermé | oui | oui |
| PAC eau glycolée | corbeille géothermique | fermé | non | oui |
| PAC eau glycolée | structure géothermique | fermé | non | non |
| PAC eau | prélèvement sur aquifère | ouvert | oui | oui |
| PAC sol | horizontal | fermé | non | oui |
| PAC sol | vertical | fermé | oui | oui |
| puits climatiques | horizontal | ouvert | non | oui |

Tableau 2 : Récapitulatif des installations géothermiques traitées

III. ANALYSE DES RAPPORTS D'EXPERTISE

III.1 Introduction

Éléments d'analyse

66 rapports d'expertise ont été récoltés grâce au Dispositif Alerte de l'AQC et la bibliothèque interne du Gie Socabat. La répartition entre les deux sources est équivalente. Les données extraites des rapports sont :

- Année d'ouverture du chantier
- Année d'apparition des désordres
- Année de l'expertise
- Localisation
- Type de bâtiment
- Type d'installation
- Coût de l'installation
- Type de désordre
- Cause du désordre
- Coût de réparation

Commentaires

Selon les rapports, leur auteur, et le contexte de l'expertise, toutes les informations ne sont pas disponibles. Elles sont en effet parfois manquantes dans le dossier des ouvrages exécutés. Aussi, si le désordre ne concerne qu'une partie de l'installation, l'information relative à l'ensemble des matériaux et procédés employés n'est souvent pas disponible. Concernant les dates d'apparition des désordres, cette donnée est quasiment systématiquement inconnue. Les raisons sont multiples : cette donnée précise pour l'assureur n'a d'intérêt que si elle est reliée à des délais en matière d'assurance. Il faut en effet situer le désordre par rapport à l'année de la garantie de parfait achèvement, l'année de la garantie de bon fonctionnement, et l'année de fin de la garantie décennale (ou dommage-ouvrage).

Répartition par type de bâtiment

Les rapports d'expertise récoltés concernent à 90 % des maisons individuelles. Les autres rapports concernent des bâtiments tertiaires.

Classement par année d'expertise

Le recensement des rapports d'expertise a permis de les classer par année d'émission. Le maximum de rapports récoltés apparaît entre 2010 et 2012.

| ANNÉE DU RAPPORT | NOMBRE DE RAPPORTS |
|------------------|--------------------|
| 2005 | 1 |
| 2008 | 1 |
| 2009 | 4 |
| 2010 | 21 |
| 2011 | 10 |
| 2012 | 10 |
| 2013 | 8 |
| 2014 | 7 |
| 2015 | 4 |

Tableau 3 : Nombre de rapports d'expertise par an de 2005 à 2015

Répartition des rapports par année après la DOC

La figure 10 présente la répartition des rapports en fonction du nombre d'années écoulées après la date d'ouverture du chantier (DOC). Comme évoqué plus haut, la date de survenance du désordre n'est pas toujours connue, et il a été choisi dans ce rapport d'utiliser la date de l'expertise. 82 % des expertises sont réalisées avant la septième année après la DOC. Cette proportion est très proche de celle qui est observée dans les tableaux de bord du SYstèmes de COLlecte des DÉsordres (SYCODÈS). En 2013, cette proportion était de 77 % pour les maisons individuelles et 79 % pour les bâtiments de logement collectifs.

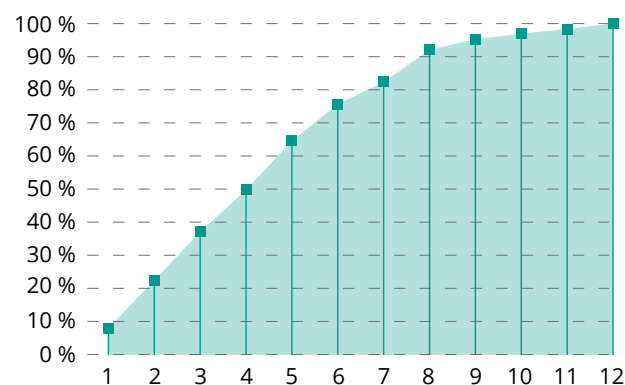


Figure 10 : Évolution du cumul de rapports en fonction du nombre d'années après la date d'ouverture du chantier.

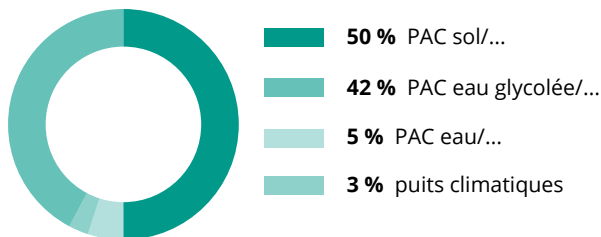


Figure 11 : Répartition des rapports d'expertise par type d'installation

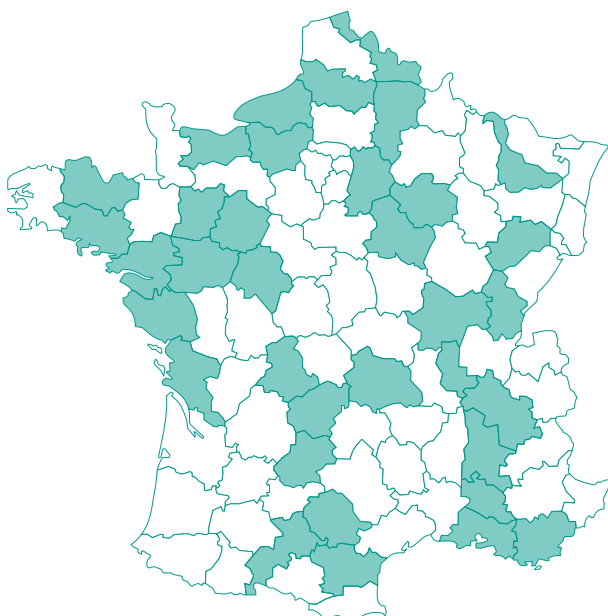


Figure 12 : Répartition géographique des rapports d'expertise

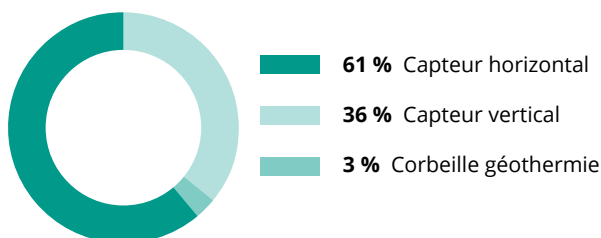


Figure 13 : Répartition des rapports d'expertise pour les PAC eau glycolée

III.2 Typologie d'installations

Installations

Les installations qui ont fait l'objet d'un rapport d'expertise recensé dans cette étude sont décrites à la figure 11. Les PAC eau glycolée/ et PAC sol/ sont fortement représentées (92 % des rapports). Les PAC géothermiques sur aquifères ne représentent que 5 % des cas récoltés. Le reste des rapports est dû à une installation de puits climatiques.

Typologie de bâtiments

Les installations de géothermie ayant fait l'objet d'une expertise sont issues de maisons individuelles à 89 %, et de bâtiments tertiaires à 9 %.

Localisation des désordres

La carte ci-contre présente la localisation des désordres en France métropolitaine par département. Les départements colorés sont ceux dans lesquels au moins une expertise a eu lieu (hors sinistres alsaciens).

III.3 Typologie de désordres et causes principales

Désordres des PAC eau glycolée

Répartition

Les PAC eau glycolée sont subdivisées en 3 catégories : les PAC à capteur horizontal, celles dont le capteur est une sonde géothermique verticale (SGV) et les corbeilles géothermiques.

Désordres des installations à capteur horizontal

L'ensemble des cas recensés a pour conséquence une défaillance du système de chauffage.

Incendie

Deux cas de début d'incendie de la PAC ont été signalés. Les pompes à chaleur étant des équipements électriques, certains composants peuvent connaître une défaillance. Dans le cas présent, la mise en œuvre des deux équipements n'a pas été mise en cause dans l'origine du départ de feu.

Surchauffe

D'autres cas de défaillance de PAC ont été relevés comme des cas de surchauffe du compresseur, ou de baisse de pression subites au niveau du circuit haute pression. Ces défaillances n'ont pas été commentées plus avant dans les rapports.

Fuite

L'ensemble des autres cas de défaillance généralisée du système de chauffage trouve son origine dans un problème de fuite situé au niveau du capteur enterré. Ces fuites proviennent soit du collecteur des boucles de captage, soit des boucles elles-mêmes.

Un exemple de fuite sur un collecteur concerne la pose d'un collecteur pour installation sanitaire et non prévu pour une installation géothermique.

Par ailleurs, la majeure partie des fuites constatées se situent au niveau des boucles de captage. Souvent, le remblaiement est une étape délicate et de nombreuses blessures ont été constatées après investigations.

D'autres sources de fuites ont été relevées, celles-ci étant dues à l'utilisation de tuyauteries non prévues pour les circuits de captage : plusieurs cas ont révélé que des tuyaux subissaient un vieillissement prématuré. Mais aucune analyse n'a été réalisée afin d'en connaître les causes.

Désordres des installations à capteur vertical

Les installations à capteur vertical se rapportent à la géothermie de minime importance telle que définie dans la première partie. Néanmoins, les dates de réalisations des installations n'imposaient pas l'application de la réforme de la géothermie développée en première partie. Une des différences d'application est celle qui tient à la profondeur de forage qui était permise jusqu'à 100 m.

Les désordres observés avec les sondes géothermiques verticales sont de même nature que pour les capteurs horizontaux : défaillance des PAC, départ de feu, et fuites identifiées au niveau des capteurs. Dans cette catégorie, des problématiques nouvelles doivent être ajoutées. La première est celle du dimensionnement du système de chauffage. La deuxième problématique est celle de l'influence de la sonde géothermique verticale sur le comportement du sous-sol.

Concernant les PAC, un départ de feu a été recensé : aucune investigation n'a été réalisée afin d'en déterminer la cause exacte. Une fuite de fluide frigorigène a été également la source de la mise en sécurité de la PAC.

Concernant les fuites d'eau glycolée constatées au niveau du circuit de captage, force est de constater que les investigations dépassent rarement le simple constat.

Le mode réparatoire est le plus souvent un shunt de la sonde. Et selon le dimensionnement, un remplacement des installations par des PAC aérothermiques peut s'avérer nécessaire.

Un cas particulier d'une mauvaise qualité de matériau constituant la sonde géothermique a été détecté. Il s'est avéré que la qualité de polyéthylène employé n'était pas appropriée. En effet, l'expertise judiciaire a montré que le matériau mis en œuvre ne respectait pas la norme NF 12201 qualifiant les tubes en polyéthylène, notamment par rapport aux contraintes admissibles dans le domaine élastique et plastique. Cette norme était la seule référence à la date des travaux. Depuis, une norme spécifique sur les matériaux des sondes géothermiques verticales est devenue obligatoire suite à la réforme de la géothermie : il s'agit de la norme NF X 10-960 parties 1 et 2.

L'installateur qui a employé le mauvais matériau a sans doute aggravé la situation en ne respectant pas les rayons de courbure.

D'autres désordres proviennent d'un mauvais dimensionnement de l'installation complète. En effet, le dimensionnement est complexe du fait de divers paramètres présentant un niveau d'incertitude parfois élevé. En effet, il est nécessaire de connaître les besoins de chauffage du bâtiment ; un bilan thermique est donc nécessaire, intégrant les caractéristiques intrinsèques de l'enveloppe. Aussi, il faut déterminer la capacité du sous-sol à restituer de la chaleur, et ce sur plusieurs années. Un test de réponse thermique est parfois nécessaire pour s'assurer du potentiel et confirmer les paramètres d'exploitation au cours de la vie de l'installation.

Dans un cas recensé pour un bâtiment tertiaire, il est évoqué un dimensionnement trop faible, si bien que différentes hypothèses sont à l'étude :

- Augmenter le nombre de sondes de 21 à 35 avec une profondeur de 100 m
- Diminuer la température de fonctionnement jusqu'à -8 °C

Or pour cette dernière hypothèse, la température de fonctionnement à -8 °C ne serait plus permise en appliquant la réforme de la géothermie, puisque la température à respecter est de -3 °C. En-deçà, il est considéré que les contraintes thermiques appliquées au coulis de ciment entourant les sondes peuvent impacter la durabilité du dispositif.

Et la durabilité est considérée comme importante par les rédacteurs de la réforme de la géothermie. En effet, plusieurs cas de mise en communication de diverses formations géologiques ont provoqué des affaissements ou surrections de terrain. Ces mouvements ont eu lieu notamment car un aquifère a été mis en communication avec une formation d'anhydrite. Ces événements notables ont eu lieu en Alsace et en Allemagne (Bade-Wurtemberg) et sont développés dans le focus sur les risques majeurs.

Désordres des corbeilles géothermiques

Un seul dossier a été récolté. Le désordre mentionné dans le rapport d'expertise est un phénomène de prise en glace du capteur et une perte d'efficacité des échanges dans le sous-sol. Le dimensionnement des corbeilles géothermiques est en effet très délicat, tant la concentration d'échange entre les tuyaux et le sous-sol est importante.

Désordres des PAC sol/

Les PAC sol/ sont des PAC géothermiques à détente directe, c'est-à-dire que le capteur fait office d'évaporateur. Pour ce faire, le fluide frigorigène circule directement dans le terrain. Deux types de PAC sol/ existent. Celles dont le capteur est horizontal, et celles dont le capteur est vertical. Ce dernier cas, plus récent en termes de technologie, n'a pas recensé de pathologie associée dans cette étude. Donc, le type de capteur est exclusivement horizontal dans cette étude.

Les désordres sont dus à 70 % à des fuites de fluide frigorigène, ce qui provoque des dysfonctionnements des PAC et donc une insuffisance de chauffage. Les fuites de fluide frigorigène ont été relevées de façon certaine au niveau de collecteurs. Les brasures entre les tubes de cuivre du capteur horizontal et le collecteur présentent des défauts, qui provoquent des fuites. Ce type de désordre a été largement répandu avec ce procédé.

Les fuites de fluide frigorigène provenant d'autres sources dans le capteur étant plus difficiles à détecter, il est fréquent que les experts ne poussent pas les investigations jusqu'à la détection. Seuls le constat et les propositions de réparation sont développés.

Un autre type de désordre rencontré avec les PAC Sol/ est celui du dimensionnement. En effet, pour être efficace, le système est prévu pour fonctionner avec des températures négatives dans le capteur horizontal. De ce fait, il arrive qu'un manchon de glace se forme autour du tube cuivre pendant la saison de chauffe. En été, le manchon de glace fond. Au fur et à mesure des saisons, le terrain subit des mouvements, pouvant aller jusqu'à des affaissements locaux de quelques dizaines de centimètres.

Enfin, ce genre de PAC demande une bonne qualité de fabrication et une mise en œuvre respectant l'ensemble des préconisations des fabricants. Des défaillances de PAC sol/ ont été recensées au nombre de 9 cas pour un même fabricant : le compresseur de ces PAC génère des fuites de fluide frigorigène.

Désordres des PAC eau/

La pathologie principale des PAC sur aquifère est liée à la prise en compte des caractéristiques de la ressource de l'aquifère. Deux cas présentent des problématiques de qualité d'eau. Cela provoque dans l'un des cas la corrosion avancée de la PAC eau/. L'absence d'un échangeur intermédiaire entre le puisage et la PAC est à l'origine du désordre. Une analyse d'eau aurait permis de l'anticiper. Un autre cas de méconnaissance des règles de l'art est caractérisé par le fait que l'eau prélevée est fortement chargée en fines, ce qui encrasse trop rapidement les filtres et échangeurs.

Un autre cas intéressant récolté est celui dans lequel deux aquifères sont mis en communication. En effet, ce cas a été révélé suite à l'encrassement de la pompe immergée. Des analyses ont montré que le développement bactérien de *Gallionellas* en était à l'origine. En réalité, le forage d'eau a mis en communication un aquifère supérieur qui se déverse dans un aquifère inférieur. Une oxygénation de l'eau de l'aquifère inférieur permet alors aux bactéries de se développer. Ces bactéries étant des ferrobactéries, leur développement génère des boues d'hydroxydes de fer de couleur ocre et encrasse la pompe immergée.

Ce cas révèle que le tubage n'a pas été réalisé de manière adéquate pour éviter la mise en communication entre deux aquifères. La norme NF X10-999 n'a pas été respectée. Cette norme étant rendue obligatoire par la réforme de la géothermie, le foreur aurait dû investiguer pour connaître le sous-sol et adapter les longueurs de tubage à ce cas particulier.

Désordres des puits climatiques

Les cas récoltés sont tous deux des problématiques d'infiltration d'eau dans le réseau aéraulique souterrain. Dans les deux cas, une conduite insuffisamment rigide a été mise en œuvre. De plus, les conduites sont annelées ce qui favorise la rétention d'eau et le développement microbien.

III.4 Principes réparatoires et coûts

Introduction

Les informations des principes réparatoires et des coûts estimés ne sont pas toujours présentes dans les rapports d'expertise. En effet, certaines expertises sont complexes et nécessitent de mener des investigations complémentaires, dont on ne connaît pas l'issue dans chaque rapport. A fortiori, les coûts associés aux principes réparatoires sont donc des ordres de grandeur.

Départ de feu d'une PAC

Sur l'ensemble des dossiers, 4 cas ont été observés dans les classes d'installation PAC eau glycolée/, PAC sol/. Concernant l'installation, le mode réparatoire consiste à remplacer les éléments d'équipements ayant subi les dégradations. Selon la gravité du départ de feu, les dommages consécutifs peuvent avoir plus ou moins d'ampleur. L'enjeu financier s'en trouve logiquement impacté. C'est pourquoi pour les 4 cas rencontrés, tous dans des maisons individuelles, le coût estimé varie de 4 000 € à 70 000 €.

Défaillance de la PAC

Dans le cas d'une simple défaillance de PAC, les expertises préconisent :

- une réparation de l'équipement,
- un changement de la PAC dans les cas où celle-ci n'est plus commercialisée,
- une modification complète de l'installation (capteur + équipement) dans le cas où le mauvais dimensionnement serait à l'origine de la défaillance.

Les enjeux financiers varient ainsi de 500 € à 20 000 €.

Fuite sur circuit de captage horizontal à eau glycolée

Dans le cas d'une fuite sur capteur enterré horizontal, il n'est pas toujours rentable de faire une recherche de fuite. Aussi, il est souvent préconisé de remplacer le capteur. Les étapes du mode réparatoire préconisé sont :

- vidange installation, démontage collecteur et remise en place,
- terrassement pour confection capteur, et remblai,
- investigations éventuelles sur capteur (mini-pelle),
- pose des canalisations du capteur,
- apport de glycol,
- remise en état du terrain.

L'ensemble de ces étapes est estimé à environ 7 000 €.

Fuite sur circuit de captage vertical à eau glycolée

La plupart du temps, ce cas amène les experts à préconiser l'abandon de la ou des sondes géothermiques verticales. Cela conduit naturellement aux étapes suivantes :

- forer un nouveau puits pour une nouvelle sonde conformément à la norme NF X 10 970,
- réaliser de nouvelles tranchées du puits à la PAC, sans oublier la réalisation d'un regard,
- remblayer,
- rincer le circuit de captage et procéder au remplissage en eau glycolée,
- procéder aux vérifications d'usage et à la remise en route.

Pour le désordre décrit dans la partie précédente, la maison individuelle était équipée de deux forages géothermiques. L'enjeu financier total pris en compte dans le cadre l'expertise judiciaire a été de l'ordre de 20 000 €.

Fuite de fluide frigorigène sur capteur horizontal

Deux situations sont présentes :

- la fuite est localisée au niveau du collecteur reliant les boucles de captage et la PAC,
- la fuite est localisée au niveau du circuit de captage enterré,

Dans le premier cas, le coût de réparation estimé est de l'ordre de 2 500 €, alors que dans le deuxième, le circuit de captage devrait être entièrement refait. Les chiffres ne sont pas concordants entre experts et varient entre 5 000 € et 8 000 €

Canalisations non étanches / puits climatique

Les venues d'eau qui ont été constatées dans les canalisations des puits climatiques imposent d'y remédier pour des questions sanitaires évidentes. Dans les cas remontés, il s'agit d'une mauvaise sélection des matériaux utilisés pour les canalisations souterraines. Alors, le seul mode réparatoire possible est le remplacement complet des canalisations.

L'ordre de grandeur des évaluations de réparation est de 15 000 € à 20 000 €.

Encrassement et corrosion des équipements / PAC eau/eau

Les désordres constatés vis-à-vis des prélèvements d'eau sur aquifère ont révélé que les analyses d'eau nécessaires à réaliser lors de la conception de telles installations n'ont pas été réalisées. Dans les cas de la corrosion de la PAC, un échangeur eau/eau aurait permis de palier le problème. Dans l'autre cas d'encrassement, l'analyse de l'eau aurait permis d'identifier la présence de boues susceptibles d'encrasser de manière excessive les échangeurs qui avaient été mis en place. Les modes réparatoires sont parfois complexes à mettre en œuvre, puisqu'ils doivent être adaptés au cas par cas. Parfois, un changement des matériaux constituant les échangeurs (utilisation d'échangeurs en titane) suffira à résoudre le problème de corrosion ; parfois le changement d'échangeur de type plaque à centrifuge permettra de limiter l'encrassement. Mais dans certaines situations, le manque d'anticipation et d'analyses suffisantes rend impossible la résolution du désordre.

Les coûts évalués pour la réparation des désordres sont donc de 2000€ à plusieurs centaines de milliers d'euros.

Mauvais dimensionnement de l'installation

Dans les cas de mauvais dimensionnement du système, l'origine du désordre vient le plus souvent d'une mauvaise estimation du besoin énergétique de l'ouvrage. Outre la non atteinte du niveau de confort attendu, la conséquence est que les circuits de captage sont également sous-dimensionnés. Cela impose donc de réviser systématiquement ces capteurs souterrains, et de modifier les puissances de PAC associées. La démarche expertale consiste alors à reprendre intégralement la conception :

- Bilan thermique et estimation du besoin énergétique
- Évaluation de la ressource : s'il s'agit de sondes géothermiques verticales, un test de réponse thermique, une étude du panache thermique dans le sous-sol et de l'interaction entre les SGV peuvent être nécessaires. S'il s'agit de prélèvements sur aquifère, les analyses d'eau, de débits, de pérennité de la nappe, de l'impact thermique peuvent s'avérer incontournables.
- Évaluation des solutions d'appoint énergétique (chaudière,...).
- Réévaluation des émetteurs (vecteur eau, vecteur air).

L'ensemble de ces tâches de re-conception génère potentiellement des coûts importants. C'est pourquoi l'évaluation de ce type de désordre peut être :

faible, de l'ordre de 4 000 € s'il s'agit de changer une PAC, ou très élevé, de l'ordre de plusieurs centaines de milliers d'euros.

Mauvaise réalisation du forage

La mauvaise réalisation d'un forage peut conduire à un risque majeur lié à la modification du sous-sol. Parmi la collecte de rapports, seul le cas du forage pour un prélèvement sur aquifère a été remonté. Dans ce cas, le forage n'a pas été tubé selon les règles de l'art et il y a eu mise en communication entre deux nappes. Des ferrobactéries se développent et créent un encrassement excessif de la pompe immergée. Une partie du mode réparatoire qui a été proposé est présenté ci-dessous :

- Remonter la pompe immergée afin de descendre une caméra à visée axiale pour observer le tubage PVC et l'état du gravier.
- Nettoyer le puits.
- Désinfecter le puits.
- Nettoyer une seconde fois le puits.
- Rechemiser les tubages PVC par des tubages en acier inoxydable.
- Réaliser de nouveaux essais de pompage pour déterminer les nouvelles conditions d'exploitation.
- Mettre un suivi en place pour étudier le niveau d'eau, effectuer des prélèvements réguliers.

En dehors de ce cas sur aquifère, d'autres types de désordres liés à une mauvaise réalisation des forages ont été recensés dans la littérature technique récente. En effet, plusieurs cas de surrection ont été enregistrés en Alsace et en Allemagne. Les modes réparatoires et les coûts associés sont mal connus. Un projet national nommé Remedia-for a entamé les réflexions pour mettre en place des solutions de réparation. Les coûts associés aux simples efforts d'investigations peuvent à eux seuls atteindre plusieurs centaines de milliers d'euros ; et les coûts de réparation plusieurs millions d'euros.

III.5 Focus sur les PAC

Problématique

Les désordres rencontrés avec les pompes à chaleur dans le cadre de ce rapport relèvent de problèmes de fiabilité des équipements. Les départs de feu semblent provenir de défaillances de composants électroniques des pompes à chaleur. Les défaillances des compresseurs ont des origines qui tiennent à la fois du composant et de l'installation (sur ou sous-dimensionnement potentiel). Enfin, les fuites de fluide frigorigène sont liées à une problématique de fiabilité des composants.

D'une manière générale, les produits industriels subissent des défaillances dues au vieillissement des composants, à des mauvais choix de composants, ou à une mauvaise maîtrise de la qualité de fabrication. Les pompes à chaleur ne font pas exception. Les désordres liés à des problèmes de qualité ne font pas toujours l'objet de déclaration de sinistres auprès des assureurs de responsabilité décennale. Le plus souvent, les désordres sont gérés grâce au service après-vente des entreprises d'installation ou des fabricants.

Certifications NF PAC

Afin de qualifier les équipements, il existe des certifications de produit dont la principale est NF PAC. La marque NF PAC est une marque volontaire de certification qui a pour but de :

- vérifier la conformité des pompes à chaleur aux différentes normes en vigueur, françaises, européennes et internationales ;
- certifier le niveau de qualité et de performance d'une pompe à chaleur de puissance calorifique inférieure ou égale à 100 kW.

Les performances certifiées par NF PAC sont :

- efficacité énergétique : COP pour le chauffage (coefficient de performance) et EER pour le rafraîchissement (efficacité énergétique de refroidissement) ;
- énergie : puissance de chauffage, puissance frigorifique, puissance électrique absorbée ;
- impact sonore : niveau de puissance acoustique.

La certification traite des PAC suivantes :

- les PAC à moteur électrique (air/..., eau/..., eau glycolée/..., sol/...) pour le chauffage et le rafraîchissement des locaux ;
- les PAC à moteur électrique pour le chauffage de l'eau des piscines ;
- les PAC à moteur électrique pour le chauffage de l'eau chaude sanitaire ;
- les PAC double service ;
- les PAC à absorption ;
- les PAC gaz à absorption et à moteur à combustion interne.

La puissance maximale certifiée est de 100 kW.

Les normes principales sur lesquelles le référentiel s'appuie sont :

- NF EN 14511 (octobre 2013) : Climatiseurs, groupes refroidisseurs de liquide et pompes à chaleur avec compresseur entraîné par moteur électrique pour le chauffage et la réfrigération, parties 1 à 4. Cette norme définit les conditions d'essai et les exigences minimales pour assurer l'emploi prévu de la PAC, dont la puissance et le COP.
- NF EN 14825 (novembre 2013) : Climatiseurs, groupes refroidisseurs de liquide et pompes à chaleur avec compresseur entraîné par moteur électrique pour le chauffage et la réfrigération des locaux - Essais et détermination des caractéristiques à charge partielle.
- NF EN 15879-1 (avril 2011) : Essais et détermination des caractéristiques des pompes à chaleur à détente directe avec le sol avec compresseur entraîné par moteur électrique pour le chauffage et/ou la réfrigération des locaux - Partie 1 : pompes à chaleur à échange direct avec l'eau.
- Normes relatives aux essais acoustiques.

En sus de ces normes, le référentiel NF PAC prévoit l'analyse du système qualité mis en place par le fabricant. Les exigences en matière de qualité se rapprochent de la norme ISO 9001. Quelques spécificités liées au produit PAC sont imposées. Par exemple, le contrôle systématique (100 % de la production) de la charge de fluide frigorigène est imposé, des essais de fuite de fluide frigorigène doivent également être effectués, les braseurs et soudeurs doivent être qualifiés. Il est également demandé d'assurer un suivi régulier des fournisseurs en appliquant un contrôle par échantillonnage de l'ensemble des composants de la PAC, l'objectif étant d'assurer la conformité de l'équipement.

Pour obtenir la certification NF PAC, le fabricant est donc évalué à partir :

- du dossier technique reçu par l'organisme certificateur,
- d'un audit d'usine in situ.

Commentaires

Les normes d'essai du référentiel NF PAC s'appliquent essentiellement aux équipements neufs, et n'adressent pas spécifiquement la question de la durabilité. Par exemple, dans la norme NF EN 14511, les essais de puissance sont réalisés pour des températures d'entrée définies, en régime stabilisé. La durée de cet essai est de 1h. Il n'y a pas de notion d'endurance dans cette norme. De même, dans le référentiel NF PAC, il n'y a aucune spécification concernant le nombre d'heures de fonctionnement avant le test d'étanchéité du circuit frigorifique.

Les certifications ont donc pour fonction principale de renseigner le concepteur sur les paramètres importants des pompes à chaleur à prendre en compte en conception. L'objectif est de permettre au concepteur d'avoir confiance dans les informations techniques qui lui sont données par le fabricant. Cet objectif a été atteint, NF PAC étant une référence reconnue pour aider au choix des équipements.

Concernant la durabilité et la fiabilité des équipements, seul l'aspect lié au système qualité du référentiel NF PAC permet de qualifier le système de fabrication, la traçabilité et le suivi des fournisseurs. C'est cet aspect de la certification qui apporte une réelle plus-value vis-à-vis la qualité.

Les rapports d'expertise examinés n'ont pas permis de déterminer une relation entre les marques dont certaines PAC sont/étaient certifiées, les marques dont les PAC ne sont pas certifiées, et les sinistres rencontrés.

III.6 Focus sur les risques majeurs

Introduction

Par risque majeur, le lecteur doit comprendre un risque géotechnique ou un risque de pollution des nappes et du milieu. À part le cas de communication entre deux aquifères, l'étude des rapports d'expertise collectés par l'AQC et le GIE Socabat ne présente pas ce type de désordres. Néanmoins, il est possible de trouver une littérature fournie sur les risques majeurs, leurs causes et leurs conséquences. Quelques exemples commencent à être médiatisés.

Exemples de sinistres

Staufen-en-Brigau

En 2007, 7 sondes géothermiques verticales d'une profondeur de 100 m ont été réalisées autour de la mairie de Staufen. Deux semaines après les travaux de forage, de premières fissures apparaissent. Une surveillance est mise en place. Entre mai 2008 et septembre 2009, il a été constaté une élévation de 1 cm/mois. L'élévation a atteint environ 35 cm en 2012. Il semble que les forages aient mis en communication 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 accompagné d'une augmentation de volume de 61 %, c'est-à-dire un gonflement, comme schématisé ci-dessous :

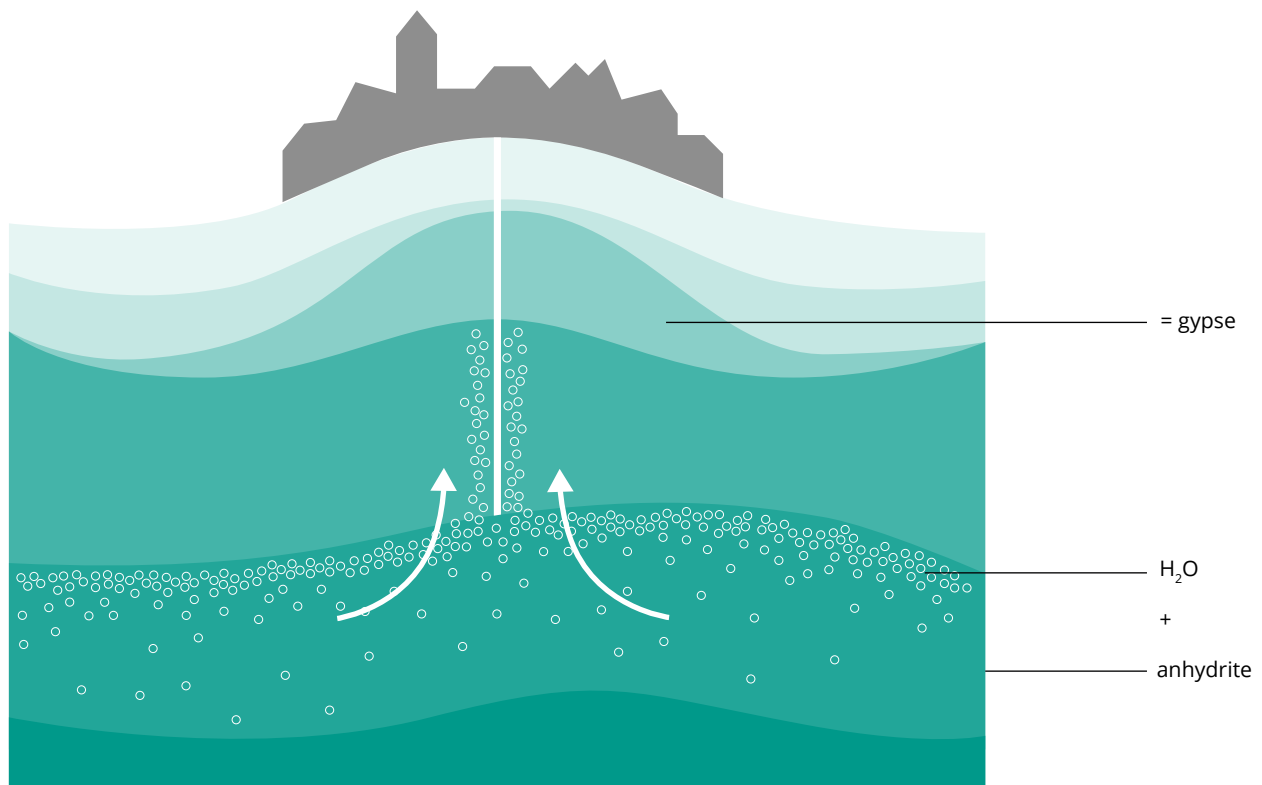


Figure 14 : Schéma de formation de la surrection à Staufen (source : www.sbz-online.de)

Les désordres ont touché environ 200 maisons.

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.

Les coûts d'investigations sont de l'ordre de 3,50 M€, et le coût total de réparation des maisons atteint environ 40 à 50 M€.

Plusieurs sinistres dans le Bade-Wurtemberg

En 2014, 6 sinistres étaient dénombrés : Staufen, Wurmlingen, Schorndorf, Leonberg-Eltingen, Renningen, Rudersberg.

Dans chacun des cas, la cimentation des sondes est mise en cause.

L'apparition des désordres est aléatoire : en effet, à Staufen, les premières fissures apparaissent dès 15 jours, alors qu'à Wurmlingen, il a fallu 10 ans avant les premiers signes de désordres.

La frise ci-dessous montre les différentes dates des sinistres rencontrés dans le land du Bade-Wurtemberg.

Un sinistre en Alsace

Fin 2007, 7 sondes géothermiques de 100 m de profondeur ont été réalisées d'un immeuble en R +2 comportant 9 appartements. Des fissures apparaissent dès les premiers mois. Un premier diagnostic a été réalisé en 2009 pour aboutir à une reprise en sous-œuvre en 2010. Malgré ces travaux de réparation, les mouvements se poursuivent et une campagne de suivi est mise en place. Les relevés font état d'une élévation de 12 cm en 2 ans, et de déplacements horizontaux de 5 cm. Un arrêté de péril a été pris en 2012, et l'immeuble est totalement évacué en 2013.

L'immeuble est voué à la démolition.

Des investigations ont été mises en œuvre : carottage, mesure de température, imagerie sonique. Cela a permis de valider certaines hypothèses :

- Il existe de l'anhydrite dans le sous-sol,
- Il existe un niveau aquifère supérieur.

L'eau de cet aquifère chemine vers l'anhydrite contenue dans les niveaux inférieurs évaporitiques et hydrate cette anhydrite qui gonfle et soulève le bâtiment en surface.

Ce cheminement d'eau a pour cause un défaut d'étanchéité des sondes géothermiques.

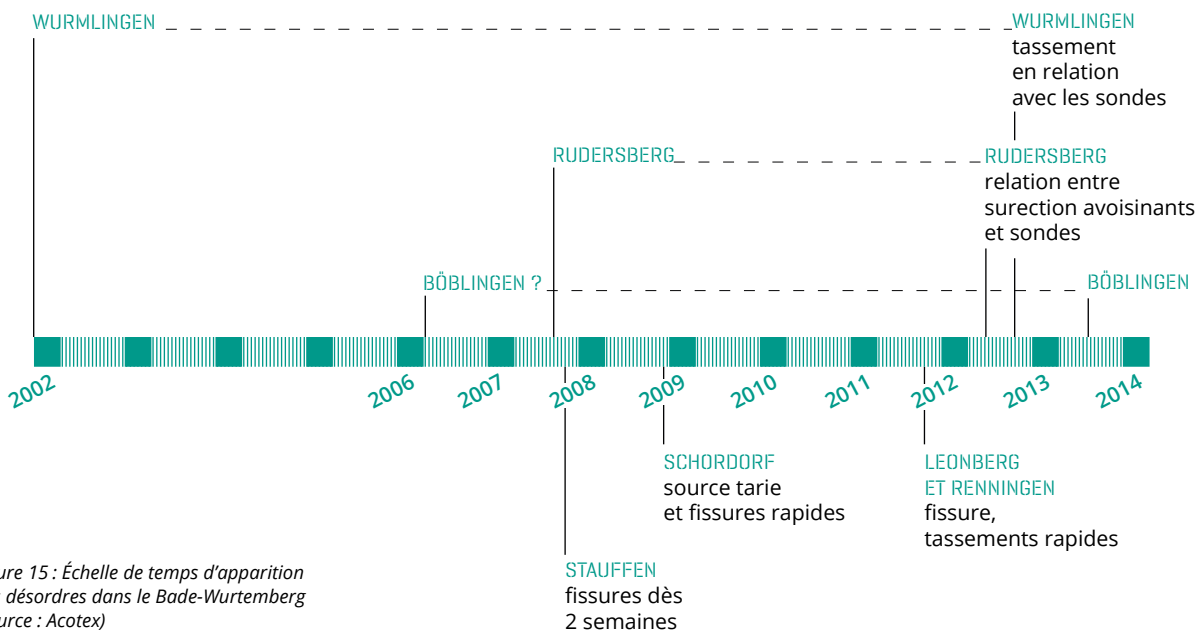


Figure 15 : Échelle de temps d'apparition des désordres dans le Bade-Wurtemberg (source : Acotex)

Autres sinistres en France

D'autres sinistres ont été recensés :

En Lorraine. 3 sondes sont à l'origine d'un affaissement sur une zone d'environ 450 m autour d'elles. Une mauvaise cimentation serait à l'origine de la dissolution d'une formation de sels. L'affaissement est de 9 cm/an sur 2008-2010. Les impacts sont sur des bâtiments et le réseau routier.

Pour un autre sinistre en Alsace, une sonde est suspectée d'être à l'origine de désordres importants : surrection, remontée de nappe.

Remédiation

Il n'y a pas de solution simple de remédiation pour tous ces sinistres potentiels. Chaque cas est particulier et doit être considéré par rapport au contexte des différentes formations géologiques. Les investigations sont très onéreuses, comme à Staufen. Mais un des sinistres alsaciens a déjà coûté plusieurs centaines de milliers d'euros en investigations, alors qu'aucune solution ne soit encore figée. Dans certains cas, l'abandon risque d'être une solution la moins coûteuse.

Des projets de recherche sont actuellement menés. On pourra citer le projet Remedia-For qui vise à définir les potentielles actions d'investigations, ainsi que quelques pistes de résolution de ces risques majeurs.

Cartographie des risques majeurs

La réforme de la géothermie de minime importance a été basée sur le travail effectué par le BRGM depuis début 2010. Notamment, un rapport d'analyse bibliographique (réf 13) synthétise les risques majeurs, reportés dans la figure suivante :

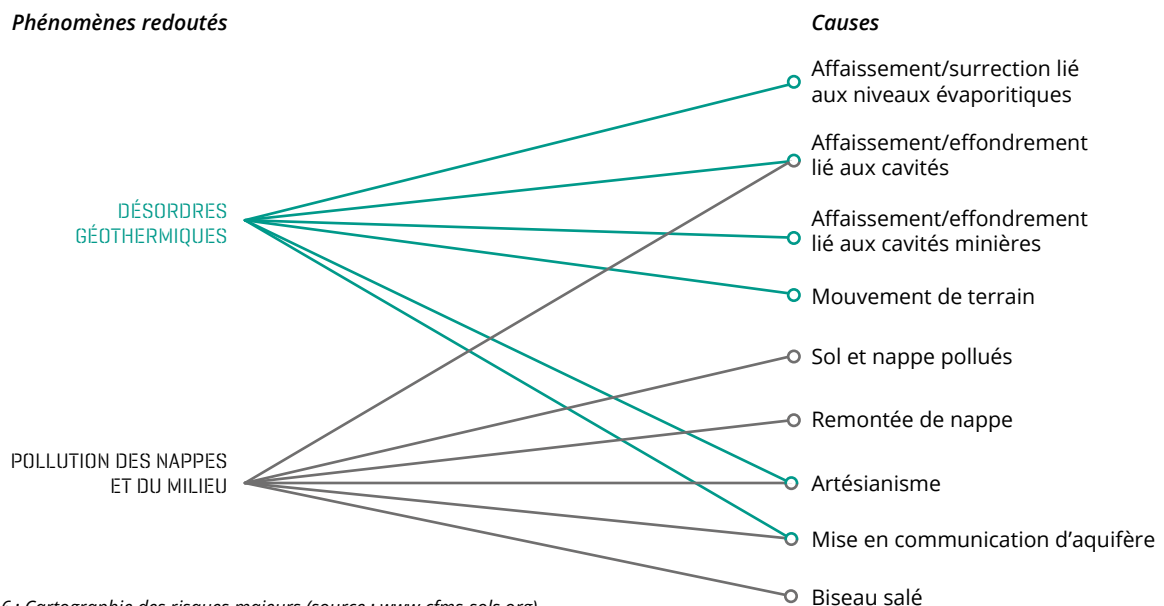


Figure 16 : Cartographie des risques majeurs (source : www.cfms-sols.org)

Les causes à l'origine des phénomènes redoutés surviennent lors de forages mal réalisés ou mal exploités.

Techniques de foration

Les techniques employées pour les forages d'eau ou pour les sondes géothermiques verticales sont donc fondamentales pour parvenir à maîtriser les risques. Le tableau suivant présente les techniques pour les SGV et les forages d'eau :

| TECHNIQUES | IMPACTS POTENTIELS | POSSIBILITÉS DE PRÉVENTION/REMÉDIATION |
|--|---|--|
| Microforage Fonçage | Diamètre insuffisant à une bonne cimentation → défaut d'isolement → infiltration depuis surface, mise en relation d'aquifères | À proscrire |
| Battage Havage Tarière simple | Si défaut d'isolement des aquifères au fur et à mesure de la foration → Infiltration depuis surface et/ou mise en relation d'aquifères en cours de foration | SGV : Peu évitable lors de la foration des SGV Isolement des formations post-foration Forage d'eau : Adaptation du programme de cimentation en fonction de la géologie |
| Marteau fond de trou | Si défaut d'isolement des aquifères au fur et à mesure de la foration → Infiltration depuis surface et/ou mise en relation d'aquifères en cours de foration | SGV : Peu évitable lors de la foration des SGV Isolement des formations post-foration Forage d'eau : Adaptation du programme de cimentation en fonction de la géologie |
| Rotary | Fluide de forage → modification des caractéristiques du milieu à proximité immédiate du forage Adjuvants de foration → impact mal évalué | Choix des fluides à adapter au milieu |

Tableau 4 : Techniques de foration et impacts potentiels pour les SGV et les forages d'eau

En ce qui concerne l'isolement des aquifères, la norme NF X10-999 pour les forages d'eau impose de procéder à un aveuglement successif de chaque formation aquifère non exploitée par cuvelage et cimentation. Pour les SGV, la foration se déroule en une étape ; et la norme NF X10-970 recommande de réaliser la cimentation 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 ».

Les défauts de cimentation sont à l'origine de la plupart des risques majeurs et leur maîtrise est donc fondamentale pour assurer la pérennité de l'installation.

Autant pour les forages d'eau que pour les sondes géothermiques verticales, le non-respect des règles de l'art ou la rencontre de milieu particuliers semblent à l'origine des désordres. Mais les forages pour sondes géothermiques verticales présentent des particularités qui génèrent une sensibilité accrue en raison d'une cimentation réalisée en une seule phase. Ceci fait que la norme ne prévoit pas d'isolation des différentes formations géologiques. Ce mode de cimentation est donc susceptible de mettre en relation des aquifères avec d'autres couches, au moins temporairement. Mais la norme émet aussi une liste de préconisations techniques dans le cas de situations particulières, résumées ci-après :

| MILIEU | IMPACTS POTENTIELS | POSSIBILITÉS DE PRÉVENTION/REMÉDIATION |
|--|---|---|
| Aquifères superposés | Mise en communication de différents aquifères | Isolement par cimentation |
| Zone de perte (Karsts, milieux fissurés) | Perte de fluide de forage → arrêt de la foration Cimentation impossible → défaut d'isolement | Adaptation de la cimentation Isolement de la zone de perte Si % de cavités important : SGV à proscrire |
| Roche non consolidée | Non-tenue du trou de forage → arrêt de la foration | Technique de maintien des parois |
| Artésianisme | Mise en communication de différents aquifères Rejets non maîtrisés en surface | Tête de puits adaptée pendant la foration Adaptation de la technique de foration Adaptation de la technique de cimentation Si artésianisme important : SGV à proscrire |
| Formations salifères, anhydres ou gypsifères | Mouvement de sol (gonflement, affaissement). Déstabilisation du bâti environnant | Isolement par cimentation Fluide de foration adapté (agent anti-gonflement) SGV à proscrire |
| Argile gonflante | Mouvement de sol (gonflement). Déstabilisation du bâti environnant | Isolement par cimentation Fluide de foration adapté SGV à proscrire, selon l'épaisseur des formations gonflantes |
| Mouvements de terrain | Risque d'arrachement des installations | |
| Sols pollués | Infiltration des polluants vers les aquifères | Isolement par cimentation |
| Gaz | Risque de fuite de gaz en surface | Connaissance des zones à risques |
| Zones inondables | <i>Risque d'infiltration des eaux de surfaces vers les aquifères</i> | Tête de puits étanche, ou au-dessus des plus hautes eaux connues |
| Sous-sol riche en sulfate, Eau acide | Dégradation des ciments → défaut d'isolation | Ciments spéciaux |
| Environnement marin, Présence de H ₂ S, Zone de battement de la nappe | Corrosion des tubages → défaut d'isolation | Ciment adapté |

Tableau 5 : Milieux naturels particuliers et impacts potentiels

Abandon de forage

Un forage abandonné constitue un point fragile à long terme et peut être à l'origine de pollutions, voire de désordres géotechniques (mise en communication d'aquifère, provoquer l'hydratation ou la dissolution de formations géologiques sensibles à l'eau).

Dans cette étude, certains rapports d'expertise faisaient mention d'un abandon de puits suite à une fuite constatée sur une SGV. Alors il est nécessaire de se référer aux normes NF X10-999 et NF X10-970 pour connaître la procédure d'abandon.

Commentaires

La réforme de la géothermie de minime importance apporte notamment un appui important à l'application des normes NF X10-970 et NF X10-999 largement citées précédemment. En effet, la définition des zones verte, orange et rouge permettent de déterminer la localisation

des risques majeurs pour une meilleure application des préconisations inscrites dans les normes.

Mais deux autres aspects clés doivent être traités pour limiter encore les risques : l'homogénéité de la cimentation ainsi que sa durabilité. Des travaux de recherche sont en cours sur ces sujets, notamment en Allemagne et en France.

Les aspects de durabilité sont importants à traiter : des études sont menées par le BRGM pour identifier les formulations de coulis qui permettent une bonne tenue aux différences de températures en fonctionnement, ainsi qu'aux autres types d'agressions. Une cimentation qui ne serait pas pérenne entraînerait une augmentation de la probabilité de survenance d'un risque majeur. C'est pour cela que la réforme de la géothermie de minime importance a adopté des spécifications techniques prudentes. Par exemple, il est imposé une limitation basse de température de fonctionnement (-4 °C) de l'installation de pompe à chaleur de façon à limiter le gel de la sonde.

IV. ÉLÉMENTS DE MAÎTRISE DES RISQUES

| | REMÈDE | RÈGLE DE L'ART/SIGNE DE QUALITÉ |
|---|--|--|
| Défaillance PAC | <ul style="list-style-type: none"> - Choix des fournisseurs - Plan de maintenance | <ul style="list-style-type: none"> - PAC NF PAC - Recommandations professionnelles RAGE (conception, mise en œuvre, entretien, neuf et rénovation) - Certification Qualipac, Qualibat série 831 |
| Fuite sur circuit de captage horizontal à eau glycolée | <ul style="list-style-type: none"> - Faire attention au remblaiement - Utilisation de matériaux adaptés | <ul style="list-style-type: none"> - Avis techniques des tubes PEHD dédiés à la géothermie - Recommandations professionnelles RAGE - Certification Qualipac, Qualibat série 831 |
| Fuite sur circuit de captage vertical à eau glycolée | <ul style="list-style-type: none"> - Respect des recommandations de mise en œuvre des fabricants : rayons de courbure notamment - Respect de la cimentation sur la totalité de la longueur du forage - Choix des matériaux des collecteurs et mise en œuvre de regards facilement accessibles | <ul style="list-style-type: none"> - Avis techniques de tubes PEHD dédiés à la géothermie - Recommandations des fabricants - Recommandations professionnelles RAGE - Normes NF X10-960, NF X10-970 - Arrêté du 25 juin relatif aux prescriptions générales applicables aux activités géothermiques de minime importance - Certification Qualiforage, Qualipac, Qualibat série 831 |
| Fuite de fluide frigorigène sur capteur horizontal | <ul style="list-style-type: none"> - Faire attention au remblaiement - Sélection de matériaux adaptés (qualité de cuivre) à une utilisation souterraine - Soudures et brasures de qualité - Respect des règles de mise en œuvre des fabricants | <ul style="list-style-type: none"> - Avis techniques des fabricants de systèmes complets (capteur + PAC + émetteur) - Certification Qualipac, Qualibat série 831 |
| Canalisations non étanches / puits climatique | <ul style="list-style-type: none"> -Utilisation de matériaux adaptés : section interne lisse, rigidité des canalisations,... | <ul style="list-style-type: none"> - Guide technique, programme RAGE |
| Encrassement et corrosion des équipements / PAC eau/eau | <ul style="list-style-type: none"> - Utilisation de matériaux adaptés : échangeurs, pompes immergées,... - Analyses d'eau en phase de conception - plan de surveillance de la qualité de l'eau en exploitation | <ul style="list-style-type: none"> - Recommandations professionnelles RAGE - Normes NF X10-999 - Arrêté du 25 juin relatif aux prescriptions générales applicables aux activités géothermiques de minime importance - Certification Qualiforage, Qualipac, Qualibat série 831 |
| Mauvais dimensionnement de l'installation | <ul style="list-style-type: none"> - Réalisation de bilans thermiques - Réalisation de tests de réponse thermique (installations avec SGV) - Réalisation d'une étude de pérennité de la ressource du sous-sol | <ul style="list-style-type: none"> - Recommandations professionnelles RAGE - Normes NF X10-999, NF X10-960, NF X10-970 - Arrêté du 25 juin relatif aux prescriptions générales applicables aux activités géothermiques de minime importance - Certification Qualiforage, Qualipac, Qualibat série 831 |
| Mauvaise réalisation du forage | <ul style="list-style-type: none"> - Analyse de l'ensemble des formations géologiques - Isolation méthodique de chaque formation géologique - Cimentation sur toute la longueur du forage - Identification des zones à risques et respect des zonages réglementaires | <ul style="list-style-type: none"> - Recommandations professionnelles RAGE - Normes NF X10-999, NF X10-960, NF X10-970 - Arrêté du 25 juin relatif aux prescriptions générales applicables aux activités géothermiques de minime importance - Arrêté du 25 juin 2015 relatif à la carte des zones en matière de géothermie de minime importance - Certification Qualiforage, Qualipac, Qualibat série 831 |

V. CONCLUSION

Dans cette étude, un inventaire des principaux désordres relatifs aux installations géothermiques a été présenté. Malgré un nombre limité de rapports d'expertise analysés, les grandes familles de désordres ont pu être dégagées. La typologie d'installations géothermiques étudiées est :

- PAC eau glycolée /,
- PAC eau /,
- PAC sol /,
- Puits climatiques.

Près de 90 % des désordres concernent des maisons individuelles.

Les désordres proviennent des causes suivantes :

- La PAC dysfonctionne,
- Le circuit de captage est fuyard,
- Le dimensionnement de l'installation n'est pas adapté,
- La mauvaise réalisation du forage peut générer un risque majeur.

Les risques majeurs sont liés à des désordres géotechniques ou à des désordres liés à la pollution des nappes aquifères. L'enjeu de ces désordres est de l'ordre de plusieurs millions d'euros, et leur survenance ne donne pas lieu à des méthodes de remédiation bien établies.

Ces risques ont une fréquence faible. Quelques cas ont été recensés dans l'est de la France. Cela a donné lieu à une réforme de la réglementation entourant les forages de géothermie en 2015. Cette réforme a permis de cerner ces risques majeurs afin de progresser dans leur maîtrise.

Par ailleurs, la publication des documents du Programme RAGE a permis de dégager les premières règles de l'art, prémices du futur DTU 65.16 traitant des installations de pompe à chaleur géothermiques.

En conclusion, l'ensemble des désordres rencontrés peut être limité du fait de l'application des règles de l'art éditées en 2015. Une communication accrue sur celles-ci devrait être réalisée.

Mais la préconisation principale issue de cette étude serait donc de réaliser un suivi de l'application des règles afin d'en estimer l'efficacité.

VI. RÉFÉRENCES

1. Bilan 2015 et perspectives 2016 du génie climatique, fév 2016, Uniclimate.
2. Décret du 8 janvier 2015 (2015-15) relatif à la géothermie de minime importance.
3. Arrêté du 25 juin 2015 relatif à la carte des zones en matière de géothermie de minime importance
4. Arrêté du 25 juin 2015 relatif à l'agrément d'expert en matière de géothermie de minime importance
5. Arrêté du 25 juin 2015 relatif aux prescriptions générales applicables aux activités géothermiques de minime importance
6. Arrêté du 25 juin 2015 relatif à la qualification des entreprises de forage intervenant en matière de géothermie de minime importance
7. La réforme réglementaire de la géothermie de minime importance, in Les Mardis de la DGPR, 19 mai 2015, DGPR/MEDDE.
8. <http://www.geothermie-perspectives.fr/>
9. Tableaux de bord régionaux SYCODÈS, 2013, AQC.
10. Pompes à chaleur géothermiques en habitat individuel – Recommandations professionnelles RAGE – Programme PACTE, 2015.
11. Pompes à chaleur en habitat collectif et tertiaire – Recommandations professionnelles RAGE – Programme PACTE, 2015.
12. Puits climatique – Guide – Programme PACTE, 2015.
13. Impacts potentiels de la géothermie très basse énergie sur le sol, le sous-sol et les eaux souterraines – Synthèse bibliographique, BRGM, 2012.
14. Projets de géothermie en Champagne-Ardenne - Boîte à outils, Direction régionale de l'ADEME, 2015.
15. Sinistres liés aux sondes géothermiques - investigations géologiques, Journée CFGI « La géothermie de minime importance », BRGM, 2015.
16. Risques liés à des ouvrages souterrains non soumis à déclaration - Apport d'expérience de la géothermie de minime importance, BRGM, 2014.
17. Référentiel NF PAC, norme NF 414 révision 9, Certita, avril 2015.
18. Fiche pathologie n° E15, AQC/Fondation Excellence SMA, 2015.
19. Dispositif d'aide à la décision de l'ADEME : un guide pour réaliser un test de réponse thermique de qualité, 2015.
20. NF X 10-960, Forage d'eau et de géothermie - Sonde géothermique verticale Parties 1 & 2, AFNOR, mars 2013
21. NF X 10-970, Forage d'eau et de géothermie - Sonde géothermique verticale (échangeur géothermique vertical en U avec liquide caloporteur en circuit fermé), AFNOR, janvier 2011.
22. 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, AFNOR, août 2014.

VII. LISTE DES FIGURES

■ Figure 1

Échangeur fermé, capteur horizontal

■ Figure 2

Échangeur fermé, sonde géothermique verticale

■ Figure 3

Échangeur fermé, structure géothermique (circulation dans les pieux, radier, parois moulées)

■ Figure 4

Échangeur fermé, corbeille géothermique

■ Figure 5

Échangeur ouvert, prélèvement sur aquifère

■ Figure 6

Échangeur ouvert, prélèvement d'air extérieur

■ Figure 7

Géothermie de haute température, basse température, et basse température de minime importance

■ Figure 8

Carte de France des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance pour doublet sur nappe

■ Figure 9

Évolution du marché des PAC géothermiques (eau/eau + eau glycolée/eau + sol/eau) de 2010 à 2014

■ Figure 10

Évolution du cumul de rapports en fonction du nombre d'années après la date d'ouverture du chantier.

■ Figure 11

Répartition des rapports d'expertise par type d'installation

■ Figure 12

Répartition géographique des rapports d'expertise

■ Figure 13

Répartition des rapports d'expertise pour les PAC eau glycolée/

■ Figure 14

Illustration des désordres à Staufen

■ Figure 15

Échelle de temps d'apparition des désordres dans le Bade-Wurtemberg

■ Figure 16

Cartographie des risques majeurs

VIII. LISTE DES TABLEAUX

■ **Tableau 1**

Récapitulatif des procédures applicables aux différents types de géothermie utilisés

■ **Tableau 2**

Récapitulatif des installations géothermiques traitées

■ **Tableau 3**

Nombre de rapports d'expertise par an de 2005 à 2015

■ **Tableau 4**

Techniques de foration et impacts potentiels pour les SGV et forages d'eau

■ **Tableau 5**

Milieux naturels particuliers et impacts potentiels

