



Administration
de la gestion de l'eau
Grand-Duché de Luxembourg

GUIDE SUR LA GEOOTHERMIE DE FAIBLE ENERGIE AU LUXEMBOURG



Table des matières

1	Introduction	6
2	Définition de la géothermie	7
2.1	Définition	7
2.2	Principe de fonctionnement	8
3	Installations géothermiques de surface.....	10
3.1	Installations géothermiques de très faible profondeur (< 15 m).....	10
3.1.1	Capteurs horizontaux.....	10
3.1.2	Corbeilles géothermiques.....	11
3.1.3	Pieux énergétiques	11
3.1.4	Puits climatique	12
3.2	Installations géothermiques de faible profondeur (15 - 400 m).....	13
3.2.1	Sondes verticales géothermiques	13
4	Géologie et hydrogéologie du Luxembourg	14
4.1	Géologie	14
4.2	Hydrogéologie et eau souterraine	15
5	Installation d'un système géothermique	17
5.1	Planification.....	17
5.2	Installations géothermiques de très faible profondeur (< 15 m).....	18
5.3	Installations géothermiques de faible profondeur (15 - 400 m).....	19
5.3.1	Réalisation d'un forage géothermique	19
5.3.2	Mise en place d'une sonde géothermique.....	20
5.3.3	Injection du ciment de remplissage	21
5.3.4	Contrôle de qualité	22
5.4	Fluide caloporteur.....	23
5.5	Entretien	24
5.6	Mise hors service	24
5.7	Documentation des travaux	24
6	Dangers et risques liés à la géothermie de faible profondeur	26
6.1	Pollution depuis la surface	26
6.2	Hydratation d'une couche d'anhydrite.....	27
6.3	Mise en contact de plusieurs aquifères	28
6.4	Nappe artésienne.....	30
6.5	Risques divers et récapitulatifs	30
7	Procédures administratives	32

7.1	Bases légales.....	32
7.2	Critères de restriction	33
7.2.1	Géothermie de très faible profondeur (< 15 mètres)	33
7.2.2	Géothermie de faible profondeur (>15 mètres)	34
7.3	Demande d'autorisation	35
7.4	Agrément	35
8	Références	37

Liste des figures

Figure 2-1: Différents types d'installations géothermiques (Voith, 2013).	7
Figure 2-2: Température du sous-sol en fonction de la profondeur (Behörde für Umwelt, 2021).....	8
Figure 2-3: Schéma et fonctionnement d'une pompe à chaleur (ADEME, 2019).....	9
Figure 3-1: Capteur horizontal (Brugeo, 2021).	10
Figure 3-2: Corbeille géothermique (Brugeo, 2021).	11
Figure 3-3: Puits climatiques (Brugeo, 2021).	12
Figure 3-4: Sonde verticale géothermique (Brugeo, 2021).....	13
Figure 3-5: Pieux énergétiques (Brugeo, 2021).....	13
Figure 3-6: Pieux énergétiques (Uponor-Geothermie, 2013).....	14
Figure 4-1: Carte géologique du Grand-Duché de Luxembourg (SGL, 2009).....	14
Figure 4-2: Coupe géologique du Luxembourg (SGL).....	15
Figure 4-3: Différents types d'aquifères : a) Aquifère poreux, b) Aquifère fissuré c) Aquifère karstique (Wasserwirtschaft, 2021).	16
Figure 5-1: Valeurs obtenues pour des roches saturées du Luxembourg (Tom Schintgen, 2014).	18
Figure 5-2: Exemple d'un capteur horizontal (gauche) et d'une corbeille géothermique (droite) (Altechgeothermie, 2021) (GeoClim, 2021).	19
Figure 5-3: Exemple d'une réalisation d'un forage géothermique (E-Therm, 2021).	20
Figure 5-4: Exemple de la mise place d'une sonde dans le trou de forage. Le pied de la sonde est lesté (E-Therm, 2021).	21
Figure 5-5: Cimentation complète du forage, le ciment est visible depuis la surface (Ebert, 2018).....	22
Figure 6-1: Pollution des eaux de surface par débordement de la benne de récupération des boues de forages.	26
Figure 6-2: La transformation de l'anhydrite en gypse, entraînant une augmentation du volume et dans le cas extrême une élévation du terrain en surface (www.stuttgarter-zeitung.de, 2014).	27
Figure 6-3: La transformation de l'anhydrite en gypse a entraîné une élévation de la surface et a causé des dommages sur des bâtiments à Staufen (BZ-Redaktion, 2019) (Risse Staufen, 2011).	28

Figure 6-4: Connexion de différentes nappes d'eaux souterraines par un forage peut avoir un impact négatif sur l'état qualitatif et quantitatif des eaux souterraines d'un aquifère (www.stuttgarter-zeitung.de, 2014). 29

Figure 6-5: Connexion de différentes nappes d'eaux souterraines. Une remontée de la nappe inférieure entraîne une augmentation du niveau supérieur jusqu'à une inondation en surface (www.stuttgarter-zeitung.de, 2014)..... 29

Figure 6-6: La foration d'une nappe artésienne a entraîné une remontée d'eau souterraine et de boue de forage en surface à Wiesbaden en 2009 (Spiegel, 2009). 30

Liste des tableaux

Tableau 1: Récapitulatif des différents risques et leurs impacts potentiels (Moeck, Weber, & Schintgen, 2021)..... 31

Liste des abréviations

PAC	Pompe à chaleur
AGE	Administration de la gestion de l'eau
SVG	Sonde verticale géothermique
COP	Coefficient de performance
PEHD	Polyéthylène haute densité
SEBES	Syndicat des eaux du barrage d'Esch-sur-Sûre
SIA	Société suisse des ingénieurs et des architectes
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
SGL	Service géologique de Luxembourg
AEV	Administration de l'environnement
EIE	Evaluation des incidences sur l'environnement

1 Introduction

Dans le contexte actuel du réchauffement climatique, l'utilisation des énergies fossiles doit être revue à la baisse de façon significative afin de réduire les impacts sur l'environnement, notamment les émissions de gaz à effet de serre. Le développement des énergies renouvelables et durables représente une opportunité pour diminuer l'utilisation de ces énergies fossiles et de lutter contre les rejets de CO₂ dans l'atmosphère.

Au Luxembourg, la production d'énergie renouvelable, notamment par des installations géothermiques, devient de plus en plus populaire et permet de produire de la chaleur et du froid.

Le présent guide sur la géothermie de faible énergie a pour objectif de présenter les différentes installations géothermiques existantes et d'expliquer les contraintes, obligations et restrictions, indiquées dans les autorisations relatives à l'eau, qui se révèlent être nécessaires pour protéger les ressources en eau souterraine. Il s'adresse aux maîtres d'ouvrage, aux bureaux d'études, aux entreprises de forage et aux particuliers, qui souhaitent avoir recours à la géothermie.

Tout d'abord, la géothermie de faible énergie (0 - 400 mètres) sera expliquée et les règles de l'art en vigueur pour la réalisation et l'exploitation des différentes installations géothermiques de surface seront détaillées.

Ensuite, le contexte géologique et les principaux aquifères du Luxembourg seront décrits. Les différents risques et dangers de la géothermie de faible énergie pour les eaux souterraines seront également présentés et permettront de mieux illustrer les raisons pour lesquelles des restrictions sont parfois imposées localement pour certaines installations géothermiques.

Enfin, les différentes démarches administratives relatives aux demandes d'autorisation, conformément à l'article 23, paragraphe 1^{er}, lettres m) et n), de la loi modifiée du 19 décembre 2008 relative à l'eau, seront indiquées.

2 Définition de la géothermie

2.1 Définition

La géothermie est par définition l'étude de l'énergie thermique de la Terre et de la technologie de récupération de cette énergie. Une installation géothermique permet de capter l'énergie terrestre dans le sous-sol pour la transformer à des fins de chauffage/refroidissement ou de productions d'électricité (Foucault, 2010). Il existe trois types de géothermie différenciés en fonction de la profondeur (Figure 2-1) :

- La géothermie de faible énergie (inférieure à 400 mètres de profondeur),
- la géothermie de moyenne profondeur (entre 400 et 3.000 mètres de profondeur),
- la géothermie de grande profondeur (supérieure à 3.000 mètres de profondeur),

Dans le présent guide, la géothermie de surface est divisée en deux parties en fonction de la profondeur :

- La géothermie de très faible profondeur (inférieure à 15 mètres de profondeur),
- la géothermie de faible profondeur (entre 15 et 400 mètres de profondeur),

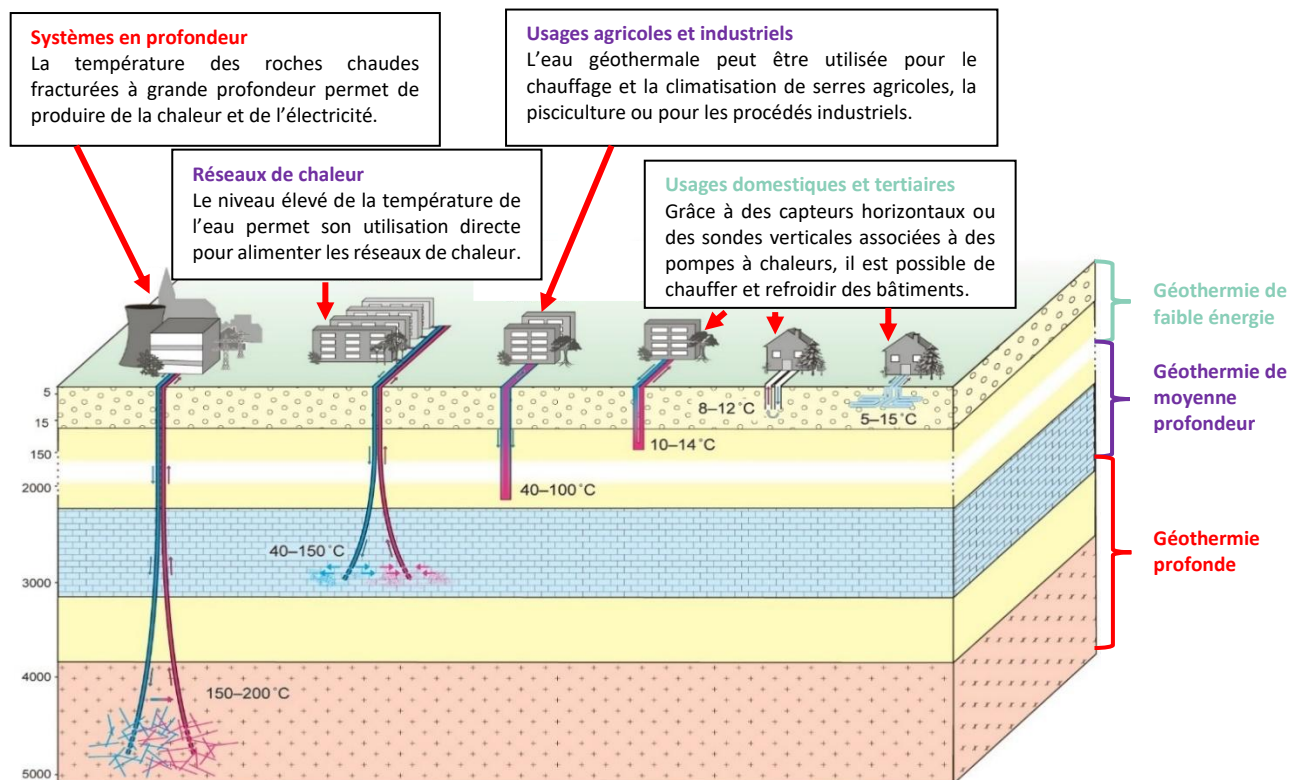


Figure 2-1: Différents types d'installations géothermiques (Voith, 2013).

2.2 Principe de fonctionnement

L'exploitation de la chaleur du sous-sol se fait par des sondes installées verticalement ou horizontalement dans le sous-sol. Sur les quinze premiers mètres de profondeur, la température fluctue fortement en fonction de la température extérieure, qui est essentiellement dépendante du rayonnement solaire, du vent et de l'infiltration de la pluie, qui réchauffent les premiers mètres du sous-sol. À partir de 15 mètres, l'influence saisonnière prend fin et le flux géothermique dit terrestre, dirigé des profondeurs de la Terre vers la surface, détermine la température (Figure 2-2). Avec la profondeur, la température augmente progressivement sous l'influence du gradient géothermique, qui est en moyenne de 3°C par 100 mètres, mais qui peut être inférieure ou supérieure selon les conditions géologiques rencontrées (geo.fr, 2009).

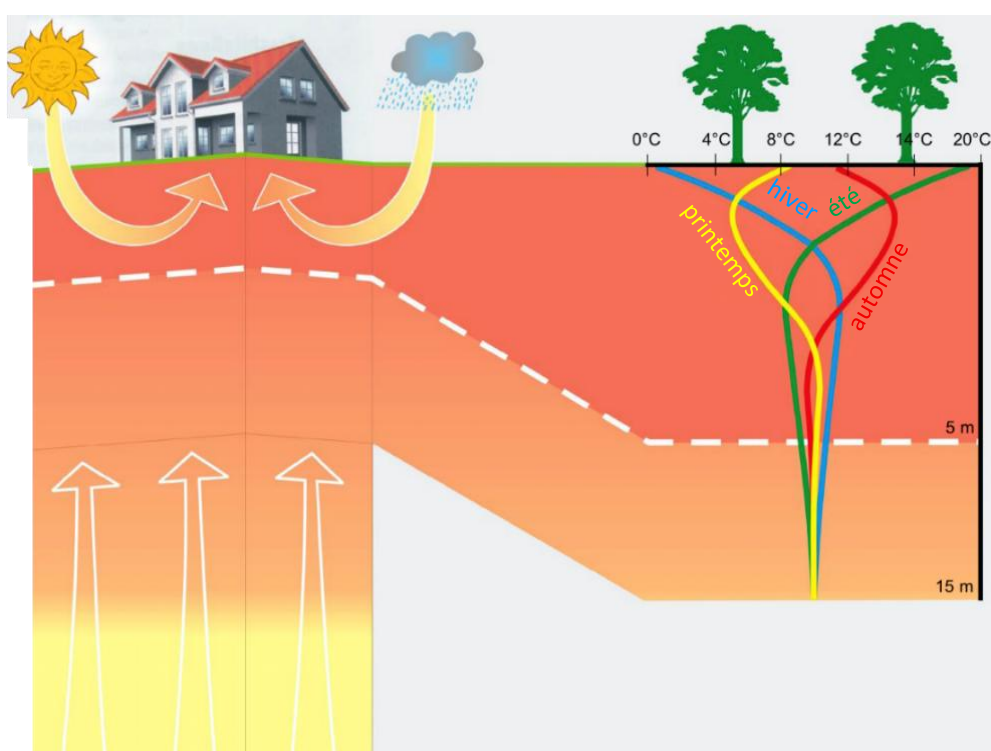
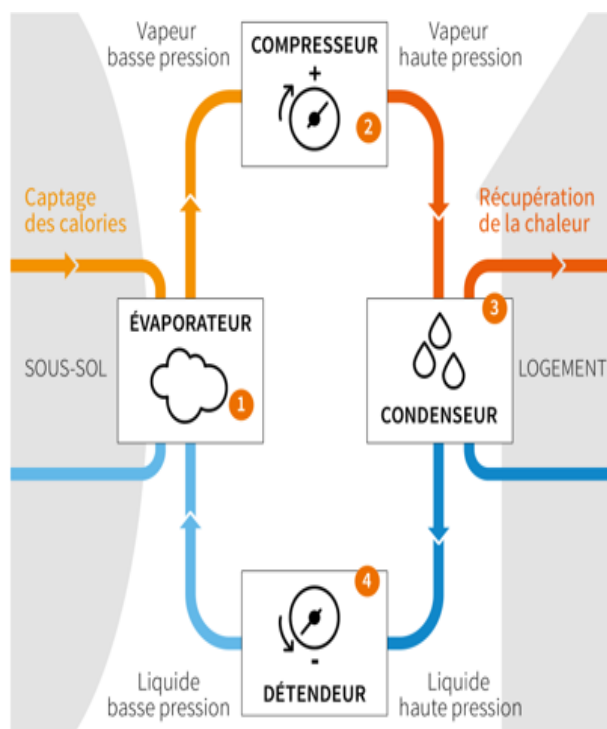


Figure 2-2: Température du sous-sol en fonction de la profondeur (Behörde für Umwelt, 2021).

Lorsque la température rencontrée dans le sous-sol est inférieure à 30°C, la valorisation ne peut pas se faire par simple échange de chaleur, mais une pompe à chaleur (PAC) est requise pour fournir une chaleur suffisante au système de chauffage des bâtiments. Les sondes installées dans le sous-sol, qui récupèrent les calories par échange thermique, sont raccordées à une pompe à chaleur, qui transforme à son tour ces calories en chaleur ou en froid.

La PAC est composée de plusieurs éléments dont les quatre principaux sont l'évaporateur, le compresseur, le condenseur et le détendeur (Figure 2-3) (AFPG, 2021). Les sondes dans le sous-sol sont parcourues par un **fluide caloporteur**, qui est généralement composé d'une eau glycolée (mélange d'eau et d'antigel) afin d'éviter le gel. Ce fluide récupère les calories du sous-sol et les transfère par un échangeur thermique à un fluide frigorigène de la pompe à chaleur :



1. Évaporation

Le fluide frigorigène est évaporé à basse pression et à basse température, en utilisant les calories récupérées par le système géothermique.

2. Compression

La vapeur du fluide frigorigène est comprimée à une pression supérieure au moyen d'un compresseur électrique, ce qui entraîne une élévation de la température.

3. Condensation

La vapeur du fluide frigorigène à haute pression est condensée à haute température pour transmettre cette chaleur au milieu à chauffer (plancher chauffant, radiateurs, ventilo-convecteurs, etc.).

4. Détente

Après le passage du détendeur, la pression passe d'une pression élevée à une pression basse. Il s'en suit une chute de la température et un nouveau cycle de la pompe à chaleur recommence.

Figure 2-3: Schéma et fonctionnement d'une pompe à chaleur (ADEME, 2019).

Le système peut également être **réversible**. À l'aide d'une pompe à chaleur réversible, le cycle du fluide frigorigène est inversé. Il est donc possible de prélever la chaleur du bâtiment en été (refroidissement) pour la rejeter dans le sous-sol et de la réutiliser pour le chauffage en hiver (ADEME, 2019).

Le rendement ou la performance énergétique d'une pompe à chaleur est mesuré en calculant son **coefficient de performance (COP)**. Le coefficient de performance correspond au rapport entre la chaleur restituée pour le chauffage et l'électricité consommée pour faire fonctionner la pompe à chaleur. Le COP est dépendant de l'écart de température entre celle prélevée du sous-sol et celle, qui est nécessaire pour chauffer le bâtiment (Marcheteau, 2017) :

$$COP = \frac{\text{Puissance thermique fournie}}{\text{Puissance électrique nécessaire}}$$

Un COP de 3 signifie que la pompe à chaleur restitue 3 kWh de chauffage pour 1 kWh d'électricité consommé. Plus le COP est élevé, plus le système est performant.

3 Installations géothermiques de surface

3.1 Installations géothermiques de très faible profondeur (< 15 m)

3.1.1 Capteurs horizontaux

Les capteurs horizontaux ou échangeurs horizontaux sont constitués de tuyaux en PEHD installés en boucles. Ils sont enterrés horizontalement à une faible profondeur pour récupérer la plus grande quantité de chaleur (Figure 3-1). Les tuyaux sont installés à la profondeur hors gel de la région, qui varie entre 1,2 à 1,6 mètres. Dans les tuyaux, l'eau glycolée¹ circule en circuit fermé jusqu'à une pompe à chaleur.

Le principal inconvénient de ces installations est qu'il nécessite une superficie relativement importante de terrain. L'installation des capteurs horizontaux nécessite un terrain d'une surface 1 à 2 fois plus grande que la surface habitable pour être efficace (BRGM, 2021).

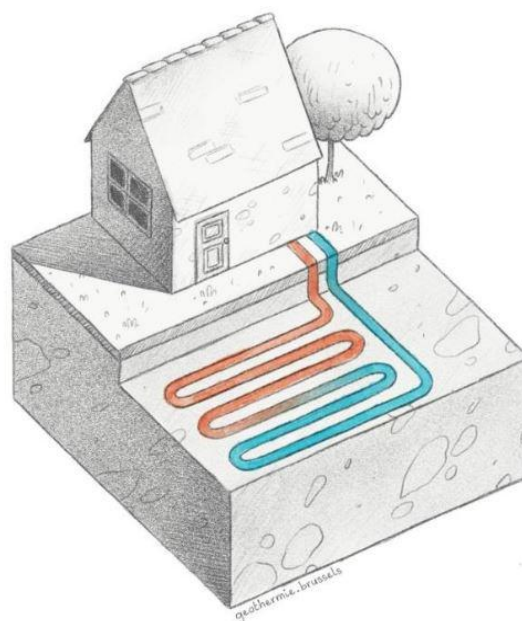


Figure 3-1: Capteur horizontal (Brugeo, 2021).

¹ L'eau glycolée est une eau avec un pourcentage de glycol afin que cette eau ne puisse pas geler. Le glycol est de l'éthylène glycol ou du propylène glycol.

3.1.2 Corbeilles géothermiques

Les corbeilles géothermiques ou les échangeurs compacts, sont constitués de tuyaux d'environ 50 m de long, ayant la forme d'un cône ou d'un cylindre, qui résiste au gel (Figure 3-2). Le fluide caloporteur circule en circuit fermé dans le tuyau et absorbe la chaleur du sol environnant. Le fluide caloporteur circule vers le bas dans un tube spiralé pour récupérer la chaleur du sol, puis remonte vers le haut au centre de la corbeille. Au moyen d'un échangeur de chaleur, le fluide caloporteur transfère son énergie thermique à la pompe à chaleur. Les corbeilles géothermiques sont installées à une profondeur comprise entre 1 et 10 mètres, en-dessous du point hors gel de la région. (BRGM, 2021).

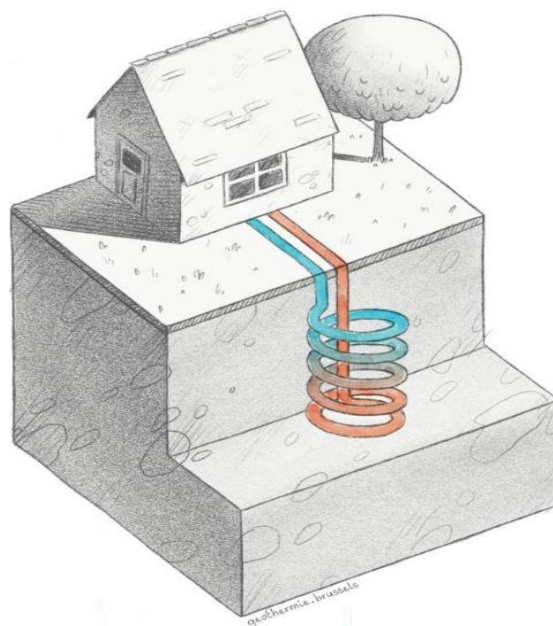


Figure 3-2: Corbeille géothermique (Brugeo, 2021).

3.1.3 Pieux énergétiques

Les pieux énergétiques ou fondations géothermiques offrent la possibilité de reporter en profondeur la charge d'une construction et d'échanger en même temps la chaleur avec le sous-sol. Ils jouent donc un double rôle – le rôle structurel de fondation de bâtiment et le rôle thermique d'échangeur de chaleur avec le sous-sol (Figure 3-3). En principe, les exigences statiques pour les fondations d'un bâtiment présentent le point central de la construction des pieux énergétiques. Le réseau de tubes en polyéthylène haute densité, dans lequel circule le fluide caloporteur, est directement intégré dans les fondations d'un bâtiment. Les pieux sont installés lors de la construction du bâtiment et leur profondeur peut fortement varier (généralement <25 m). L'énergie extraite est acheminée jusqu'à la pompe à chaleur. Ce système a l'avantage de ne pas nécessiter de forages additionnels autres que les pieux prévus pour le système de fondation. Le fonctionnement de l'installation se déroule sur un cycle annuel, avec l'extraction de la chaleur du sol pendant la saison de chauffage en hiver (injection de froid) et l'extraction de froid pendant la période de climatisation en été (injection de chaleur) (Figure 3-4) (BRGM, 2021).

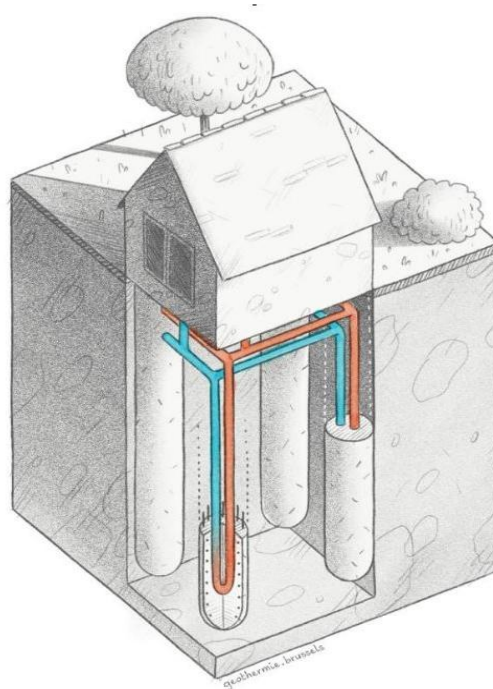


Figure 3-3: Pieux énergétiques (Brugeo, 2021).

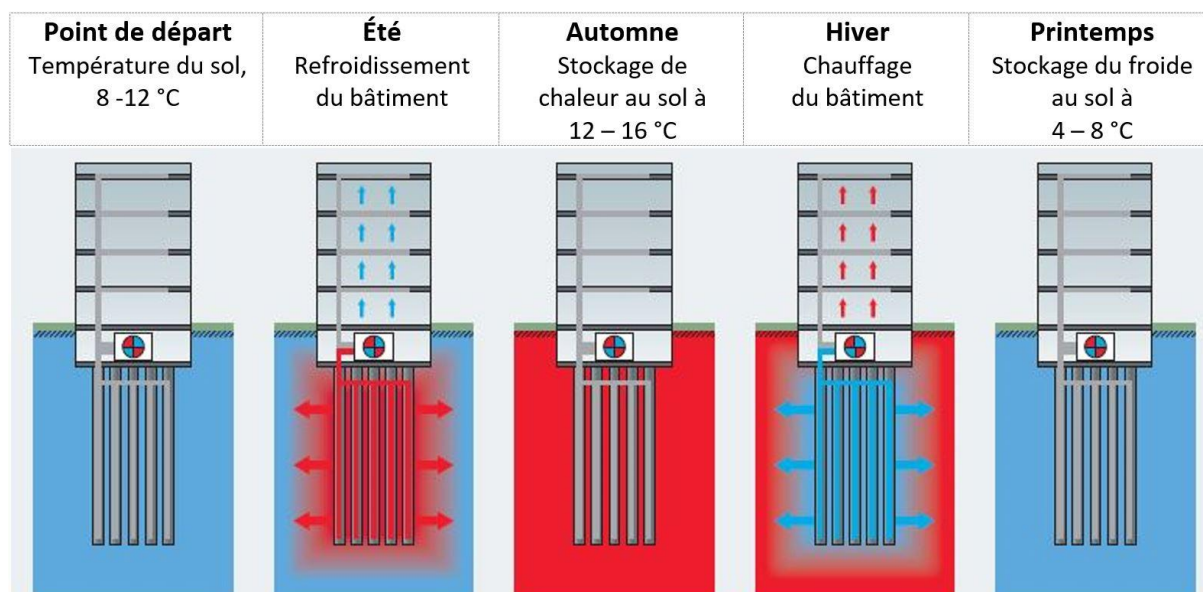


Figure 3-4: Pieux énergétiques (Uponor-Geothermie, 2013).

3.1.4 Puits climatique

Le principe de fonctionnement du puits climatique est de faire circuler l'air extérieur dans des tubes enterrés. Au contact du sol, l'air gagne ou perd des calories et pénètre dans l'habitat par l'intermédiaire d'une ventilation. Le puits climatique permet d'alimenter un bâtiment en air tempéré en le faisant circuler dans une conduite enterrée à une profondeur généralement comprise entre 1 et 2 mètres. Selon les conditions climatiques, l'air est refroidi ou préchauffé grâce à la quasi-stabilité de la température du sol au cours des saisons à partir de quelques mètres de profondeur (Figure 3-5) (Soldielec, 2021).

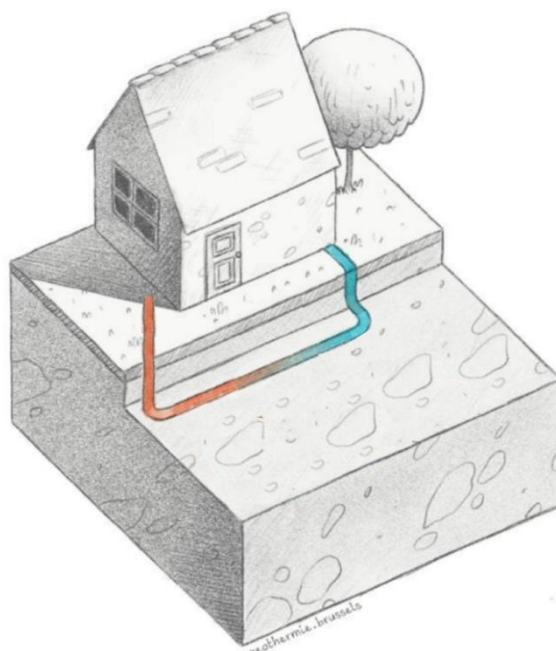
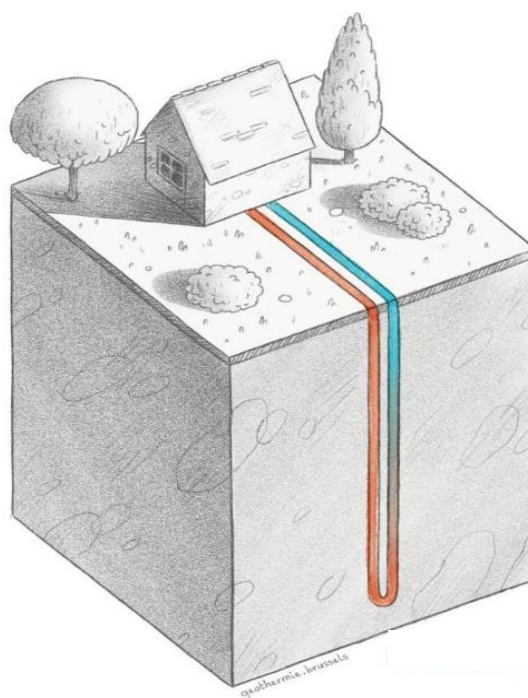


Figure 3-5: Puits climatiques (Bruege, 2021).

3.2 Installations géothermiques de faible profondeur (15 - 400 m)

3.2.1 Sondes verticales géothermiques

Les installations les plus fréquemment utilisées pour l'extraction d'énergie géothermique sont les sondes verticales géothermiques (SVG). Les SVG sont composées d'une sonde dans laquelle circule un fluide caloporteur, positionnée dans un forage d'environ 150 mm de diamètre, pouvant atteindre une profondeur de 400 mètres (Figure 3-6. En général, chaque sonde est composée d'une boucle de tubes en U (ou double U) en polyéthylène haute densité (PEHD). Le fluide caloporteur récupère la chaleur du sous-sol par conduction thermique et est acheminé jusqu'à la pompe à chaleur. Le fluide circule en circuit fermé dans la sonde. Le trou de forage est rempli avec un ciment spécial pour maintenir l'échangeur en place et faciliter les échanges thermiques avec le sous-sol ainsi que pour le protéger.



On parle de champ de sondes lorsqu'un nombre élevé de sondes sont mises en place (ADEME, 2019). *Figure 3-6: Sonde verticale géothermique (Brugeo, 2021).*

4 Géologie et hydrogéologie du Luxembourg

4.1 Géologie

Géologiquement, le Grand-Duché de Luxembourg est séparé en deux grandes régions naturelles distinctes. L'Eisleck au nord et le Gutland au sud du pays. Ces deux entités géologiques sont séparées par une flexure et faille marginale orientée selon un axe NE-SO (Figure 4-1).

L'Eisleck est caractérisé par l'affleurement des terrains paléozoïques fortement plissés. Le sous-sol est constitué de roches schisto-gréseuses du Dévonien inférieur, dont l'âge est compris entre 359 à 419 millions d'années (SGL). Ce sont les roches les plus anciennes du Luxembourg. Les schistes et grès du Dévonien ne contiennent que localement des eaux souterraines.

Le Gutland, qui est situé sur la bordure nord-est du bassin de Paris, se compose de terrains de l'ère du Mésozoïque recouvrant en discordance le socle Paléozoïque. Le Gutland est constitué par les dépôts du Trias et du Jurassique (allant du plus vieux au plus jeune) – Buntsandstein, Muschelkalk, Keuper, Lias et Dogger. Il s'agit des sédiments marins, qui ont été déposés il y a environ 250 à 170 millions d'années. Ces dépôts comportent une alternance de roches dures (grès ou dolomies) et de roches tendres (marnes ou argilites). Les ensembles durs sont souvent poreux et/ou fortement fissurés et sont donc perméables à l'eau et constituent des aquifères. Les roches tendres sont peu poreuses et fissurées. Elles sont de nature argileuses et marneuses, donc peu perméables à l'eau, et constituent des aquitards. Dans le Gutland, les différentes couches présentent un pendage général vers le sud-ouest et le paysage résulte de l'érosion différentielle des couches dures et tendres (Figure 4-2) (Lucius, 1951).

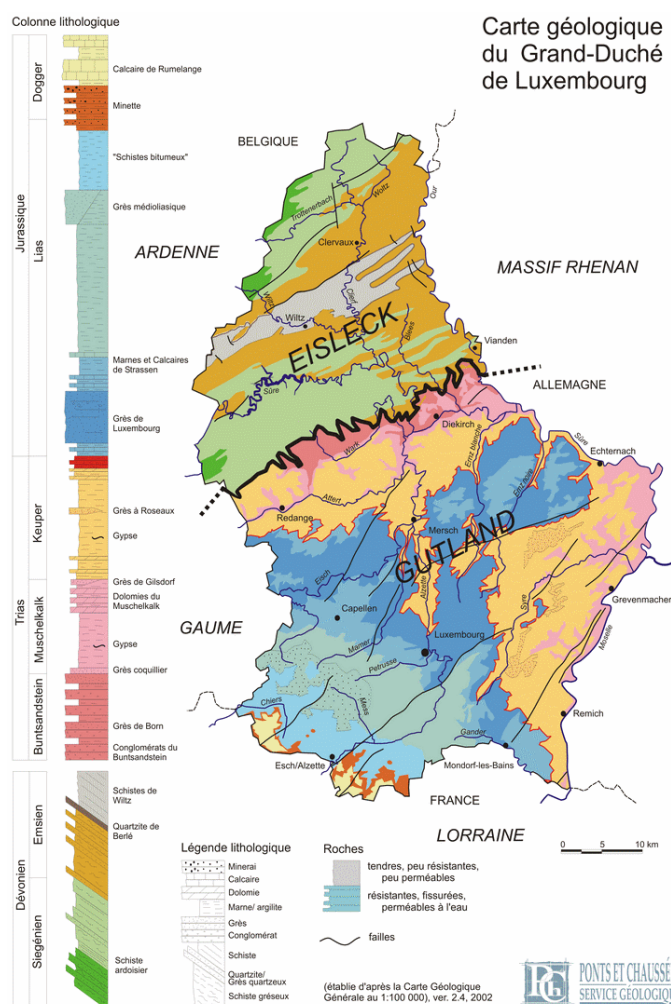


Figure 4-1: Carte géologique du Grand-Duché de Luxembourg (SGL, 2009).

Nord/Nord-Est

Sud/Sud-Ouest

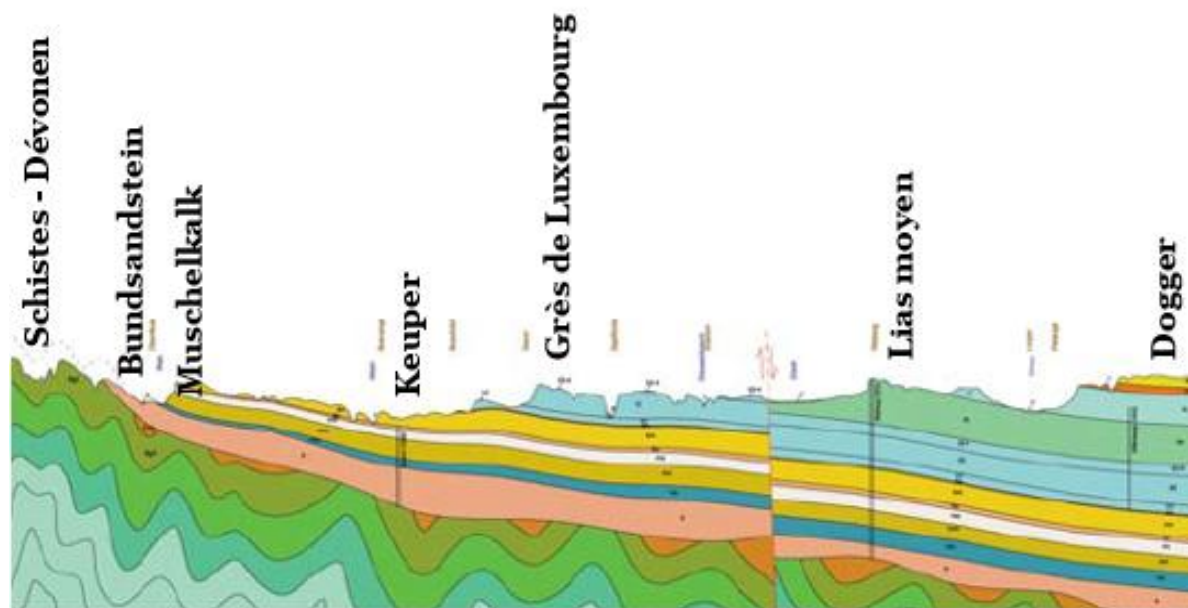


Figure 4-2: Coupe géologique du Luxembourg (SGL).

4.2 Hydrogéologie et eau souterraine

Une formation géologique ayant les caractéristiques de transporter et de stocker des eaux souterraines est appelée aquifère. Il existe trois différents types d'aquifères (Figure 4-3) :

- Les **aquifères poreux** (a) sont composés de roches sédimentaires qui peuvent être meubles (sables, graviers) ou dures (calcaire). Les eaux souterraines peuvent circuler librement entre les grains. Ces aquifères sont généralement caractérisés par de faibles vitesses d'écoulement, une grande capacité de stockage et de bonnes propriétés de filtration de l'eau souterraine (Figure 4-3-a).
- Les **aquifères fissurés** (b) sont caractérisés par un écoulement des eaux souterraines le long des fractures, failles, fissures ou diaclases de la roche. Les écoulements des eaux souterraines sont rapides (Figure 4-3-b).
- Les **aquifères karstiques** (c) résultent d'un processus complexe de karstification et d'évolution au cours du temps. La karstification se fait par dissolution des roches carbonatées ou sulfatées (calcaire, dolomie) ce qui agrandit les discontinuités tectoniques et stratigraphiques. La circulation des eaux souterraines se fait dans ces cavités, résultant de la dissolution des roches carbonatées ou sulfatées. Les écoulements des eaux souterraines sont très rapides et les aquifères karstiques sont de ce fait très sensibles à la pollution (Figure 4-3-c).

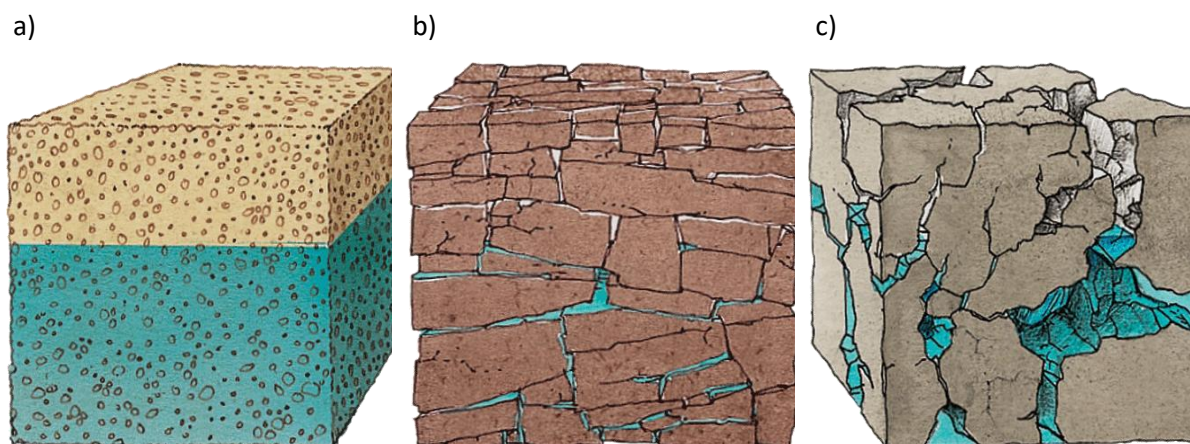


Figure 4-3: Différents types d'aquifères : a) Aquifère poreux, b) Aquifère fissuré c) Aquifère karstique (Wasserwirtschaft, 2021).

Le Luxembourg possède de nombreuses formations géologiques ayant les caractéristiques d'être des aquifères, dont les principaux sont constitués par les formations conglomératiques du Buntsandstein (so), les dolomies du Muschelkalk supérieur (mo1 & mo2) et le grès du Lias inférieur, le Grès de Luxembourg (li2).

Le **Buntsandstein** est constitué de roches gréseuses et conglomératiques en alternance avec des marnes et siltites. Les eaux souterraines peuvent circuler par les pores de la matrice sableuse et graveleuse ainsi que le long de fissures et de failles.

Le **Muschelkalk** est principalement composé de couches dolomitiques ou calcaires dolomitiques séparées par des interlits marneux. Cet aquifère présente une perméabilité de fissures en raison des nombreuses fissures qui entaillent la matrice dolomitique/calcaire et montre un début de karstification avec la dissolution de la dolomie et du calcaire.

Le **Grès de Luxembourg** est constitué d'un grès à ciment calcaire. Cette formation est un aquifère à double perméabilité (perméabilité de pores et perméabilité de fissures). En effet, l'eau souterraine circule soit le long des vides créés par la fissuration de la roche (crevasses, diaclases), soit dans la matrice sableuse induite par la dissolution du ciment calcaire. Les eaux circulent dans les pores de la roche avec des vitesses lentes.

Les eaux souterraines jouent un rôle très important dans l'approvisionnement en eau potable au Luxembourg. Environ la moitié de la production des eaux destinées à la consommation humaine provient des eaux souterraines.

Au Luxembourg, l'aquifère le plus important est l'aquifère du **Grès de Luxembourg**. En effet, environ 75 % des ressources en eaux souterraines, qui sont utilisées pour la production d'eaux destinées à la consommation humaine, proviennent de cet aquifère.

5 Installation d'un système géothermique

5.1 Planification

Pour la planification de l'installation d'un système géothermique, il est important de connaître la géologie, la conductivité thermique² et la capacité thermique volumétrique³ du sous-sol ainsi que les températures requises dans le circuit de chauffage. Ce n'est qu'alors que l'extraction de chaleur peut être bien calculée et que le système peut être dimensionné de façon optimale. Une mauvaise planification peut avoir non seulement un impact négatif sur l'environnement, mais peut aussi entraîner des frais, voire l'impossibilité d'exploiter à court ou moyen terme les installations. Le sous-dimensionnement ou le surdimensionnement d'une installation peut endommager le système et augmenter les coûts lors de l'exploitation.

Il est tout d'abord important de tenir compte d'un certain nombre de paramètres et informations pour la planification des forages géothermiques. Il est fréquent que les forages ne soient pas parfaitement verticaux, mais présentent des déviations latérales plus ou moins importantes en fonctions des techniques de forages. Pour éviter que plusieurs sondes géothermiques verticales s'influencent mutuellement, une distance minimale de 6 mètres entre différents forages géothermiques doit être respectée (VDI-4640-Blatt2, 2015) (Fraunhofer-IEG, 2022). Pour pouvoir respecter cette distance par rapport aux voisins, une distance minimale de 3 mètres par rapport à la limite de la propriété doit être respectée. Pour des forages plus profonds, des distances plus grandes sont recommandées, car ils peuvent présenter des déviations latérales plus importantes. Ces distances minimales doivent impérativement être respectées sachant qu'il est fortement recommandé de prévoir une marge de manœuvre supplémentaire pour s'assurer du bon fonctionnement sur le long terme des installations géothermiques.

L'utilisation des systèmes géothermiques doit être planifiée de manière à ce que la quantité de chaleur extraite puisse être fournie en continu par la conductivité thermique du sous-sol. Cet équilibre dans le sous-sol est déterminé par la conductivité thermique et la capacité thermique volumétrique, qui sont dépendantes du type de roche et des teneurs en eau (Figure 5-1). Plus ces valeurs sont élevées, plus l'échange thermique est important et plus le fonctionnement du système est optimisé.

² La conductivité thermique correspond à la capacité de diffuser la chaleur à travers un matériau.

³ La capacité thermique volumétrique correspond à la capacité d'un matériau à stocker la chaleur par rapport à son volume.

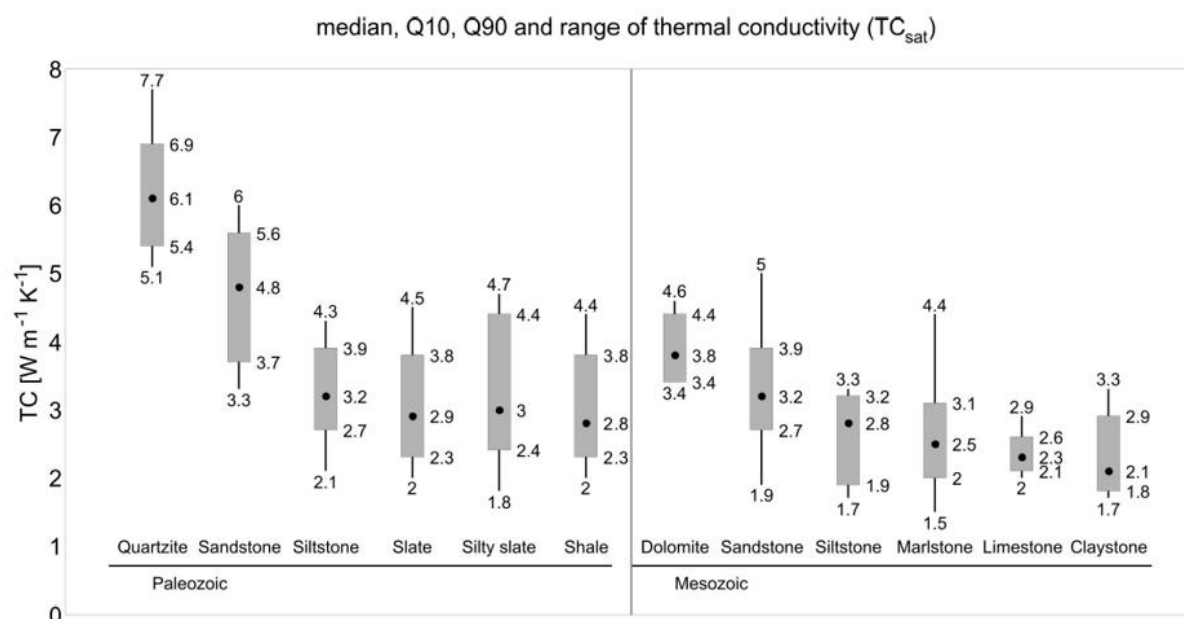


Figure 5-1: Valeurs obtenues pour des roches saturées du Luxembourg (Tom Schintgen, 2014).

La planification, la construction et l'exploitation d'un système géothermique doivent être réalisées conformément aux normes **VDI-4640 feuille 2**, **SIA 384/6:2021** ou équivalent, afin d'assurer le bon fonctionnement de l'installation, de garantir une bonne protection des eaux souterraines et de l'environnement.

5.2 Installations géothermiques de très faible profondeur (< 15 m)

À l'aide d'une pelle mécanique ou d'une trancheuse de sol, des tranchées ou des fouilles peuvent être excavées pour enterrer les capteurs de très faible profondeur (Figure 5-2).

Pour éviter tout dommage des tuyaux ou collecteurs, ceux-ci doivent être enfouis dans un sol sans pierres. La zone au-dessus des collecteurs ne doit pas être construite (ombragée et bétonnée), pour garantir l'efficacité du système, et des plantes et arbres à racines profondes, qui peuvent endommager les tuyaux, ne doivent pas y être plantés.

Afin d'augmenter l'efficacité du système, une infiltration ciblée d'eau de pluie devrait avoir lieu au-dessus des capteurs.

Un test de pression avant et après l'enterrement est recommandé pour exclure tous dégâts éventuels des tuyaux.



Figure 5-2: Exemple d'un capteur horizontal (gauche) et d'une corbeille géothermique (droite) (Altechgeothermie, 2021) (GeoClim, 2021).

5.3 Installations géothermiques de faible profondeur (15 - 400 m)

5.3.1 Réalisation d'un forage géothermique

Une fois que l'autorisation nécessaire pour la réalisation d'un forage géothermique est obtenue (voir chapitre 7.4 *demande d'autorisation*), le forage peut être réalisé (Figure 5-3). Les principales techniques utilisées pour les forages géothermiques sont le forage au marteau fond de trou (fluide de forage : air comprimé et l'eau) et le forage rotary (fluide de forage : eau avec des additifs de forage). Le fluide de forage est injecté à travers la tige de forage jusqu'à la tête de forage. Ce mélange remonte ensuite à la surface par l'espace annulaire⁴. Les débris de forage (cuttings) sont évacués lors de la remontée du mélange vers une benne de récupération. En général, un forage géothermique a un diamètre de 150 millimètres.

Les travaux de forage sont à réaliser par du personnel qualifié et une société de forage certifiée suivant **DVGW W120-2 ou équivalent**. Une attention particulière doit être prise lors de la mise en place du chantier et pendant tout le processus de forage, afin d'éviter toute dégradation des eaux souterraines et de l'environnement. L'équipement de forage et le personnel travaillant sur le chantier doivent remplir des exigences particulières et doivent être équipés et pouvoir réagir de façon rapide et adéquate pour toutes les situations géologiques imprévues, comme la présence d'une nappe artésienne, des phénomènes de gonflement (anhydrite-gypse), la présence de vides ou de crevasses.

⁴ Espace entre la tige de forage et la paroi du forage.



Figure 5-3: Exemple d'une réalisation d'un forage géothermique (E-Therm, 2021).

Le début de la réalisation du forage est à annoncer au moins deux semaines avant l'exécution des travaux à l'Administration de la gestion de l'eau (autorisations@eau.etat.lu).

Si pendant la foration, des phénomènes tels qu'une perte totale de la boue de forage⁵, ou la rencontre de cavités importantes, etc., apparaissent, les travaux de forage sont à arrêter immédiatement et une concertation avec l'AGE (autorisations@eau.etat.lu) s'impose.

Dans le cas où une connexion entre différents niveaux de nappe a été créée lors de la réalisation du forage, les travaux sont à arrêter immédiatement et le trou de forage est à remplir selon les règles de l'art (bouchon de bentonite⁶) à une hauteur d'au moins 20 mètres à partir du toit de l'aquifère le plus profond à protéger (Voir chapitre 6.3 *Mise en contact de plusieurs aquifères*).

En cas d'abandon du forage, un colmatage est à effectuer selon les règles de l'art par une société spécialisée. La méthodologie de colmatage est à transmettre au moins deux semaines avant l'exécution des travaux à l'Administration de la gestion de l'eau (autorisations@eau.etat.lu).

Tout imprévu doit être signalé à l'AGE autorisations@eau.etat.lu.

5.3.2 Mise en place d'une sonde géothermique

Avant la mise en place d'une sonde géothermique dans le trou de forage, un test de pression de la sonde est recommandé pour exclure tout éventuel dégât de la sonde lors du transport et du stockage. Ce test permet d'empêcher qu'une sonde endommagée soit installée.

Dès que le test de pression⁶ et le trou de forage ont été réalisés, la sonde géothermique peut être installée. Dans la plupart des cas, il s'agit d'une sonde double en forme d'un U, avec un pied lesté, qui

⁵ La boue de forage désigne un fluide de composition spécifique utilisé dans le domaine de la prospection minière moderne qui permet de refroidir une sonde, remonter les sédiments, et maintenir les parois du forage.

⁶ Argile, qui gonfle fortement au contact de l'eau.

est déroulée à partir d'une bobine (Figure 5-4). Avec la sonde, un tuyau de remplissage est également inséré dans le trou de forage.

La sonde doit répondre à des exigences particulières : elle doit être résistante aux contraintes chimiques, thermiques et mécaniques, et également être étanche au fluide caloporteur et aux eaux souterraines. Enfin, elle doit être durable et sa durée de vie doit atteindre au moins 50 ans. En général, la sonde est en polyéthylène de haute densité d'un diamètre de 32 millimètres. Les composés de la sonde doivent être conformes aux critères de qualité indiqués dans la norme **VDI 4640 feuille 2** ou **équivalent**.



Figure 5-4: Exemple de la mise place d'une sonde dans le trou de forage. Le pied de la sonde est lesté (E-Therm, 2021).

5.3.3 Injection du ciment de remplissage

Avant de commencer le processus d'injection, la sonde doit être entièrement remplie d'eau et fermée de façon à résister à la pression, pour éviter tout risque d'écrasement. La sonde ne doit en aucun cas être comprimée lors de l'injection du ciment de remplissage. Une telle compression provoquerait un endommagement de la sonde et réduirait fortement sa durée de vie et son fonctionnement.

Une fois que la sonde est remplie d'eau, bien fermée et équipée d'un manomètre (contrôle de pression lors de la cimentation), l'espace annulaire du trou de forage doit être entièrement rempli par un mélange durcissant (mélange de bentonite et de ciment). Le remplissage se fait par un tuyau de remplissage spécial, qui a été mis en place lors de l'installation de la sonde. Le ciment de remplissage est injecté impérativement depuis le fond du trou de forage jusqu'à la surface, afin de minimiser la présence de vides dans la cimentation (Fraunhofer-IEG, 2022). Un remplissage depuis la surface n'est pas autorisé. Le processus de remplissage est terminé lorsque le mélange s'écoule librement à la surface et qu'aucune baisse au niveau du ciment dans le trou de forage n'est observé (Figure 5-5).

La cimentation d'une sonde géothermique dans les règles de l'art est une étape extrêmement importante à mettre en œuvre soigneusement, afin de garantir une bonne performance et une

longévité de la sonde, mais également pour protéger les eaux souterraines. En effet, seul un remplissage de qualité, sans vide, assure un bon contact entre la sonde et le sous-sol. Les propriétés thermiques du matériau de remplissage ont un impact important sur le rendement de l'installation, car elles jouent le rôle de transfert thermique.

Par ailleurs, une bonne cimentation permet d'empêcher que l'eau superficielle ne s'infilte depuis la surface vers les eaux souterraines, ou qu'une éventuelle nappe artésienne ne remonte vers la surface.

Une étanchéité incorrecte représente un risque par rapport aux eaux souterraines et peut entraîner la pollution de celles-ci par l'arrivée d'eaux de surface contaminées, ou encore par la mise en contact de plusieurs nappes d'eaux souterraines, présentes à des profondeurs différentes et possédant des propriétés et qualités différentes.

Le matériau de remplissage est généralement livré « prêt à l'emploi » sous forme d'un mélange de ciment et de bentonite sec. Le ciment et la bentonite sont mélangés avec de l'eau pour former un mélange homogène (Ciment standard : 100 kg de bentonite + 200 kg de ciment + 900 L d'eau). Ce mélange doit conserver des caractéristiques constantes tout au long de la phase d'injection. Il est important que les indications du fabricant concernant la densité du mélange soient respectées.



Figure 5-5: Cimentation complète du forage, le ciment est visible depuis la surface (Ebert, 2018).

La quantité de mélange est à comparer au volume théorique du trou de forage. Si la quantité de mélange injectée est supérieure au double du volume du trou de forage, le remplissage est à arrêter et la suite est à discuter avec l'AGE (autorisations@eau.etat.lu). Des cavités ou des fissures peuvent provoquer une telle perte de cimentation. Dans ce cas, une augmentation de la densité des ciments est conseillée.

5.3.4 Contrôle de qualité

Un des points les plus importants pour garantir une qualité suffisante aux installations géothermiques est que le personnel en charge soit qualifié et les matériaux utilisés certifiés. Le respect des normes

DVGW-120-2 et **VDI 4604-02** ou équivalent est essentiel pour le bon fonctionnement de l'installation et la protection de l'environnement, en particulier la protection des eaux souterraines.

Étant donné que la sonde géothermique en tant que telle est entièrement installée dans le sol, et que d'éventuels défauts ne sont pas visibles, le contrôle de qualité de la sonde après l'injection du ciment de remplissage est primordial pour le maître d'ouvrage. La preuve d'un remplissage (cimentation) de qualité peut se faire par différents contrôles et tests.

Le premier critère de qualité est le contrôle de la densité et du volume du remplissage. Les indications du fabricant doivent être respectées pour assurer une prise optimale du ciment. Lors de la cimentation, il est possible d'utiliser des appareils pour mesurer en continu la densité et le débit. Ce contrôle permet d'attester la qualité et la quantité du matériau mis en œuvre. Cette vérification ne permet toutefois pas de conclure de façon certaine que le remplissage de la sonde a été effectué dans les règles de l'art. Avec ces appareils, on peut vérifier si une densité constante est respectée en continu lors du remplissage. Une fois que le mélange est injecté dans le trou de forage, la quantité injectée (volume) est à comparer au volume théorique du forage (Fraunhofer-IEG, 2022).

Un autre contrôle peut se faire par l'essai de débit, qui est effectué à une pression prédéfinie dans la sonde. Pendant le test, la pression est mesurée à l'entrée et à la sortie de la sonde. Si la sonde est écrasée (par exemple, si le ciment de remplissage est trop dense), elle aura une résistance supplémentaire à l'écoulement pendant l'essai.

L'essai de pression de la sonde dépend de la densité du ciment de remplissage et de la profondeur du forage. Une fois que la sonde est mise sous pression, elle s'allonge légèrement dans le ciment encore liquide, ce qui entraîne une légère baisse de la pression. Si la sonde était endommagée, la pression chuterait rapidement.

5.4 Fluide caloporteur

Le fluide caloporteur est injecté dans les sondes ou tuyaux et est chargé de transporter la chaleur depuis le sous-sol vers la pompe à chaleur et vice-versa. En général, le fluide caloporteur est composé d'un mélange de 75 % d'eau et de 25 % d'éthylène-glycol. Ce mélange permet de garantir que la sonde ne gèle pas, même sous l'effet d'un important prélèvement de chaleur en hiver lorsque la température de restitution après la pompe à chaleur tombe en-dessous de 0 °C.

Il existe aussi la possibilité d'utiliser un fluide caloporteur constitué à 100 % d'eau. La décision d'utiliser l'eau comme fluide caloporteur doit être prise en compte dès le début des planifications, car le dimensionnement des sondes dépend du choix du liquide caloporteur. L'eau, utilisée comme fluide caloporteur, a de nombreux avantages : elle a un meilleur coefficient de performance (COP), une plus faible viscosité qu'une eau glycolée, un coût moins élevé, respecte l'environnement et enfin ne présente aucun risque pour les eaux souterraines. Pour garantir qu'une exploitation des installations hors gel soit toujours réalisable, les sondes doivent être plus longues (30 %) et le mélange de cimentation doit avoir une capacité thermique plus élevée. (Suisse-énergie, 2018) (Erdsondenoptimierung, 2010).

Les tuyaux des installations géothermiques de très faible profondeur sont également remplis d'un mélange d'eau glycolée pour éviter que les tuyaux ne gèlent.

Avant le remplissage de la sonde par le fluide caloporteur, une purge complète des sondes avec de l'eau est recommandée. Le rinçage des sondes est important pour évacuer d'éventuelles particules présentes à l'intérieur du système, et ainsi prévenir une diminution de la productivité et de la durée de vie.

5.5 Entretien

Les installations géothermiques de surface ne requièrent pas d'entretien conséquent. La pression du fluide caloporteur et la pompe à chaleur doivent être contrôlées une fois par an. Tous les 10 ans, les protections contre le gel et la corrosion de l'élément caloporteur sont à vérifier (SIA384/6, 2021) (VDI-4640-Blatt2, 2015).

5.6 Mise hors service

En cas de mise hors service définitive d'une installation géothermique, les sondes doivent être rincées à l'eau et le fluide caloporteur, lorsque celui-ci est différent de l'eau pure, doit être récupéré et éliminé correctement sans porter préjudice à l'environnement : il ne doit en aucun cas être rejeté dans le sous-sol ou sur le sol. Tous les tubes de sonde doivent être remplis avec de l'eau ou un mélange ciment-bentonite. La méthodologie est à convenir avec l'Administration de la gestion de l'eau (autorisations@eau.etat.lu) au moins **deux semaines avant la réalisation des travaux**.

Pour les installations géothermiques de très faible profondeur, il est recommandé d'excaver les tuyaux enterrés dans le sous-sol. Si une excavation des tuyaux n'est pas possible, les tuyaux doivent être rincés à l'eau et le fluide caloporteur doit être éliminé conformément aux prescriptions précitées.

5.7 Documentation des travaux

L'ensemble des travaux et opérations, permettant d'installer un système géothermique, doit être documenté dans le but d'assurer un contrôle de la qualité au requérant, au maître d'ouvrage et aux administrations.

Les travaux de forage, l'installation de la sonde et le remplissage doivent ainsi être documentés et un rapport doit être établi pour chaque forage. Le rapport est à remettre à l'AGE au plus tard **un mois après la fin des travaux (autorisations@eau.etat.lu)**, et doit contenir les informations suivantes :

- Un plan du site avec les coordonnées LUREF du/des forage(s)
- Le levé détaillé des couches géologiques atteintes avec la réalisation d'un log géologique par forage et d'une coupe géologique,
- La profondeur finale et le diamètre du forage,
- L'équipement du forage,
- L'indication des niveaux des nappes dans chaque forage,
- L'identification des couches géologiques et des aquifères, en précisant les conditions captives, libres ou artésiennes de chaque niveau de nappe rencontré, les relations éventuelles entre les différents niveaux,

Guide sur la géothermie de faible énergie au Luxembourg

- Un plan illustrant les directions d'écoulement de la nappe au repos,
- Les résultats des tests de pression des sondes avant et après le remplissage du ciment,
- Le volume, le type et la densité de la cimentation,
- Le type et la composition du fluide caloporteur,
- La méthodologie du colmatage du forage en cas d'abandon.

Un tableau récapitulatif, disponible sous le lien <http://www.geologie.lu/opendata/bdgeo/bdgeo-echange.zip>, est à compléter et à transmettre à l'Administration de la gestion de l'eau (potable@eau.etat.lu) au plus tard un mois après la fin des travaux.

6 Dangers et risques liés à la géothermie de faible profondeur

Avant la conceptualisation et la réalisation d'une installation géothermique, il est important de considérer qu'un forage représente toujours une ouverture du milieu souterrain et que celui-ci traverse différents niveaux géologiques et parfois différentes nappes d'eaux souterraines. Par conséquent, un forage est susceptible de mettre en contact différents milieux (surface, formations géologiques, aquifères), qui présentent des caractéristiques physiques, chimiques, etc. différentes et qui étaient initialement, et sans l'intervention humaine, indépendants les uns des autres.

Dans certaines conditions, la réalisation d'un forage représente une source de pollution et peut être à l'origine d'instabilités géologiques, notamment lorsque l'étanchéité du forage ou l'isolement des différents milieux traversés ne sont pas garantis.

Dans les chapitres suivants, les différents risques liés à la réalisation de forages géothermiques seront expliqués en détail.

6.1 Pollution depuis la surface

La réalisation d'un forage n'est pas sans risque pour les différents milieux naturels présents à proximité des travaux (sol, sous-sol, eaux superficielles, eaux souterraines). Les risques de pollution sont notamment liés au rejet accidentel de substances telles que les lubrifiants, carburants, graisses, huiles et/ou boues de forages. Ces déversements sont généralement accidentels et résultent de fuites d'engins ou de machines de chantiers, de défauts d'entretien de ces engins ou machines ou encore d'accidents. Une fuite d'une de ces substances peut altérer la qualité des eaux souterraines et/ou eaux de surface (Figure 6-1).



Figure 6-1: Pollution des eaux de surface par débordement de la benne de récupération des boues de forages.

Un forage non-étanche peut créer une connexion directe entre les eaux de surface et les eaux souterraines, empêchant ainsi la filtration naturelle des eaux de surface au travers des différentes couches, qui constituent le sol et le sous-sol. Dans ce cas, des eaux superficielles, potentiellement polluées et d'une composition chimique différente de celle des eaux souterraines, peuvent facilement atteindre des profondeurs importantes et peuvent dégrader la qualité des eaux souterraines.

6.2 Hydratation d'une couche d'anhydrite

Un forage peut modifier les conditions hydrauliques et créer de nouveaux chemins de circulation pour les eaux souterraines. En cas de contact entre des couches d'anhydrite⁷ et des venues d'eau souterraine ou superficielle, l'anhydrite se transforme en gypse, ce qui a pour conséquence un gonflement de la couche géologique, avec une augmentation de volume pouvant aller jusqu'à $\pm 61\%$.

La pression, qui résulte de ce gonflement peut non seulement détruire ou endommager la sonde géothermique et/ou le forage, mais aussi avoir des conséquences parfois désastreuses en surface. Un écrasement ou un dommage de la sonde peut provoquer une fuite du fluide caloporteur (pollution de la nappe et du sol) et/ou avoir une diminution du rendement énergétique, ce qui a comme conséquence un abandon de l'installation.

Dans des cas extrêmes, les pressions de gonflement peuvent entraîner des gonflements de terrain à la surface et endommager, parfois sévèrement, des habitations, bâtiments ou infrastructures (Figure 6-2). L'élévation de la surface peut atteindre facilement plusieurs centimètres, voire décimètres.

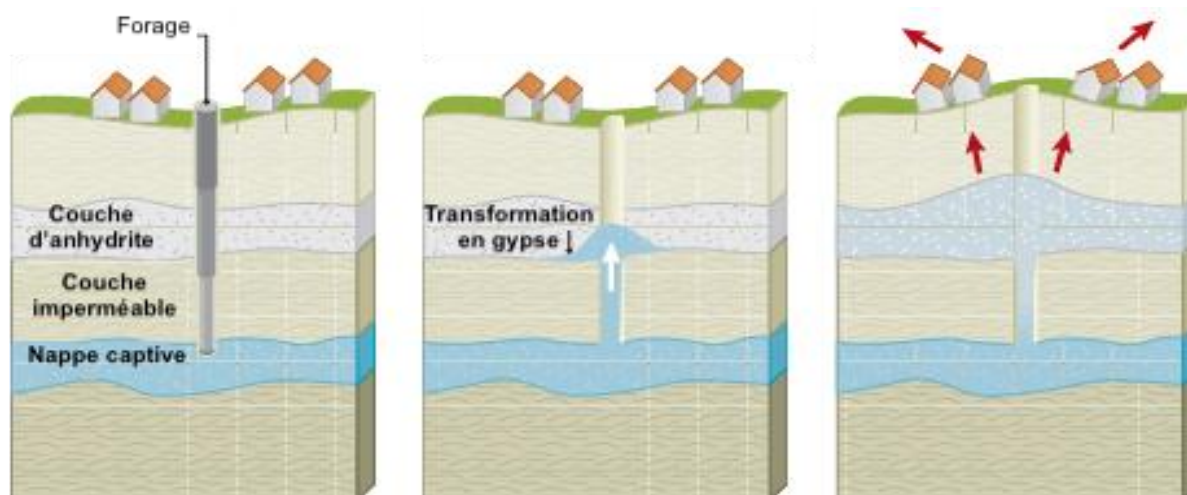


Figure 6-2: La transformation de l'anhydrite en gypse, entraînant une augmentation du volume et dans le cas extrême une élévation du terrain en surface (www.stuttgarter-zeitung.de, 2014).

⁷ Roche saline constituée de sulfate de calcium (CaSO_4) déshydraté.

En 2007, 7 sondes verticales géothermiques (140 mètres de profondeur) ont été installées autour de la mairie de Staufen en Allemagne (Bade-Wurtemberg) et ont mis en contact une couche d'anhydrite avec une nappe captive. Quelques semaines après les travaux de forage, des premières fissures sont apparues dans les maisons qui étaient situées à proximité. Une élévation de la surface de 1 cm/mois a été constatée et en 2012, l'élévation a atteint environ 35 cm. La transformation de l'anhydrite en gypse a entraîné une élévation du terrain, ce qui a endommagé de nombreuses habitations à Staufen (Figure 6-3). Les coûts des dégâts pour les bâtiments ont été estimés entre 42 et 50 millions d'euros (Gombert, Laihaie, & Auxane, 2017).



Figure 6-3: La transformation de l'anhydrite en gypse a entraîné une élévation de la surface et a causé des dommages sur des bâtiments à Staufen (BZ-Redaktion, 2019) (Risse Staufen, 2011).

La géologie du Gutland luxembourgeois étant très comparable à celle du Bade-Wurtemberg, un tel accident n'est pas impossible dans notre pays.

6.3 Mise en contact de plusieurs aquifères

La connexion entre plusieurs aquifères, qui sont naturellement séparés par une couche imperméable, est susceptible d'avoir un impact négatif sur l'état qualitatif et/ou l'état quantitatif des eaux souterraines d'un aquifère et peut modifier les conditions hydrauliques des aquifères (Figure 6-4, gauche).

En effet, le mélange de deux nappes d'eaux souterraines, de qualités différentes, peut entraîner une dégradation de la qualité de l'eau d'un des aquifères, notamment dans le cas où une des nappes est contaminée ou encore présente une minéralisation nettement plus élevée.

Dans le cas de nappes libres⁸, une modification hydraulique peut provoquer un écoulement de la nappe supérieure dans la nappe inférieure (Figure 6-4, milieu). Un tel écoulement vers l'aquifère inférieur peut provoquer une déstabilisation du terrain à la surface et peut engendrer des dommages des infrastructures ou bâtiments (Figure 6-4, droite). De plus, un tel écoulement de la nappe supérieure dans la nappe inférieure, entraîne la baisse du niveau de la nappe supérieure et peut avoir pour conséquence d'assécher des puits, des forages ou encore des sources et mettre en péril la sécurité d'approvisionnement de certaines communes ou syndicats d'eau potable.

⁸ Nappe libre: nappe à surface libre, comprise dans un aquifère qui comporte une zone non saturée de caractéristiques semblables à celles de la zone saturée, et une zone de fluctuation (Castany, 1977).

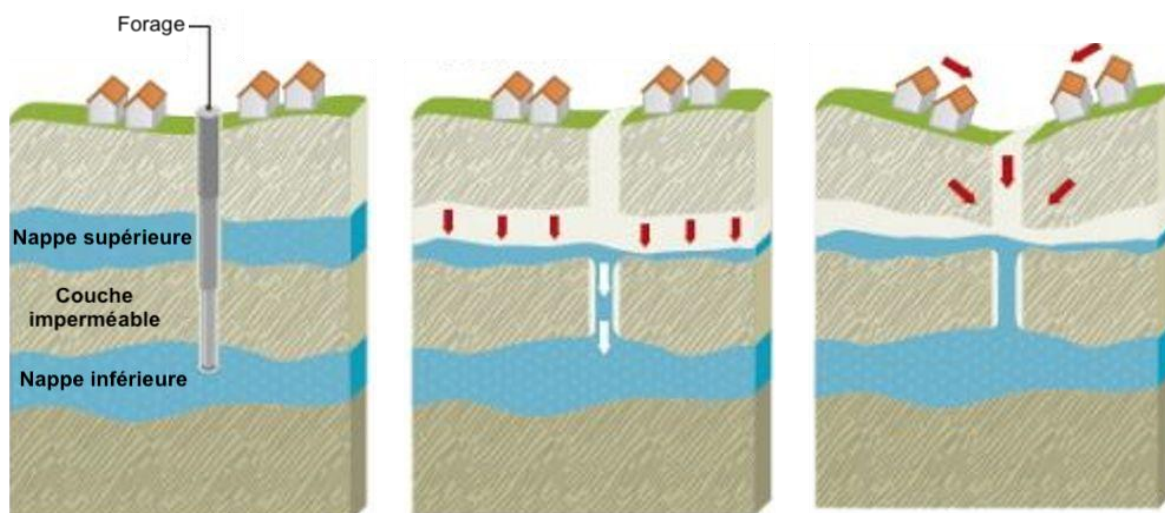


Figure 6-4: Connexion de différentes nappes d'eaux souterraines par un forage peut avoir un impact négatif sur l'état qualitatif et quantitatif des eaux souterraines d'un aquifère (www.stuttgarter-zeitung.de, 2014).

Dans le cas où la nappe inférieure est captive⁹, c'est-à-dire qu'elle est sous pression et emprisonnée entre deux horizons peu perméables, une fois qu'un trou de forage aura été fait, la nappe inférieure pourra remonter. (Figure 6-5). Une augmentation du niveau de la nappe supérieure peut entraîner des inondations.

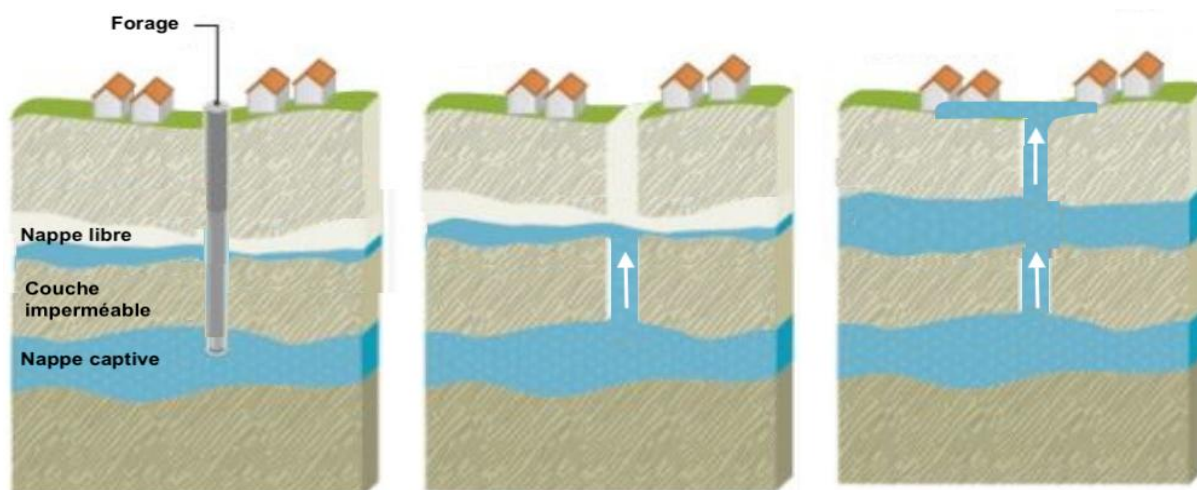


Figure 6-5: Connexion de différentes nappes d'eaux souterraines. Une remontée de la nappe inférieure entraîne une augmentation du niveau supérieur jusqu'à une inondation en surface (www.stuttgarter-zeitung.de, 2014).

Pour les raisons évoquées ci-dessus, il est essentiel d'éviter de créer toute connexion permanente entre différents niveaux des eaux souterraines, car les effets peuvent être irréversibles et catastrophiques.

⁹ Nappe captive, sans surface libre, soumise en tous points à une pression supérieure à la pression atmosphérique, et dont la surface piézométrique est supérieure au toit de l'aquifère.

6.4 Nappe artésienne

Une nappe d'eau souterraine artésienne est emprisonnée entre deux horizons peu perméables et est caractérisée par une pression hydrostatique telle que l'eau jaillit en surface lorsqu'un forage pénètre dans la nappe.

Une remontée d'eau souterraine en surface entraîne par ailleurs une diminution de la pression hydraulique de l'aquifère, et peut déstabiliser le sous-sol. De plus, une remontée d'eau peut entraîner des pollutions en surface par les boues de forage ou matériaux de remplissage, qui sont évacués du trou de forage. En cas de remontée importante, des inondations peuvent également se produire en surface et endommager des bâtiments et/ou des infrastructures, si l'eau ne peut pas être évacuée rapidement ou si un colmatage du forage n'est pas possible en raison d'une forte pression de la nappe (Figure 6-6).



Figure 6-6: La foration d'une nappe artésienne a entraîné une remontée d'eau souterraine et de boue de forage en surface à Wiesbaden en 2009 (Spiegel, 2009).

6.5 Risques divers et récapitulatifs

Certains risques pour les eaux souterraines peuvent se cumuler si les travaux ne sont pas réalisés conformément aux normes. Le tableau suivant présente les principaux risques et leurs conséquences, lorsque les précautions nécessaires ne sont pas prises en considération.

Tableau 1: Récapitulatif des différents risques et leurs impacts potentiels (Moeck, Weber, & Schintgen, 2021).

Risques	Impacts potentiels
Aquifères superposés	<ul style="list-style-type: none"> Mise en contact de différents aquifères pouvant entraîner une dégradation de l'état qualitatif et/ou quantitatif d'aquifères
Artésianisme	<ul style="list-style-type: none"> Mise en contact de différents aquifères Rejets non-maîtrisables en surface (inondations)
Mouvements de terrain	<ul style="list-style-type: none"> Endommagement des installations (diminution du rendement énergétique) Défaut d'étanchéité du forage
Conditions géologiques particulières (karst, milieu fissuré, cavités)	<ul style="list-style-type: none"> Perte de fluide de forage → abandon du forage Cimentation imparfaite → défaut d'étanchéité du forage
Roche non consolidée	<ul style="list-style-type: none"> Affaissement du trou de forage → abandon du forage
Couches à anhydrite ou gypse	<ul style="list-style-type: none"> Mouvement de terrain (gonflement, affaissement) Déstabilisation du terrain
Sols et eaux pollués	<ul style="list-style-type: none"> Infiltration des polluants et contaminations des aquifères
Zones inondables	<ul style="list-style-type: none"> Infiltration des eaux de surface vers les aquifères
Sous-sol riche en sulfates ou eau acide	<ul style="list-style-type: none"> Dégradation de la cimentation → défaut d'étanchéité du forage et mise en contact de différents aquifères
Défaut d'étanchéité du forage	<ul style="list-style-type: none"> Mise en contact de différents aquifères pouvant entraîner une dégradation de l'état qualitatif et/ou quantitatif d'un ou plusieurs aquifères Fuite du fluide caloporteur → pollution de la nappe
Matériau inapproprié	<ul style="list-style-type: none"> Mise en contact de différents aquifères pouvant entraîner une dégradation de l'état qualitatif et/ou quantitatif des aquifères Fuite du fluide caloporteur → pollution de la nappe
Abandon de l'installation géothermique sans colmatage	<ul style="list-style-type: none"> Risque de dégradation de la cimentation → Mise en contact de différents aquifères Fuite du liquide caloporteur → pollution des nappes

7 Procédures administratives

7.1 Bases légales

Au Luxembourg, différentes bases légales sont à considérer avant de concevoir toute installation géothermique.

Selon le paragraphe 1^{er}, lettres m) et n), de l'article 23 de la loi modifiée du 19 décembre 2008 relative à l'eau, les travaux ou activités suivantes sont **soumis à autorisation** :

- *La soustraction d'énergie thermique à partir des eaux de surface et souterraines,*
- *Le rejet d'énergie thermique vers les eaux de surface et souterraines,*

Conformément aux points 4.3 et 5.6, de l'annexe I, du [règlement grand-ducal modifié du 9 juillet 2013](#) relatif aux mesures administratives dans l'ensemble des zones de protection pour les masses d'eau souterraine ou parties de masses d'eau souterraine servant de ressource à la production d'eau destinée à la consommation humaine, les installations suivantes sont **interdites** :

- *Construction, extension substantielle, transformation substantielle et exploitation d'installations avec interventions dans la nappe phréatique,*
- *Installation, extension et exploitation de pompes à chaleur, de sondes et de capteurs géothermiques,*

Selon le point 78 (Énergie thermique) de l'annexe IV, du règlement grand-ducal modifié du 15 mai 2018 établissant les listes de projets soumis à une évaluation des incidences sur l'environnement, tombent dans le champ d'application de la loi modifiée du 15 mai 2018 relative à l'évaluation des incidences sur l'environnement (loi EIE) :

- *Un ou plusieurs forages géothermiques en profondeur, sur un site, d'une puissance d'absorption thermique totale des sondes supérieures à 30 kW*

Dans ce cas, le projet de forages géothermiques est soumis à une vérification préliminaire selon la loi EIE, suite à laquelle l'autorité compétente décide si une EIE est requise ou non. Plus d'informations sur la procédure EIE se trouvent sur le site : FAQ: Evaluation des incidences sur l'environnement (EIE) - Portail de l'environnement - emwelt.lu - Luxembourg (public.lu).

7.2 Critères de restriction


Afin de permettre de développer la géothermie, tout en garantissant une protection suffisante et adéquate de nos ressources en eau souterraine, des restrictions peuvent être appliquées.

7.2.1 Géothermie de très faible profondeur (< 15 mètres)

La carte d'admissibilité des installations géothermiques de très faible profondeur fixe les limites d'utilisation de ces installations, en délimitant des régions où l'implantation des alternatives est interdite, autorisée ou soumise à des restrictions (géoportail : <https://bit.ly/3WlvoJT>).

Installations géothermiques de très faible profondeur (< 15 m) interdites

Etant donné la présence de zones de protection immédiate (**zone I**), rapprochée (**zone II**) et rapprochée à vulnérabilité élevée (**zone II-VI**), qui sont délimitées pour protéger les captages d'eau souterraine utilisés pour la production d'eaux destinées à la consommation humaine, les installations de très faible profondeur (< 15 mètres) sont interdites.

 Installations géothermiques de très faible profondeur (< 15 m) soumises à autorisation. Seuls les fluides caloporteurs indiqués dans la « [Positivliste](#) » de la LAWA (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser) sont autorisés

La profondeur des installations géothermiques de très faible profondeur est limitée dans les zones de protection éloignée pour ne pas intervenir dans la nappe utilisée pour la production d'eau destinée à la consommation humaine et garantir une distance de sécurité minimale de 20 mètres par rapport à la nappe utilisée pour la consommation humaine. La profondeur maximale de ces installations doit être déterminée par un bureau d'études spécialisé en géologie.

Installations géothermiques de très faible profondeur (< 15 m) soumises à autorisation

En raison de la très forte probabilité de trouver des eaux souterraines à faible profondeur, les installations géothermiques de très faible profondeur (< 15 m) sont soumises à autorisation.

Pas d'autorisation relative à l'eau nécessaire pour les installations géothermiques de très faible profondeur (< 15 m)


Dans ces régions, une autorisation n'est pas nécessaire selon la loi modifiée du 19 décembre 2008 relative à l'eau.

7.2.2 Géothermie de faible profondeur (>15 mètres)

La carte d'admissibilité des forages de faible profondeur fixe les limites d'utilisation des sondes verticales géothermiques en délimitant des régions où l'implantation de SVG est interdite, autorisée ou soumise à des restrictions (géoportail : <https://bit.ly/3Psz626>).

Forages géothermiques strictement interdits

Dans les zones de protection autour de captages d'eaux souterraines, qui sont utilisés pour la production d'eau destinée à la consommation humaine, l'implantation de sondes géothermiques verticales (SVG) est strictement interdite (voir chapitre 7.1. *Bases légales*). La protection des eaux souterraines destinées à la consommation humaine au niveau des zones de protection est primordiale pour le bon état qualitatif et quantitatif des eaux souterraines utilisées pour la consommation humaine.

 **Forages géothermiques soumis à autorisation. La profondeur maximale est limitée afin d'éviter toute connexion hydraulique entre différents aquifères. Seuls les fluides caloporteurs indiqués dans la « [Positivliste](#) » de la LAWA (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser) sont autorisés**

L'implantation des SVG est limitée en profondeur pour pouvoir protéger les aquifères, qui sont exploités pour la production d'eau destinée à la consommation humaine. En effet, il est indispensable d'éviter toute connexion hydraulique entre différents niveaux de nappes (voir chapitre 6.3 *Mise en contact de plusieurs aquifères*). Une distance minimale de 20 mètres par rapport au toit de l'aquifère à protéger est absolument à respecter. La profondeur maximale de ces installations doit être déterminée par un bureau d'études spécialisé en géologie.

 **Forages géothermiques soumis à autorisation. Seuls les fluides caloporteurs indiqués dans la « [Positivliste](#) » de la LAWA (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser) sont autorisés.**

Dans les zones de protection du lac de la Haute-Sûre, les forages géothermiques sont soumis à autorisation.

 **Forages géothermiques soumis à autorisation avec une profondeur maximale limitée à 120 mètres**

Dans ces zones, les forages géothermiques sont soumis à autorisation avec une profondeur maximale limitée à 120 mètres de profondeur.

 **Forages géothermiques soumis à autorisation sans limitation de profondeur**

Dans ces zones, les forages géothermiques sont soumis à autorisation sans restriction spécifique de profondeur.

7.3 Demande d'autorisation

Après s'être assuré qu'une installation géothermique soit envisageable (carte d'admissibilité des forages géothermiques de faible profondeur et carte d'admissibilité des installations de très faible profondeur), une demande d'autorisation est à introduire conformément à l'article 23 de la loi modifiée du 19 décembre 2008 relative à l'eau.

Les requérants peuvent remplir leur demande d'autorisation relative à l'eau, soit via guichet.public.lu (transfert du dossier à l'Administration de la gestion de l'eau), soit en version papier en utilisant les formulaires disponibles sur le site <https://eau.gouvernement.lu> (Annexes III à V).

Cette demande d'autorisation doit contenir au minimum les informations indiquées ci-dessous :

- [Formulaire F-AUT-GEN](#),
- [Formulaire F-AUT-FG](#),
- [Formulaire F-AUT-DER](#), en plus et uniquement pour les installations géothermiques de très faible profondeur, qui sont envisagées dans des zones de protection éloignée (zone III) de captages utilisés pour la production d'eaux destinées à la consommation humaine,
- Extrait du plan cadastral,
- Extrait de la carte topographique,
- Extrait de la carte géologique,
- Mémoire technique comprenant un descriptif de l'installation géothermique envisagée, la technique de forage éventuelle utilisée, l'identification des formations géologiques/aquifères traversés, le nombre et la profondeur des installations géothermiques et le choix du liquide caloporteur.

7.4 Agrément

Seules les entreprises en possession d'un **agrément dans le domaine de l'eau** peuvent réaliser ce type de forages et l'obligation d'être en possession d'un agrément figurera également comme une condition standard dans les décisions ministérielles délivrées en vertu de l'article 23, paragraphe 1^{er}, lettres m) et n) de la loi modifiée du 19 décembre 2008 relative à l'eau.

Les critères d'obtention d'un agrément relatif à la réalisation des forages géothermiques (point 9) sont décrits au point 9.1 du document annexé, également disponible au lien suivant : <https://eau.gouvernement.lu/dam-assets/administration/documents/agrements/critres-agrements.pdf>

Tous les autres documents nécessaires à une demande d'agrément sont consultables sous le lien suivant: <https://environnement.public.lu/fr/emweltprozeduren/Aides/agrements.html>. En cas de questions, vous pouvez contacter l'Administration de la gestion de l'eau à l'adresse agrements@eau.etat.lu.

Une attention particulière sera dorénavant portée sur le respect des conditions des autorisations délivrées, notamment en ce qui concerne les informations et documentations qui doivent être transmises à l'Administration de la gestion de l'eau (information sur la date des travaux, transmission des données géologiques/hydrogéologiques, etc.).

Les entreprises qui ne respecteront pas les obligations prévues dans les autorisations et ne transmettront pas les documents et informations demandés, se verront retirer leur agrément et ne pourront plus réaliser de forages géothermiques au Luxembourg.

8 Références

- (LAWA), B.-A. W. (2022, 10 30). *www.lawa.de*. Récupéré sur Wassergefährdende Wärmemedien und deren prozentuale Anteile an WGK 1-, WGK2- und WGK 3- Stoffen (Stand: 28/10/2022): https://www.lawa.de/documents/tabelle-2-20221028-nach-additivanteil-neueempfehlung_1667901131.pdf
- ADEME. (2019). *La géothermie - Pour chauffer et rafraîchir sa maison*. Angers.
- AFPG. (2021, 08 17). Récupéré sur <http://www.afpg.asso.fr/nos-2-filieres/geothermie-surface/pac-individuelles/les-types-de-capteurs/capteur-horizontale-2/>
- Altechgeothermie*. (2021, 09 01). Récupéré sur <https://www.altechgeothermie.fr/geothermie-horizontale-alsace/>
- Behörde für Umwelt, K. E. (2021). *Leitfaden Erdwärmenutzung*. Hamburg.
- BRGM. (2021, 08 17). Récupéré sur <https://www.geothermies.fr/pompe-chaleur-geothermique-sur-geostructures>
- Brugeo. (2021, 08 17). *geothermie.brussels/fr/*. Récupéré sur <https://geothermie.brussels/fr/principes-de-la-geothermie/la-geothermie-peu-profonde>
- brunnenbau-stockbauer. (2021, 10 13). *brunnenbau-stockbauer*. Récupéré sur <https://www.brunnenbau-stockbauer.de/brunnenbau.htm>
- BZ-Redaktion. (2019, 04 27). Neue Hebungsrisse in der Staufener Altstadt entdeckt. *Badische Zeitung*.
- COD. (2021, 09 30). *connaissancedesenergies*. Récupéré sur <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/geothermie-superficielle>
- Ebert, A. (2018). *Rapport "matériaux cimentaires de remplissage des sondes géothermiques"*. Listal: Suisse énergie .
- Erdsondenoptimierung. (2010). *Erdsondenoptimierung*. Récupéré sur <http://www.erdsondenoptimierung.ch/index.php?id=269739>
- E-Therm. (2021, 08 31). Récupéré sur <https://e-therm.ch/kompetenzen/bohrprozess/>
- E-Therm. (2021, 08 31). *E-Therm*. Récupéré sur E-Therm: <https://e-therm.ch/kompetenzen/bohrprozess/>
- Foucault, A. (2010). *Dictionnaire de Géologie - 7e édition*. Dunand.
- Fraunhofer-IEG. (2022). *Förderrelevante kostenschätzung oberflächennahe und mitteltiefe Geothermie, Luxembourg*. Bochum: Fraunhofer IEG.

- geo.fr. (2009, 07 29). Récupéré sur <https://www.geo.fr/environnement/geothermie-energie-chauffage-45733>
- GeoClim. (2021, 09 09). *geoclimloire.com*. Récupéré sur [geoclimloire.com: https://www.geoclimloire.com/geothermie/corbeille-geothermique](https://www.geoclimloire.com/geothermie/corbeille-geothermique)
- Gombert, P., Laihaie, F., & Auxane, C. (2017). *Etat des connaissances sur les risques, impacts et nuisances potentiels liés à la géothermie profonde*. INERIS.
- (2012). *Grundwasserressourcen der Schweiz*. Bundesamt für Umwelt BAFU.
- LAWA. (2022). *Positivliste der "Empfehlungen der LAWA für wasserwirtschaftliche Anforderungen an Erdwärmesonden und Erd"*.
- Lemale, J., & Gourmez, D. (2008). *Guide technique: Pompe à chaleur géothermique sur aquifère*. Lorraine: BL Communication. Récupéré sur <https://www.geothermies.fr/sites/default/files/inline-files/Guide%20technique-%20pompe%20à%20chaleur%20geothermique%20sur%20aquifere-conception%20et%20mise%20en%20oeuvre.pdf>
- Lucius, M. (1951). *Übersicht über die Geologie Luxemburgs*. Luxembourg: Zeitschrift der Deutschm Geologischen Gesellschaft.
- Marcheteau, G. (2017, 06 08). *L'énergie tout compris*. Récupéré sur <https://www.lenergiesoutcompris.fr/actualites-conseils/performance-d-une-pac-qu-est-ce-que-le-cop-48162>
- Moeck, I., Weber, J., & Schintgen, T. (2021). *GeothermLUX - Quantifizierung des geothermischen Potentials Luxemburgs und Identifizierung ressourcenspezifischer Nutzungstypen auf Basis des Play Type Konzepts*.
- Risse Staufen*. (2011). Récupéré sur Alemannische Seiten: https://www.alemannische-seiten.de/deutschland/staufen_risse-staufen.php
- SIA384/6. (2021). *Sondes géothermiques*. Zurich: Société suisse des ingénieurs et des architectes.
- Soldielec. (2021, 08 17). Récupéré sur <https://www.sodielec-berger.fr/de/content/255/88/vmc/puit-canadien-puits-canadien>
- Spiegel. (2009, 11 06). *Spiegel*. Récupéré sur <https://www.spiegel.de/panorama/wiesbaden-bohrung-loest-wasserfontaenen-aus-a-659791.html>
- Suisse-énergie. (2018). *Note explicative "Modèle de soumission pour des installations comprenant entre 2 et 10 sondes géothermiques à l'aide d'un exemple avec 7 sondes géothermiques"*. Berne.
- Uponor-Geothermie. (2013). *Gebäudetechnik-Technischer Gesamtkatalog*. Hassfurt: UPONOR.

- VDI-4640-Blatt2. (2015). *Thermische Nutzung des Untergrunds - Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen*. Düsseldorf.
- Voith, S. (2013, 05 23). *Springer Professional*. Récupéré sur Steigendes Interesse an Hochtemperatur-Geothermie: <https://www.springerprofessional.de/erneuerbare-energien/geothermie/steigendes-interesse-an-hochtemperatur-geothermie/6595754?searchResult=1.steigendes%20interesse%20hochtemperatur&searchBackButton=true>
- Wasserwirtschaft, S. (2021, 08 17). Récupéré sur <https://aktiongrundwasserschutz.de/die-situation/grundwasser/>
- www.ingenieur.de*. (2014, 04 11). Récupéré sur *www.ingenieur.de*: <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/energie/geothermie-trotz-einzelner-schaeden-sicheres-verfahren/>
- www.stuttgarter-zeitung.de*. (2014, 03 20). Récupéré sur <https://www.stuttgarter-zeitung.de/inhalt.winfried-kretschmann-in-staufen-der-ort-soll-nicht-zerbrechen.fa376eaf-3b0b-4068-bb86-d50d65283157.html>