

Université Libre de Bruxelles
Institut de Gestion de l'environnement et d'Aménagement du Territoire
Faculté des Sciences
Master en Sciences et Gestion de l'Environnement

Analyse du cadre législatif wallon relatif aux impacts environnementaux d'une installation géothermique à faible profondeur

Protection des milieux souterrains

Mémoire de Fin d'Etudes présenté par
JOCHMANS, Gladys
En vue de l'obtention du grade académique de
Master en Sciences et Gestion de l'Environnement
Ma60CTS ENVI4

Année Académique : 2012-2013

RESUME

Les préoccupations concernant l’approvisionnement en énergie et le changement climatique ont amené à une croissance du recours à des sources de chaleur telles que la géothermie à faible profondeur. Cette forme de géothermie s’applique à des profondeurs ne dépassant pas 300m et des températures inférieures à 30°C. Elle nécessite donc la plupart du temps l’emploi d’une pompe à chaleur. Cette dernière peut être reliée à deux types de sources froides : un aquifère (circuit ouvert) ou le sol (sondes verticales et capteurs horizontaux).

Une augmentation du nombre d’installations a donc pu être observée ces dernières années dans de nombreux pays. Faible émettrice de CO₂, la technique peut, a priori, sembler intéressante d’un point de vue environnemental. Toutefois, il faut rester méfiant quant aux impacts qu’elle pourrait provoquer. En effet, cela fait partie de l’un des critères de durabilité évoqués par certains auteurs. Ils y ajoutent également que cette extraction d’énergie ne doit pas interférer avec les besoins d’autrui. Il faut donc être attentif à ce qu’il n’y ait ni surexploitation de la source de chaleur, ni interférence avec d’autres installations en place, ni détérioration de la qualité du milieu souterrain.

Quels sont les impacts que peut avoir la géothermie à faible profondeur sur le sous-sol ? La modification de la température de la nappe et du sol peut amener à des perturbations de l’écosystème présent. Pour le cas de systèmes ouverts, il faut être attentif à ne pas engendrer une baisse globale du niveau de la nappe. Une surveillance du fluide caloporteur circulant dans les sondes ou les boucles horizontales constitue un élément important afin d’éviter la propagation de contaminant dans le sol et la nappe. Enfin, les impacts liés au forage concernent la contamination des nappes captives par la nappe libre, ou la contamination de la nappe par un contaminant contenu dans le sol.

Tout ceci pourrait être résumé par quatre éléments à gérer : la protection de l’écosystème dans les nappes, la protection de l’écosystème des sols, la protection des besoins d’autrui et le maintien du niveau des nappes. Le cadre législatif a un rôle important à jouer dans cette gestion et en Wallonie, comme dans beaucoup d’autres pays, de sérieuses lacunes persistent concernant la géothermie à faible profondeur. La réglementation se rapporte aux forages et aux puits de pompage, en général, mais ne comporte pas encore de cadre bien spécifique au recours à ce type de ressource.

Il serait pourtant intéressant de parvenir à réglementer les températures autorisées au lieu d’exploitation, les distances minimales à respecter entre plusieurs installations, tout ceci en fonction de la géologie rencontrée. De même, des indications plus précises sur le dimensionnement des installations pourraient être fournies et la recharge artificielle de nappe, dans certaines mesures, autorisée. Dans un premier temps, il peut être intéressant d’élaborer un guide plus facile à modifier qu’une loi tant que certaines incertitudes persistent au sujet des risques potentiels.

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier mon promoteur, Ir. Michel Huart, grâce à qui j'ai pu travailler sur la problématique qui me tenait à cœur en arrivant à Bruxelles.

J'aimerais également remercier madame Marine Nihant, monsieur David Verscheure et monsieur Maximilien Croufer pour le temps qu'ils ont accepté de me consacrer et les informations qu'ils m'ont transmises.

Un grand merci à mes parents pour leurs encouragements, leur soutien et leurs conseils tout au long de ce travail.

Merci aussi à Amandine pour son enthousiasme et les discussions que nous avons pu avoir sur cette recherche et merci à Coline et Charlotte pour leur écoute résistante à toute épreuve.

Enfin, je tiens tout particulièrement à remercier François d'avoir été présent pour me soutenir, pour plonger avec moi dans de longs débats sur nos mémoires et nos cours respectifs et de s'être montré patient et attentif durant toute cette année.

Table des matières

Résumé	1
Remerciements	2
Introduction	6
1. Faut-il recourir à la géothermie à faible profondeur?	9
1.1 Émissions de gaz à effet de serre	9
1.2 Géothermie de surface et durabilité	12
1.3 Conclusion.....	15
2. Types d'installations géothermiques à faible profondeur	16
2.1 La pompe à chaleur (PAC).....	16
2.2 Capteurs thermiques.....	17
2.2.1 Circuits ouverts sur aquifère	17
2.2.1.1 Le prélèvement.....	18
2.2.1.2 Rejet de l'eau prélevée	20
2.2.2 Circuits fermés	22
2.2.2.1 Boucle(s) horizontale(s).....	22
2.2.2.2 Sondes verticales	23
2.3 Conclusion.....	26
3. Influence des propriétés géologiques	28
3.1 Température	28
3.2 Transfert de chaleur dans le sol.....	29
3.3 Dimensionnement de systèmes à sondes verticales	29
3.4 Dimensionnement de systèmes sur aquifère	32
3.5 Forage.....	33
3.6 Capteurs horizontaux.....	34
3.6.1 Dimensionnement.....	34
3.6.2 Mise en place	35
3.7 Conclusion.....	35
4. Nuisances et risques propres à la géothermie à faible profondeur	36
4.1 Installations à boucles horizontales.....	36

4.1.1	Phase de mise en place des boucles	36
4.1.2	Phase d'exploitation.....	36
4.2	<i>Systèmes sur aquifère et sondes verticales.....</i>	36
4.2.1	Forage.....	36
4.2.2	Exploitation d'un système sur aquifère.....	37
4.2.3	Exploitation d'une installation à sondes verticales	40
5.	Cadre juridique wallon relatif à la géothermie à faible profondeur.....	41
5.1	<i>Généralités.....</i>	41
5.1.1	Le décret et ses arrêtés	41
5.1.2	Dans quel cas effectuer une demande ?	43
5.1.3	Classement d'un établissement	43
5.1.4	Procédures	44
5.1.5	Durée des procédures	44
5.1.6	Outils pour la prise de décision	45
5.2	<i>Application aux installations géothermiques à faible profondeur.....</i>	46
5.2.1	Classement des installations	46
5.2.2	Les conditions intégrales et sectorielles en géothermie	52
5.2.3	Formulaire pour les sondes géothermiques	56
5.2.4	L'agrément des foreurs	56
5.3	<i>Conclusion.....</i>	56
6.	Comparaison avec la législation des pays limitrophes.....	57
6.1	<i>Allemagne.....</i>	57
6.2	<i>Pays-Bas.....</i>	57
6.3	<i>France</i>	58
6.4	<i>REGEOCITIES.....</i>	58
	Conclusions	59
	Bibliographie.....	62

<i>Figure 1 Segmentation de la géothermie (Direction Générale de l'Énergie et du Climat, 2010, p.1)</i>	6
<i>Figure 2 Consommation pour différentes utilisations de pompes à chaleur (Lemale, 2012, p.200-201)</i>	12
<i>Figure 3 Schéma d'un système géothermique sur aquifère (DEC Energies, 2013)</i>	18
<i>Figure 4 Coupe d'un système de pompage sur nappe libre (Lemale & Gourmez, 2008, p.39)</i>	19
<i>Figure 5 De gauche à droite: crépine à trou oblong, crépine à ponts et crépine à fil enroulé (d'après Lemale & Gourmez, 2008, p.40)</i>	19
<i>Figure 6 Coupe d'un système de pompage sur nappe captive (Lemale & Gourmez, 2008, p.39)</i>	21
<i>Figure 7 Deux types d'installation de système sur aquifère (Socaciu, 2011)</i>	21
<i>Figure 8 Types de configuration de capteurs verticaux (Caleffi, 2010, p.6)</i>	22
<i>Figure 9 Zones de précaution autour de la surface occupée par les capteurs horizontaux (Caleffi, 2010, p.7)</i>	23
<i>Figure 10 Schéma d'un système géothermique sur sondes verticales (DEC Energies, 2013)</i>	24
<i>Figure 11 Installation de la boucle dans le trou de forage (Caleffi, 2010, p.19)</i>	25
<i>Figure 12 Configuration et géométrie possible pour les sondes géothermiques verticales (ADEME & BRGM, 2012b)</i>	26
<i>Figure 13 Études températures mesurées en fonction de la profondeur et du mois pour le centre de la France (Caquelin, n.d.)</i>	28
<i>Figure 14 Puissance d'extraction selon la roche (Lemale, 2012, p.251)</i>	30
<i>Figure 15 Conductivité thermique des roches (Sanner, 2011, p.26)</i>	31
<i>Figure 16 Exemple de fonctionnement en mode chauffage, P_{ch} correspond à $W_{bât}$ (Lemale, 2012, p.219)</i>	32
<i>Figure 17 Types de porosité (ADEME & BRGM, 2012a, p.48)</i>	33
<i>Figure 18 Vitesse de forage en fonction de la technique et la géologie rencontrée (Arrizabalaga, 2011, p.68 – d'après Culver, 1998)</i>	34
<i>Figure 19 Puissance d'extraction pour les capteurs horizontaux (Lemale, 2012, p.246)</i>	35
<i>Figure 20 Evaluation de la mortalité de deux espèces en fonction de la température et du temps d'exposition (Brielmann et al., 2011)</i>	38
<i>Figure 21 Influence de la température sur différents paramètres caractérisant l'activité microbienne (Brielmann et al., 2011)</i>	39
<i>Figure 22 Troncature de la liste des établissements et activités classés présentée en annexe de l'arrêté du Gouvernement wallon arrêtant la liste des projets soumis à étude d'incidences et des installations et activités classées; en jaune, ceux se rapportant à la géothermie de surface (http://environnement.wallonie.be/legis/pe/pe006bis.htm)</i>	47
<i>Figure 23 Idem</i>	48

INTRODUCTION

Étymologiquement, le mot géothermie vient du grec et signifie la chaleur (θερμη) de la Terre (Γη). Elle représente, initialement, l'étude de l'ensemble des phénomènes thermiques liés à notre planète. À présent, le concept est davantage utilisé pour désigner la part d'énergie accessible et valorisable par l'homme¹. Depuis toujours, l'Homme profite d'une part de cette chaleur par le biais de sources géothermales. Petit à petit, il se met à exploiter cette source de chaleur dans des endroits de moins en moins accessibles de par la profondeur de forage nécessitée, mais toujours pour atteindre des températures permettant l'exploitation directe de l'énergie récoltée. Enfin, il tente l'exploitation d'une chaleur à laquelle il est autrement difficile d'accéder puisqu'elle est se trouve à des profondeurs facilement atteignables, mais qu'elle nécessite l'emploi d'une pompe à chaleur pour être utilisable².

Géothermie très basse énergie, géothermie de surface et géothermie à faible profondeur sont autant de termes qui désignent ce mode d'extraction de la chaleur se trouvant sous nos pieds, par l'intermédiaire d'une pompe à chaleur. Le tableau suivant la situe par rapport aux autres catégories de géothermie et précise, dans la première ligne, les fourchettes de valeurs auxquelles se rapporte ce mémoire.

Segment	Principaux équipements /systèmes utilisés	Température de la ressource	Profondeur des forages	Usages
Très basse énergie	Pompes à chaleur géothermiques (PACg)*	○ < 30°C	○ Faible ○ < 100 – 300m	○ Usage domestique (chauffage & refroidissement) ○ Habitat collectif ○ Tertiaire
Basse énergie Moyenne énergie	Réseaux de chaleur géothermiques**	○ < 90 °C ○ 90 – 150 °C	○ Intermédiaire ○ < 2000m	○ Usage directe pour le chauffage d'un ensemble de bâtiments ○ Chaleur industrielle ○ Production d'électricité
Haute énergie	Centrales de production électrique***	○ >150°C	○ Elevée ○ > 2000m	○ Production d'électricité ○ Chaleur industrielle

Figure 1 Segmentation de la géothermie (Direction Générale de l'Énergie et du Climat, 2010, p.1)

¹ Raymond, 1998, p.21

² Raymond, 1998, p.31-32 ; Mock J. et al., 1997

En 2007³, seul 0,02 TWh sont produits au moyen de systèmes comprenant une pompe à chaleur en Wallonie et ce chiffre s'élève à 0,0375 TWh en 2010⁴. Il faudra faire dix fois mieux en 2020 pour atteindre l'objectif de 0,4 TWh⁵. Le potentiel, quant à lui, est encore nettement plus élevé puisqu'en imaginant que 1% de la surface urbanisée en Wallonie soit consacrée à ce mode de chauffage, la quantité de chaleur à y exploiter serait de 24 TWh⁶. Pourquoi, cela dit, n'y a-t-il pas encore davantage d'installations dans cette région ? Plusieurs explications peuvent être apportées dont le coût d'investissement, la place nécessaire ainsi que ce qui constitue l'objet de ce mémoire : le cadre juridique et l'environnement qu'il a comme rôle de protéger. Plus précisément, il est question, dans ce travail, d'effectuer une comparaison entre les exigences réglementaires dans le domaine et les impacts environnementaux liés à ce type d'installation sur le sous-sol et les eaux souterraines. Une analyse complète de la cohérence de la législation avec la protection de l'environnement, bien qu'intéressante à réaliser par la suite, ne le sera pas dans le cadre de cette recherche. Elle demanderait notamment de mêler la protection des sous-sols, le changement climatique et l'occupation du sol, ce qui complexifierait fortement la démarche. La performance énergétique des bâtiments ne sera dès lors pas abordée et le permis d'urbanisme sera tout juste cité pour laisser la place aux permis d'environnement.

Comme nous venons de le voir, bien qu'il y ait encore de la marge, le nombre d'installations géothermiques en Wallonie comme dans le reste de l'Europe est allé croissant ces dernières années⁷. Ceci amène à des préoccupations quant à l'encadrement légal à définir et la protection environnementale à assurer. D'autant plus que cette augmentation devrait se poursuivre étant donné les objectifs à remplir pour 2020, la pompe à chaleur sur sol ou sur aquifère faisant un effet partie de la catégorie « chaleur verte ».

Dans cet ordre d'idée, le premier chapitre de ce mémoire présente une comparaison des émissions de gaz à effet de serre de plusieurs modes de chauffage. La géothermie à faible profondeur offre, de ce point de vue, un avantage environnemental certain. Cela veut-il pour autant dire qu'il faut à tout prix promouvoir ce mode de chaleur ? La question n'est pas simple et je tenterai d'y apporter des éléments de réponse dans la seconde partie du chapitre à travers une discussion sur le caractère durable d'une exploitation géothermique à très basse énergie. Parmi les points déterminant la durabilité de la technique se trouve la conservation de la qualité du sous-sol et des nappes. Néanmoins, avant de rassembler les nuisances et risques pouvant être associés à la géothermie de surface, deux autres chapitres sont développés afin de fournir au lecteur un maximum de clefs de compréhension pour aborder cette partie.

³ Decrop, 2011

⁴ Brahy et al., 2010, p.48

⁵ Decrop, 2011

⁶ D'après les données de Région Wallonne et al., 2009, p.7

⁷ Gao et al., 2009 ; Hähnlein 2010 ; Lund et al. 2004 ; Rumohr, 2009 ; Sanner et al. 2003 ; Sanner & Mands., 2009.

L'un d'eux décrit les types d'installations existantes. Il aborde donc les systèmes sur sols, horizontaux et verticaux, ainsi que ceux sur aquifères. Tous nécessitent un dimensionnement dépendant des propriétés géologiques et hydrogéologiques présentes sur le site. Cette influence de la nature et la structure du sous-sol est exposée dans le chapitre 3. À la suite du chapitre 4 qui, rappelons-le, rassemblent les impacts éventuels d'une installation géothermique sur les sols et aquifères et les nuisances engendrées, débute la partie juridique de ce travail. Ainsi, le cinquième chapitre se penche, dans un premier temps, sur la législation en Région wallonne relative au permis d'environnement d'un point de vue général, avant de préciser les conditions s'appliquant aux établissements qui nous intéressent. Enfin, je vous propose de voyager un peu pour aller observer ce qui se fait à l'étranger en matière de cadre législatif associé à la géothermie à faible profondeur. Moins précis que le précédent, ce sixième chapitre peut toutefois permettre de mettre en reliefs les éventuelles lacunes encore présentes au sein de la réglementation wallonne.

Dans quelle mesure, le cadre juridique wallon actuel, permet-il le recours à la géothermie très basse énergie? Quel équilibre existe-t-il entre risques et contrainte juridique dans le domaine? Tout au long de mon parcours pour tenter de répondre à ces questions, j'ai rencontré des personnes d'horizons parfois très différents. La problématique abordée dans ce mémoire regroupe en effet des disciplines telles que la thermodynamique, les sciences géologiques, le droit, le génie civil et même la microbiologie. Dès lors, ma volonté a été de rédiger ce mémoire dans un souci de le rendre compréhensible à un maximum de personnes indépendamment de leur spécialité. Ainsi, si certains passages explicatifs paraissent longs pour certains, je m'en excuse d'ores et déjà et espère qu'en contrepartie, ils serviront à d'autres.

1. FAUT-IL RECOURIR A LA GEOTHERMIE A FAIBLE PROFONDEUR?

Ce n'est plus un secret pour personne, l'Homme doit revoir sa façon de gérer les ressources énergétiques dont il dispose. L'utilisation actuelle des énergies fossiles engendre, en effet, plusieurs types de problèmes.

Le premier concerne la continuité d'approvisionnement, notamment en pétrole. D'une part, ces ressources sont limitées et ne peuvent pas être recyclées une fois consommées, ce qui assure, dans un futur plus ou moins proche, la fin de leur acquisition par quiconque. Il est difficile d'être précis quant au nombre d'années qu'il nous reste en approvisionnement, car notre mode de consommation, nos connaissances sur les ressources et les techniques d'extraction évoluent et régissent cette valeur. Cependant, quelle que soit l'échéance, ces ressources sont effectivement épuisables, ce qui signifie que la population se retrouvera tôt ou tard face à un gouffre, plus ou moins surmontable selon la manière dont elle s'y sera préparée.

D'autre part, les puits de combustible tel que le pétrole sont inégalement répartis sur l'ensemble de la planète, la fourniture en énergie dépend, dès lors, de bien plus que de l'existence ou non de ressources. Des éléments politiques entrent en considération, ce qui accentue le risque de baisse d'approvisionnement pour des régions telle que la Wallonie entièrement et confirme qu'une transition est indispensable, quelles que soient les données fournies sur les réserves.

Aux problèmes de dépendance énergétique viennent se greffer les impacts environnementaux. Par la combustion de ressources fossiles, l'Homme rejette notamment des quantités élevées de CO₂ dans l'atmosphère entraînant une augmentation de l'effet de serre et une évolution du climat⁸. Les enjeux de ce changement sont reconnus par la Région wallonne dans son Plan d'Environnement pour le Développement Durable : « La maîtrise et la réduction des émissions de gaz à effet de serre, en particulier de CO₂, en vue d'éviter les perturbations climatiques, sont un enjeu mondial. La Région wallonne doit y apporter sa contribution ».

Sur ce contexte se base la justification d'un recours à la géothermie à faible profondeur qui constitue l'un des piliers dans le processus de transition vers l'utilisation de chaleur « verte », entraînant moins de rejets de CO₂ au sein des bâtiments. Ceci va naturellement de pair avec une consommation maîtrisée pour tendre vers une utilisation rationnelle de l'énergie.

1.1 ÉMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE

L'utilisation d'une pompe à chaleur couplée à un système géothermique peut donc engendrer une réduction des émissions de gaz à effet de serre.

⁸ Gouvernement wallon, 1995 (Le milieu ambiant : Climat)

Plusieurs éléments sont à considérer pour évaluer celle-ci :

- La source d'énergie à laquelle le système est comparé ;
- Le mode de production de l'électricité nécessaire au fonctionnement du système ;
- Les émissions liées au type de fluide frigorigène employé au sein de la pompe à chaleur et l'échappement de celles-ci dans l'atmosphère par fuites⁹.

Pour être complet, il faudrait également tenir compte des émissions liées à la production de la pompe à chaleur, de l'ensemble du matériel nécessaire à l'installation et des substances présentes dans le système, celles liées au transport et à la mise en place de ces éléments ainsi qu'à leur élimination. L'idéal serait même de s'interroger au-delà des émissions de gaz à effet de serre et de comparer les analyses de cycle de vie de plusieurs installations, dont une géothermique, capables de maintenir une température choisie, dans un bâtiment déterminé, pour une certaine durée.

Toutefois, l'objet principal de ce mémoire n'étant pas de justifier l'emploi de la géothermie d'un point de vue environnemental, ces comparaisons ne seront pas développées en détail. Néanmoins, une évaluation de la quantité de gaz à effet de serre émise durant la période de chauffage selon le type de système employé par kWh de chaleur a été effectuée.

Pour le chauffage par pompe à chaleur, le site Energie+ indique une émission de 0.347 kg CO₂/kWh d'électricité¹⁰. Cette valeur se rapporte à l'électricité produite en Belgique ; il ne s'agit pas d'une moyenne sur toute l'année (qui elle est de 0.29 kg CO₂/kWh), mais d'une quantité évaluée en fonction des périodes de chauffe supposées.

En reprenant une partie des hypothèses utilisées par Jean Lemale dans son ouvrage « La géothermie » (2012), considérons une installation à sondes verticales permettant de combler des besoins utiles de 20 000 kWh par an, dont le coefficient d'efficacité énergétique est de 3.5 et contenant 1.25 kg de fluide frigorigène R410A dont 3% s'échappent sur un an.

On obtient une émission liée à la consommation d'électricité de

$$\frac{0.347}{3.5} = 99,1 \text{ gCO}_2\text{eq/kWh}$$

Sachant que les émissions de 1 kg du fluide R410A ont un impact sur l'effet de serre 1900 fois supérieur à celui de 1kg de CO₂¹¹. On peut ajouter l'équivalent de

$$\frac{1.25 \times 0.03 \times 1900}{20\,000} = 3.6 \text{ gCO}_2\text{eq/kWh.}$$

Ceci donne donc un total de 102,7 gCO₂eq/kWh pour l'installation en question.

Pour un système à capteurs horizontaux et à détente directe ([cf. chapitre 2](#)), le même coefficient de performance peut être considéré, mais la quantité de fluide frigorigène nécessaire est dix fois supérieure.

On a dès lors : 135,1 gCO₂eq/kW

⁹ Lemale, 2012, p.198-199

¹⁰ Architecture et Climat (UCL), 2013

¹¹ Lemale, 2012, p.185

Toujours en reprenant certaines hypothèses de Jean Lemale, considérons à présent le cas d'un système de pompe à chaleur avec un échangeur air/air dont le coefficient de performance est de 3 et la quantité nécessaire de fluide frigorigène de 5kg.

Le résultat suivant est obtenu : 130,1 gCO₂eq/kWh

En considérant les données d'Energie+¹² pour le gaz et le mazout de chauffage, et en supposant l'utilisation d'une chaudière à condensation dont le rendement est de 80% (les rendements de 93% des nouvelles chaudières étant évalués en plein fonctionnement sans comptabiliser le démarrage ni les pertes), on obtient :

- pour le gaz naturel: 248 gCO₂eq/kWh
- pour le mazout : 330 gCO₂eq/kWh

Dans le cas d'un chauffage électrique, la même donnée que pour la géothermie concernant les émissions liées à l'électricité peut être utilisée.

Si le rendement tend vers 100%, on peut donc estimer les émissions à : 347 gCO₂eq/kWh.

Le tableau suivant rassemble les résultats obtenus (considérant toujours un besoin de 20 000kWh/an) :

	Sondes verticales + PAC	Boucles horizontales + PAC	PAC air/air	Chaudière gaz naturel	Chaudière mazout	Chauffage électrique
Emissions (gCO ₂ eq /kWh)	102,7	135,1	130,1	248	330	347
Emissions (gCO ₂ eq /an)	2054	2702	2602	4950	6600	6940

L'utilisation de la géothermie à faible profondeur est donc deux à trois fois moins émettrice en Belgique que le recours au gaz, au mazout ou à l'électricité pour se chauffer.

À la page suivante, un second tableau présente les résultats de Jean Lemale. Ceux-ci sont valables pour la France où la quantité de CO₂ émise par kWh d'électricité est de 70g (prédominance du nucléaire¹³). Les résultats et la comparaison entre les méthodes sont dès lors très différents ce qui souligne l'importance du lieu dans le choix de l'utilisation des énergies.

¹² Architecture et Climat (UCL), 2013

¹³ Bireaux et al., 2011

Remarquons que l’auteur prend en compte, dans ses calculs, la quantité de fluide restant après utilisation de la pompe à chaleur, considérant qu’après 20 ans, 20% ne pourront être récupérés. Cette donnée n’a pas été utilisée dans les évaluations présentées précédemment, car elles ne sont pas considérées comme intervenant dans la partie utilisation, elles n’ont toutefois qu’une faible influence dans le résultat final. Soulignons à nouveau le fait que ces chiffres restent sommaires et que la prise en compte de l’ensemble du cycle de vie serait préférable et autoriserait également davantage la comparaison avec d’autres combustibles tels que le bois.

	PACaquif ou sondes verticales	PAC détente directe capteurs horizontaux	PAC sur air	Solution tout électrique	Solution gaz
Puissance thermique (kW)	10	10	10	10	10
besoins utiles (kWh)	20 000	20 000	20 000	20 000	20 000
COP/rendt	3,5	3,5	3	1	0,8
Qté fluide frigo (kg)	1,25	12,5	5		
Consommation d’électricité (kWh)	5 714	5 714	6 667	20 000	
Consommation de gaz (kWhPCS)					27 778
Émissions liées au fluide frigorigène (kg CO ₂ /an)	95	950	380		
Émissions liées à l’énergie (kg CO ₂ /an)	1 029	1 029	1 200	3 600	5 833
Total émissions (kg CO ₂ /an)	1 124	1 979	1 580	3 600	5 833

Figure 2 Consommation pour différentes utilisations de pompes à chaleur (Lemale, 2012, p.200-201)

1.2 GEOTHERMIE DE SURFACE ET DURABILITE

S’il apparaît que les techniques de chauffage géothermique sont peu émettrices de gaz à effet de serre, cela ne leur garantit toutefois pas un caractère durable. Que peut-on mettre exactement derrière le mot « durable » et la géothermie peut-elle réellement être associée à cette définition ? Plusieurs auteurs se sont penchés sur la question.

En 2002, Rybach et Eugster se basent sur la définition d’une production durable à partir d’une installation géothermique individuelle. Cette définition, donnée par l’Orkustofnun Working Group un an

auparavant, est axée sur les capacités thermiques de l'eau souterraine et/ou de la roche, indépendamment de toute considération économique, environnementale ou technique : la durabilité appliquée à la géothermie à faible profondeur se rapporte à la stabilité de production à long terme d'une source de chaleur. Les conclusions auxquelles ils parviennent sont :

- Dans le cas d'un système alternant chauffage en hiver et geocooling en été, la durabilité est assurée par la conception du système, la production d'énergie en hiver est garantie par le stockage d'été.
- Dans le cas d'une installation sur aquifère, le renouvellement de la source est continuellement assuré par le mouvement de la nappe.
- En revanche, dans le cas de pieux géothermiques conçus uniquement pour le chauffage, la durabilité dépend davantage du dimensionnement. Si l'installation n'a pas été sous-dimensionnée, les températures du milieu exploité diminueront d'abord les premières années avant d'évoluer vers une stabilisation à quelques degrés en deçà de la température initiale. Après 30 ans, une fois l'exploitation terminée, il a été évalué par modélisation que le sol pourrait recouvrer sa température initiale au bout d'une trentaine d'années.

En 2003, Stefansson et Axelsson insistent sur cette énergie-seuil qu'un sol peut fournir de façon constante et exploitable durant 100 à 300 ans constituant la frontière entre la durabilité et la non-durabilité.

Alors que selon la définition employée par Rybach et Eugster la question concernant les systèmes couplés chauffage-geocooling semblait vite résolue, Paul L. Younger s'interroge en 2008 : « Ground-Coupled Heating-Cooling Systems in Urban Areas : How Sustainable Are They ? ». Le terme « durable » est alors redéfini pour ce type d'installation et s'applique dès lors à :

- La performance du système : combien de temps celui-ci répondra-t-il à la demande d'énergie avec un coefficient de performance donné ?
- L'utilisation de la ressource sans compromettre les besoins d'autrui, qu'il s'agisse des générations futures ou contemporaines à l'installation ;
- La qualité environnementale du milieu concerné.

Le premier point est lié à la conception du système. En effet, l'installation n'adoptera un caractère durable d'un point de vue de la performance que dans certaines conditions. Celles-ci se caractérisent non seulement par un équilibre entre extraction et réintroduction de chaleur dans le sol ou la nappe sur l'année complète, mais aussi par l'absence de situations extrêmes ponctuelles comme une descente de température jusqu'au gel de l'installation.

Cela peut être contrôlé à travers le design de l'installation en tenant compte de la recharge liée à la climatisation, mais aussi au rayonnement solaire, celle provenant du noyau étant relativement négligeable à cette profondeur. La perte naturelle de chaleur est moindre que l'énergie solaire absorbée et cette différence se voit augmentée lorsque le système géothermique est en place. Il reste à tenir compte de l'extraction artificielle de chaleur nécessaire à la demande de chauffage. Pour être complet, il faut

également inclure les éventuelles installations voisines, mais cet élément est plus largement discuté ci-après.

Le premier et le second point sont en effet liés. La garantie pour les générations futures d'accéder à ce type de ressource dépend directement de la période durant laquelle le système répond à la demande d'énergie pour un coefficient de performance donné. Le principe étant de tendre vers un laps de temps infini. Il s'agit cependant de préserver non seulement les besoins du futur, mais aussi ceux des contemporains à l'installation.

Le troisième point fait l'objet du [chapitre 4](#) et concerne les pollutions directes pouvant être provoquées par la fuite de fluide réfrigérant, celles qui découlent d'une mise en relation de plusieurs nappes, les conséquences d'un refroidissement ou d'un réchauffement des nappes ou, dans le cas d'un système ouvert, de l'influence de celui-ci sur le débit des nappes et les effets du rejet de l'eau utilisée en surface ou dans la nappe¹⁴.

Hähnlein et al. ajoutent à cela, en 2013, le critère économique et résumant les conditions nécessaires pour assurer le caractère durable des installations en quatre catégories:

1. Concernant les aspects techniques
 - Le système fonctionne sans défaut technique majeur
 - Aucune influence n'est exercée sur les installations environnantes
2. Concernant les aspects économiques
 - L'utilisation de la géothermie par rapport à un autre système, quel qu'il soit fournissant le même service ne doit pas présenter de désavantages financiers majeurs.
3. Concernant les aspects écologiques
 - Le renouvellement de l'énergie générée est assuré
 - Les émissions de gaz à effet de serre et de particules sont réduites au maximum
 - Les nappes sont préservées d'un point de vue qualitatif, quantitatif et écologique
 - Les éventuels changements durant l'exploitation sont temporaires et réversibles
4. Concernant les aspects sociaux
 - L'exploitant jouit d'un système de chauffage facile à utiliser
 - Le système participe à la protection de l'environnement et la lutte contre le changement climatique
 - Grâce à son installation, l'utilisateur possède ou perçoit un certain prestige social
 - Aucune interférence ne peut être constatée avec les systèmes avoisinants (pas de conflits entre voisins)

¹⁴ Younger, 2008

1.3 CONCLUSION

Ainsi, la géothermie et les systèmes associés sont loin de pouvoir se voir attribuer le qualificatif « durable » de manière systématique.

L'emploi de la géothermie à faible profondeur, comme toute autre technique en termes d'énergie renouvelable, n'est donc pas « la » solution miracle, mais découle d'une réflexion menée au cas par cas. Qui plus est, elle requiert des exigences particulières loin d'être présentes dans toutes les situations (surface exploitable, accès aux machines, etc.). Il arrivera que l'on préfère un échangeur air/air ou un système utilisant du bois, par exemple. Bien que ce travail ne s'y attarde pas, rappelons que l'aspect financier entrera également en compte et que le défi sera de trouver le meilleur compromis possible entre réponses aux besoins de l'utilisateur, budget et considérations environnementales, tout en étant soumis aux contraintes techniques, naturelles et juridiques.

2. TYPES D'INSTALLATIONS GEOTHERMIQUES A FAIBLE PROFONDEUR

Les techniques relatives à l'utilisation de la géothermie à faible profondeur sont nombreuses. Il existe cependant des similitudes entre celles-ci. Deux éléments sont en effet nécessaires à toute installation de ce type : une pompe à chaleur et un mode d'échange thermique avec le sol. C'est sur ce deuxième point que nous nous attarderons.

La pompe à chaleur est toutefois présentée ci-après de manière brève, dans le souci de donner au lecteur une clef de compréhension supplémentaire de la problématique à travers une vision globale du système qu'elle aborde.

2.1 LA POMPE A CHALEUR (PAC)

Ainsi que cela a été présenté sur la [figure 1](#), les températures pouvant être atteintes aux profondeurs qui nous intéressent ne dépassent pas 30°C. Le recours à une pompe à chaleur est donc nécessaire afin de rendre la chaleur puisée dans le sol exploitable. Le principe est d'extraire la chaleur d'une source froide pour la transmettre à une source chaude. Sans entrer dans les détails, notons simplement qu'une pompe à chaleur est caractérisée par un coefficient de performance (COP) dépendant notamment de la température du fluide entrant et celle du fluide sortant et qu'une baisse excessive de la température du sol dans le cas de chauffage pour faire dégringoler le COP.

Trois types de pompes sont à distinguer en géothermie :

- *Système à détente directe*

Dans ce système, utilisé pour des capteurs horizontaux uniquement, un seul et même fluide caloporteur circule dans l'ensemble de l'installation ; des capteurs enterrés, au plancher chauffant en passant par la pompe. Les inconvénients sont la difficulté, le cas échéant, de substituer au système, un autre mode de chauffage, l'impossibilité d'effectuer un réglage pièce par pièce dans le bâtiment et d'alterner chauffage et refroidissement¹⁵. Ce type de circuit nécessite également davantage de fluide frigorigène comme l'ont montré les hypothèses employées dans le [premier chapitre](#).

- *Système mixte*

À nouveau pour des capteurs horizontaux, ce système est cette fois composé de deux circuits. Cela permet de désolidariser le plancher chauffant du reste de l'installation. La quantité de fluide

¹⁵ Claret, 2006

frigorigène reste élevée étant donné que celui-ci parcourt la pompe à chaleur ainsi que les capteurs thermiques.

- *Système à fluide intermédiaire*

L'utilisation de trois circuits entraîne une perte thermique aux lieux d'échange de chaleur. Cependant, elle permet d'installer des sondes verticales ou des exploitations sur aquifère en minimisant le risque de contamination du sous-sol et des nappes par un fluide frigorigène. Celui-ci, en quantité moindre que pour les autres méthodes, reste en effet confiné au niveau de la pompe à chaleur. Il puise l'énergie calorifique du circuit enterré et, après passage par la PAC, transmet la sienne à l'eau circulant dans le bâtiment¹⁶.

2.2 CAPTEURS THERMIQUES

Un système géothermique a donc pour but d'échanger de la chaleur avec une source maintenant une température relativement constante ou, tout du moins, possédant une grande inertie face aux changements météorologiques. Cet échange a pour but de chauffer ou refroidir un bâtiment. Plusieurs types de source remplissent ce critère, les roches à plus ou moins grande profondeur et les eaux souterraines. Les différents systèmes sont dès lors regroupés en deux catégories : les circuits ouverts et les circuits fermés¹⁷.

2.2.1 Circuits ouverts sur aquifère

Une des possibilités qui s'offrent à l'exploitant est donc de pomper l'eau provenant d'un aquifère. Sans entrer dans le détail, l'influence des propriétés géologique et hydrogéologique faisant l'objet du chapitre suivant, notons que le choix d'un tel système dépend directement de la présence d'une nappe en mouvement dont le débit permet de répondre au besoin en eau de l'installation.

D'un point de vue technique, le principe est donc de prélever l'eau d'une nappe souterraine, d'amener cette eau jusqu'à un échangeur thermique afin d'y extraire une part de son énergie, après quoi elle doit être rejetée soit en surface, soit dans la nappe, par le biais d'un second forage.

¹⁶ Claret, 2006

¹⁷ Sanner, 2001

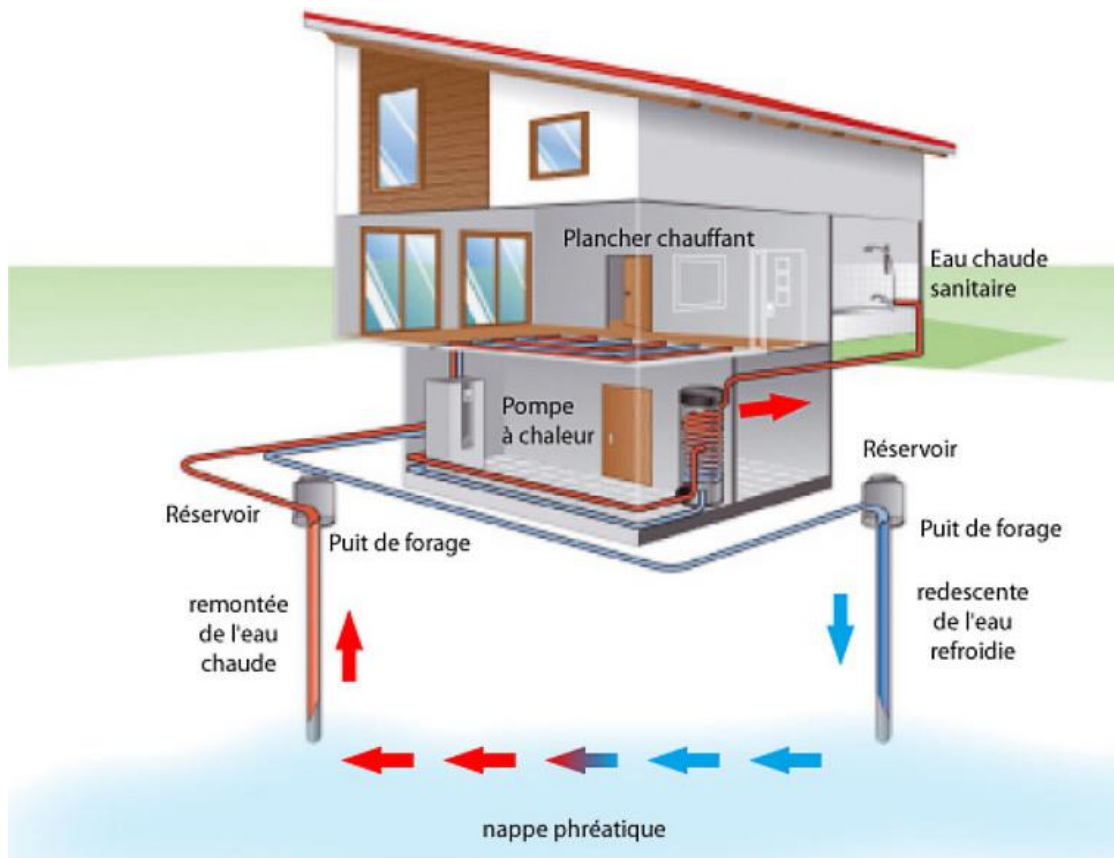


Figure 3 Schéma d'un système géothermique sur aquifère (DEC Energies, 2013)

2.2.1.1 Le prélèvement

Il existe deux types de nappes, les nappes libres et les nappes captives. Dans les deux cas, il s'agit de l'eau contenue dans la partie totalement saturée du sous-sol. La particularité de la nappe captive est que, contrairement à la nappe libre, son épaisseur est inférieure à sa hauteur piézométrique. Elle est confinée sous une couche de roche très faiblement perméable qui la maintient sous pression¹⁸. Cette différence explique que le mode de forage ainsi que le dispositif de prélèvement soient adaptés en fonction du type d'aquifère rencontré.

- *Nappe libre*

Un forage est effectué en une seule passe à une profondeur suffisante pour atteindre l'aquifère hors duquel l'eau sera pompée¹⁹. Les techniques de forage sont diverses et le choix de l'une d'entre elles dans un projet s'effectue en fonction de la géologie rencontrée. Une fois le puits foré, un dispositif particulier est mis en place comme le montre la figure 4.

¹⁸ Kehew, 2006, p.407-408

¹⁹ Lemale et Gourmez 2008, p.38-40

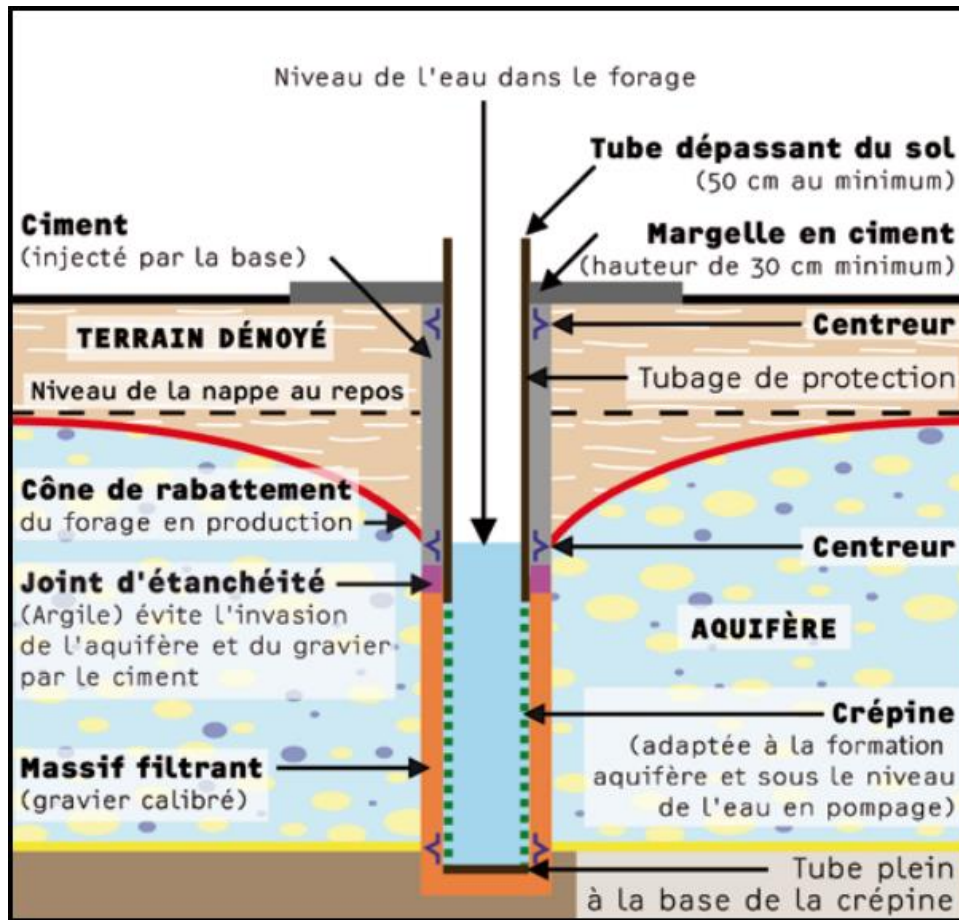


Figure 4 Coupe d'un système de pompage sur nappe libre (Lemale & Gourmez, 2008, p.39)

Une crépine est placée là où l'eau sera pompée, en dessous du niveau de la nappe. Il en existe différents types, comme les images le montrent sur la figure 5.

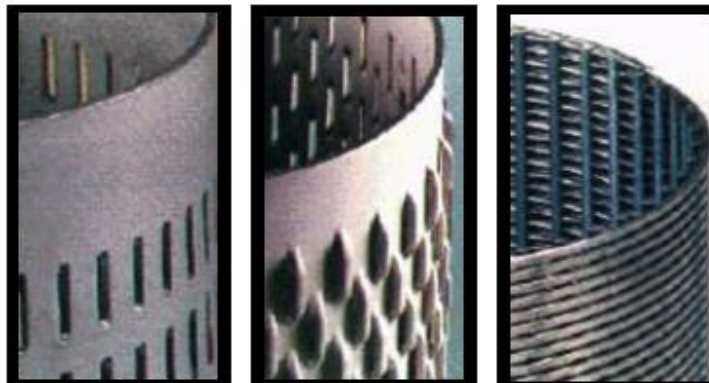


Figure 5 De gauche à droite: crépine à trou oblong, crépine à ponts et crépine à fil enroulé (d'après Lemale & Gourmez, 2008, p.40)

La forme des trous et le rapport entre ceux-ci et la surface totale diffèrent d'une crépine à l'autre. La crépine doit être conçue de telle façon qu'elle permette le passage de l'eau en évitant l'intrusion de

particules et que les pertes de charge soient néanmoins limitées. Il est également important, notamment d'un point de vue environnemental, qu'elle résiste aux pressions auxquelles elle sera soumise ainsi qu'à la corrosion.

Des graviers entourent la crépine et comblent l'espace entre celle-ci et la paroi du forage. Ils constituent un premier obstacle aux éléments solides. De la bentonite est introduite au-dessus de ce massif filtrant formant un joint d'étanchéité. Elle empêche le passage du ciment et le colmatage des graviers et de la crépine par celui-ci. Le ciment est, quant à lui, coulé sur le reste de la longueur du forage entre le tubage de protection et la paroi du trou. Afin que les couches entourant la crépine et le tubage de protection soient uniformes, des centreurs sont placés tous les 6 à 12 m²⁰. Enfin, il est nécessaire de laisser dépasser un tube du sol pour éviter tout ruissèlement direct d'eau contaminée dans le puits de forage.

- *Nappe captive*

La majorité des éléments des dispositifs de pompage en nappe libre sont présents dans le cas des nappes captives. La différence majeure entre les deux se situe au niveau de la technique de forage. Il ne s'agit plus ici de forer d'une traite jusqu'à atteindre la nappe, le forage comprend en effet deux étapes (figure 6). La première consiste à forer jusqu'à atteindre la couche séparant l'aquifère libre de l'aquifère captif. Le foreur procède alors à une cimentation axiale sous pression par le bas et laisse le ciment prendre durant 24 à 48h²¹. De cette façon, le risque que les deux nappes communiquent une fois la couche de très faible perméabilité percée est considérablement diminué. Cela étant fait, le forage peut se poursuivre avec un diamètre de trou réduit.

2.2.1.2 Rejet de l'eau prélevée

Après son passage par l'échangeur de chaleur, l'eau puisée généralement aux alentours de 15°C voit sa température baisser de 3 à 5°C²². Deux possibilités sont alors envisageables : le rejet d'eau au sein de la nappe dans laquelle le pompage est effectué ou le rejet en surface en passant ou non par le réseau d'égouttage (bien qu'actuellement en Belgique seule la solution du rejet en surface n'ait de chance de recevoir les autorisations nécessaires au démarrage du projet cf. [chapitre 5](#)). Si deux puits sont forés, deux solutions s'offrent à l'exploitant : soit il utilise constamment l'un des deux pour pomper l'eau et l'autre pour la rejeter tel que présenté sur le schéma en haut de la figure 7, soit il conserve la zone chaude et la zone froide au même endroit et doit pour cela alterner pompage et rejet pour chaque puits en fonction de la saison. Cette technique présente comme avantage d'atteindre des coefficients de rendement exceptionnel. La chaleur contenue dans l'eau souterraine est transmise du sol à l'installation par convection forcée (cf. [chapitre 3](#)).

²⁰ Bart, 2011

²¹ Lemale & Gourmez 2008, p.37-40

²² Laplaige & Lemale, 2010

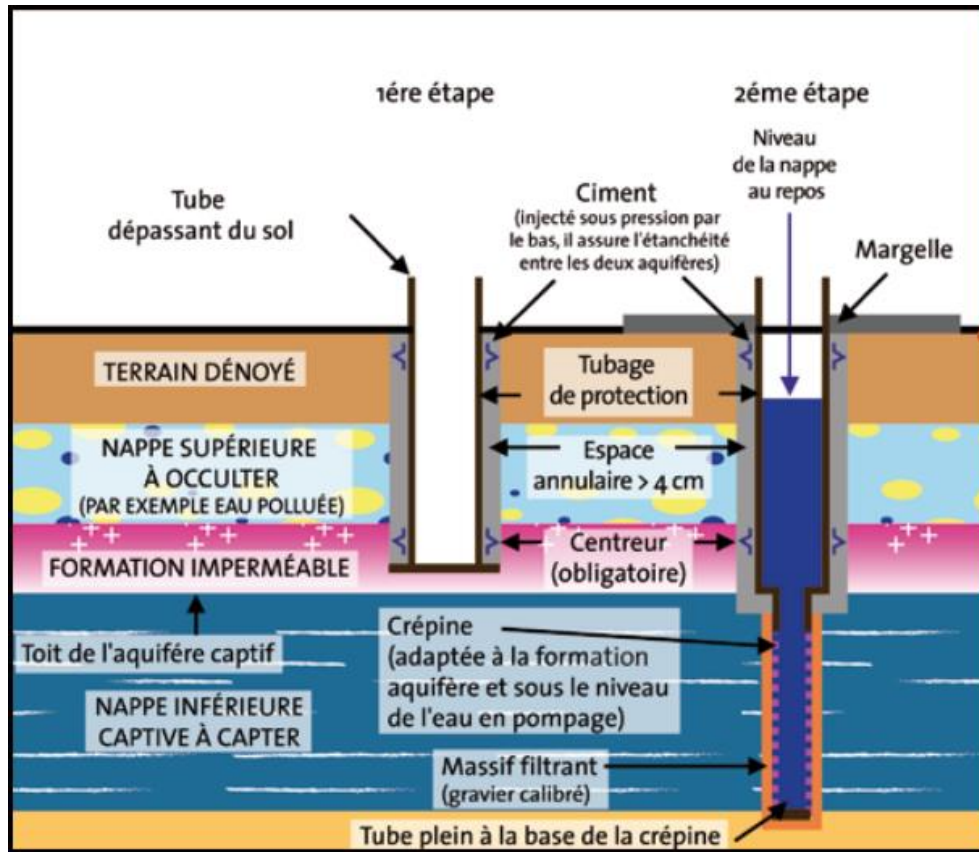


Figure 6 Coupe d'un système de pompage sur nappe captive (Lemale & Gourmez, 2008, p.39)

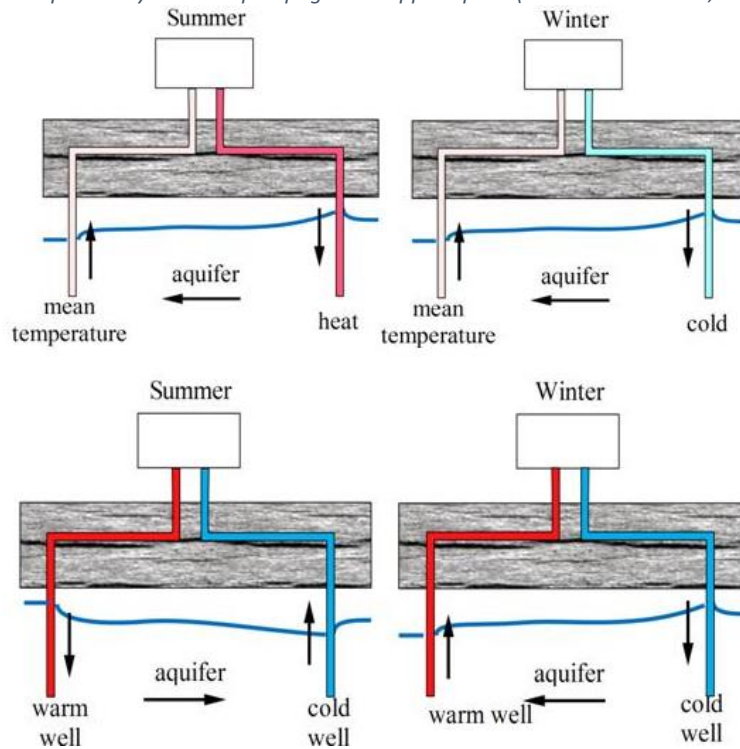


Figure 7 Deux types d'installation de système sur aquifère (Socaci, 2011)

2.2.2 Circuits fermés

En circuit fermé, le principe de base pour extraire de la chaleur du sol est d'y enfouir un tuyau parcouru d'un fluide caloporteur. Ce dernier circule au sein d'une boucle passant du sol à plus ou moins grande profondeur à l'échangeur thermique. Ainsi, par conduction au travers du tuyau le long de la partie enfouie, le sol transfère sa chaleur au fluide. Le système sous la surface du sol peut être vertical ou horizontal.

2.2.2.1 Boucle(s) horizontale(s)

Il s'agit du type de capteurs le moins profond (entre 0,8 et 4 m)²³. Comme le montre la figure 8, les différentes configurations possibles peuvent être regroupées en quatre catégories : les capteurs en serpentín et en escargot, les capteurs en anneau, les capteurs en spirale et les capteurs en corbeille.

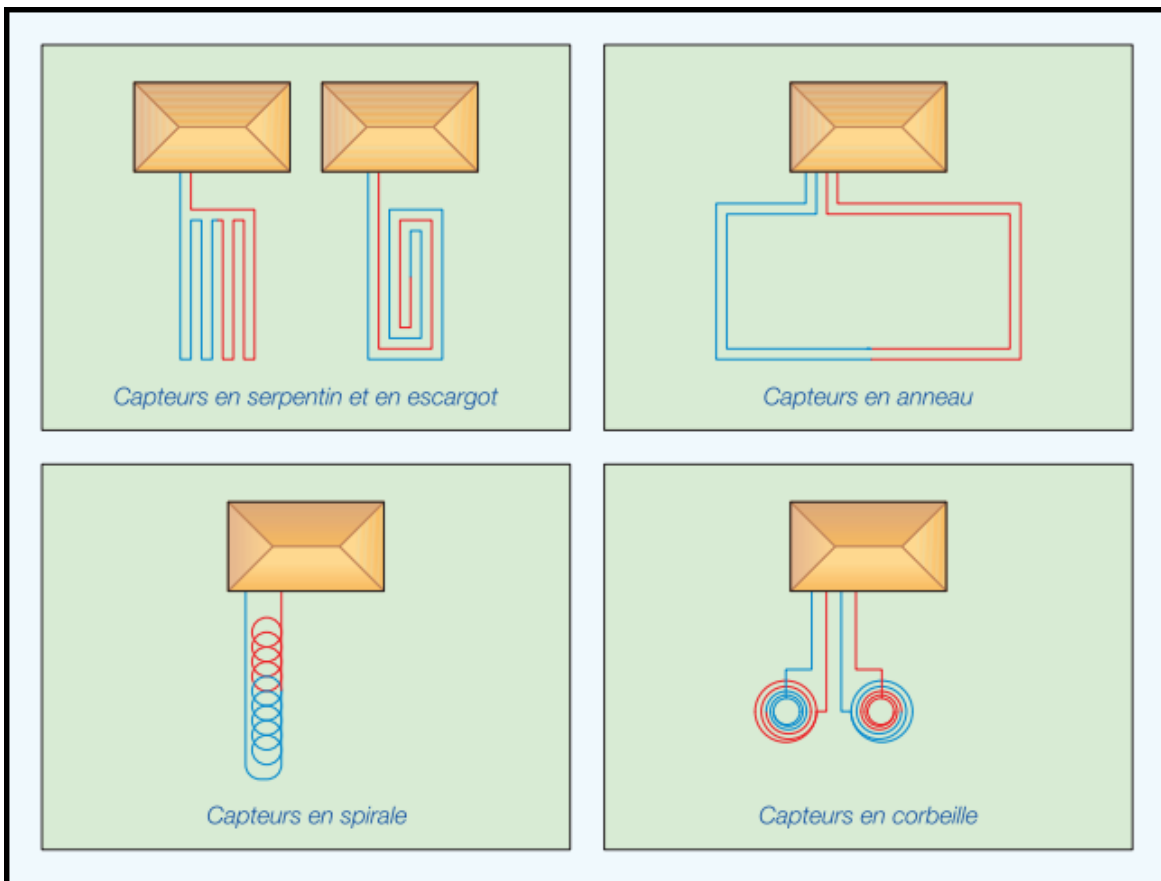


Figure 8 Types de configuration de capteurs verticaux (Caleffi, 2010, p.6)

La pose des capteurs horizontaux consiste en une opération nettement moins lourde qu'un forage. Il faut procéder soit en déblayant, soit en creusant des tranchées. Les tubes sont ensuite placés selon la configuration voulue et le terrain est remblayé.

²³ Caleffi, 2010, p.6

Un des avantages de la technique réside donc dans le fait de ne pas devoir atteindre des profondeurs importantes. Par contre, le dispositif monopolise une grande surface de terrain. En effet, bien que les tuyaux soient sous le sol, aucune installation ni arbre ou végétation importante ne peut se trouver au-dessus d'eux. D'une part, il faut éviter que les racines ne viennent se mêler aux boucles et, d'autre part, la superficie correspondant à l'emplacement des capteurs doit être exposée au soleil et à la pluie, les deux principaux éléments sources de l'apport de chaleur à cette profondeur. Il ne faut donc aucune ombre ni aucun revêtement de sol empêchant l'infiltration. Au-delà de la surface des capteurs, il est même conseillé de prendre des précautions en délimitant des zones telles que présentées sur la figure 9.

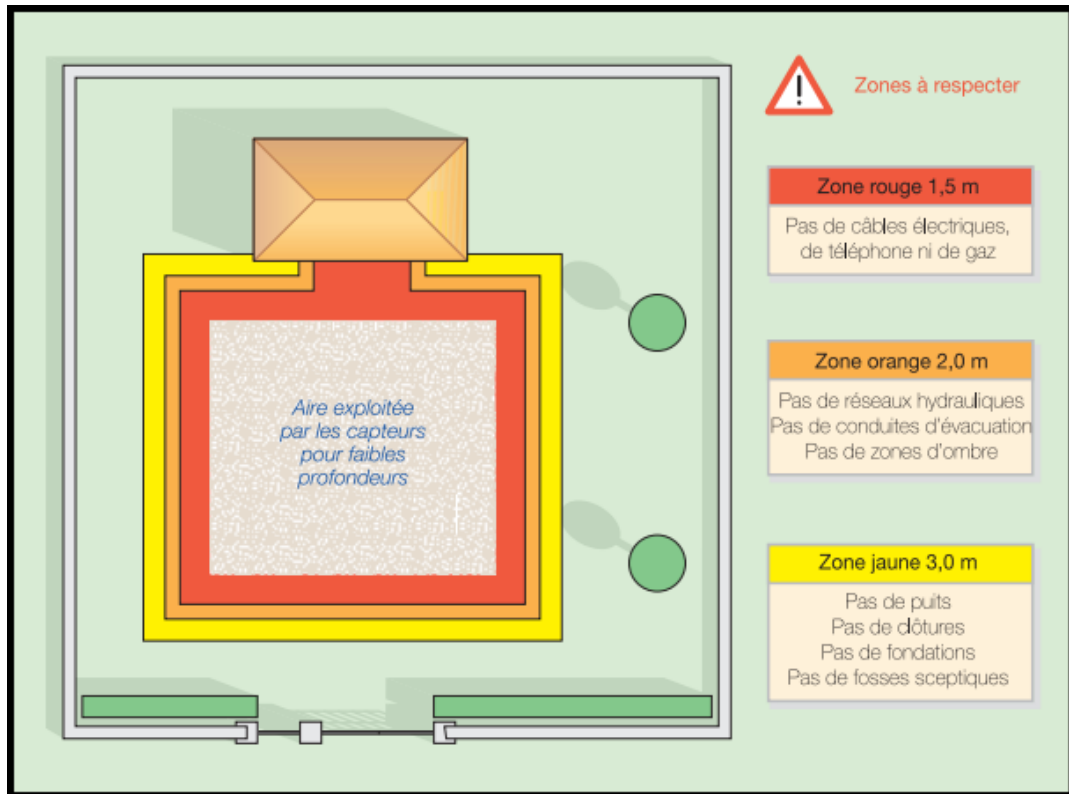


Figure 9 Zones de précaution autour de la surface occupée par les capteurs horizontaux (Caleffi, 2010, p.7)

2.2.2.2 Sondes verticales

À l'inverse des capteurs horizontaux, le système de sondes verticales peut aller jusqu'à des profondeurs importantes, mais n'occupe pas beaucoup de surface au sol. L'avantage qu'il présente par rapport aux installations sur aquifère est de ne pas dépendre de la présence d'une nappe. Nous verrons en effet au chapitre suivant que les sondes verticales peuvent être adaptées à la grande majorité des géologies rencontrées.

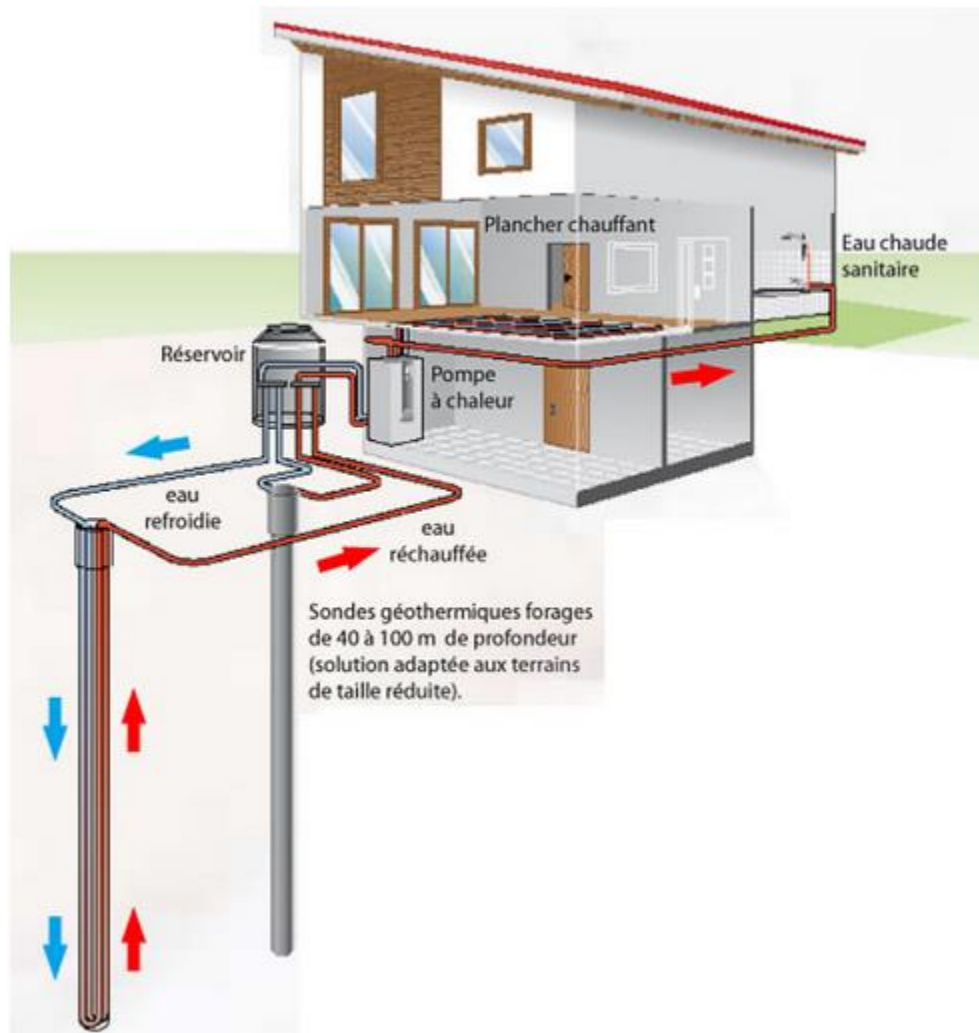


Figure 10 Schéma d'un système géothermique sur sondes verticales (DEC Energies, 2013)

Pour la mise en place d'une sonde verticale, il faut réaliser un forage pouvant aller jusqu'à 120-150 m. Une fois le trou effectué, il faut procéder rapidement pour éviter tout éboulement et contamination éventuelle. La boucle est alors introduite dans le trou de forage. Un poids en fonte placé au bout de la boucle peut faciliter la manipulation et est même nécessaire en présence d'eau pour un bon placement du tuyau²⁴. Un tube d'injection est introduit simultanément pour permettre la cimentation de la boucle dans le trou. En effet, dès que la boucle est posée, un coulis est introduit par injection sur toute la hauteur du forage. Cette cimentation permet de préserver les eaux souterraines, de protéger la boucle

²⁴ ADEME & BRGM, 2012b, p72

et ainsi prolonger la durée de vie de l'exploitation et, enfin, de permettre un meilleur échange de chaleur entre la boucle et le sol.

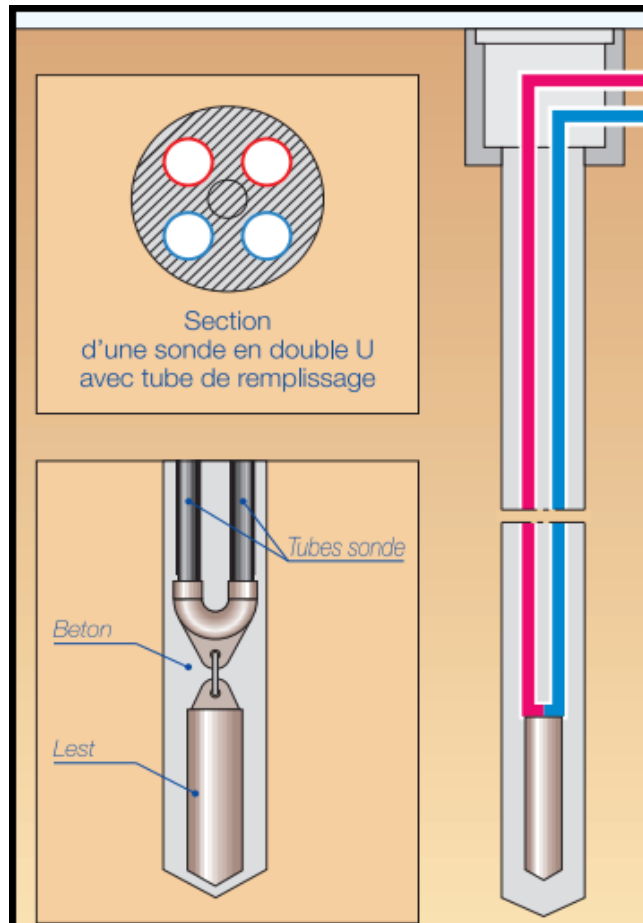


Figure 11 Installation de la boucle dans le trou de forage (Caleffi, 2010, p.19)

Il est vrai que, contrairement aux systèmes horizontaux, les tubes ne peuvent pas être en relation directe avec le sol. Le coulis, introduit entre les deux, doit donc présenter des qualités spécifiques à la géothermie telle qu'une conductivité thermique valant minimum $2W/(m.K)$ ainsi qu'une capacité à épouser le mieux possible les parois du forage afin d'optimiser le transfert thermique entre le sol et la boucle²⁵.

Cette boucle peut en réalité prendre différentes formes. Comme le présente la figure 12, un choix doit être effectué quant à la configuration et la géométrie employée pour la sonde mise en place. Il peut s'agir d'une sonde simple U, double U, coaxiale ou spiralée. Notons que dans le cas d'une sonde en U, il

²⁵ ADEME & BRGM, 2012b, p74

est parfois conseillé d'utiliser des écarteurs permettant d'éviter que la branche froide et la branche chaude ne se touchent.

Remarquons enfin que l'intérêt d'une telle technique est de pouvoir utiliser le sol pour stocker de la chaleur, il sera donc préférable de l'utiliser avec une utilisation couplée chauffage-geocooling.

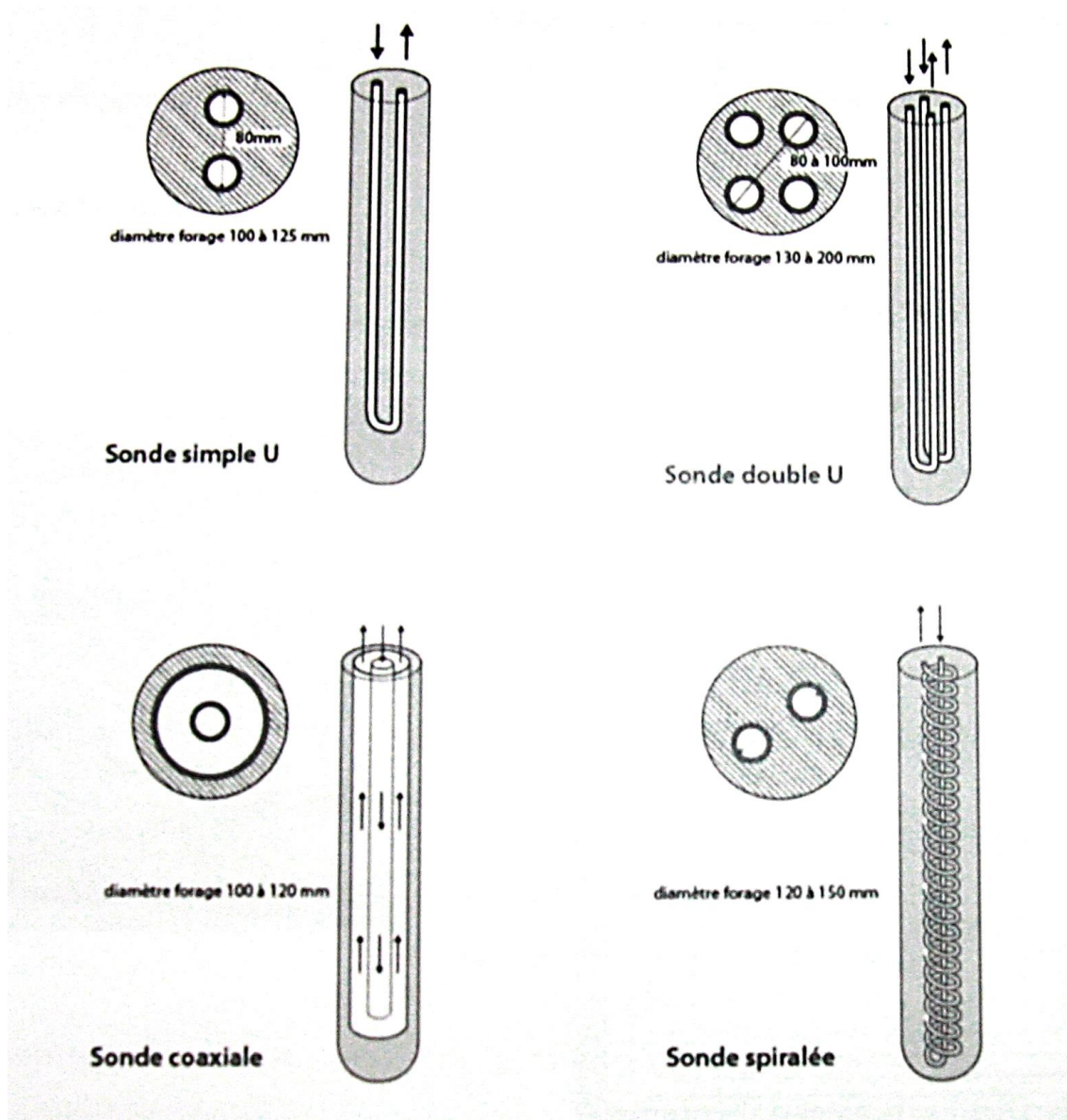


Figure 12 Configuration et géométrie possible pour les sondes géothermiques verticales (ADEME & BRGM, 2012b)

2.3 CONCLUSION

Ceci constituait donc un aperçu des différents types d'installation applicables à la géothermie à faible profondeur.

La remarque effectuée ci-dessus fait partie des éléments à prendre en considération lors du choix de la technique (sur aquifère, capteurs horizontaux, sondes verticales), mais aussi lors du dimensionnement de l'installation. Il faut en effet tenir compte de la demande en énergie du bâtiment et du confort attendu au sein de celui-ci en fonction des saisons. Une fois ce besoin évalué, une analyse des propriétés géologiques du sous-sol doit être réalisée afin de mettre en place un système durable, tel que défini dans le premier chapitre.

3. INFLUENCE DES PROPRIETES GEOLOGIQUES

3.1 TEMPERATURE

La température du sol évolue en fonction de la profondeur. Les installations géothermiques à très faible énergie correspondent à maximum 30°C. Le graphique suivant montre l'évolution des températures en fonction de la profondeur du sol et de la saison. Cette courbe illustre l'influence météorologique directe pour les zones sous la surface et l'inertie de plus en plus forte par rapport aux variations saisonnières à partir de 1 m de profondeur (intersection des courbes).

Température (moy, centre de la France) [°C]

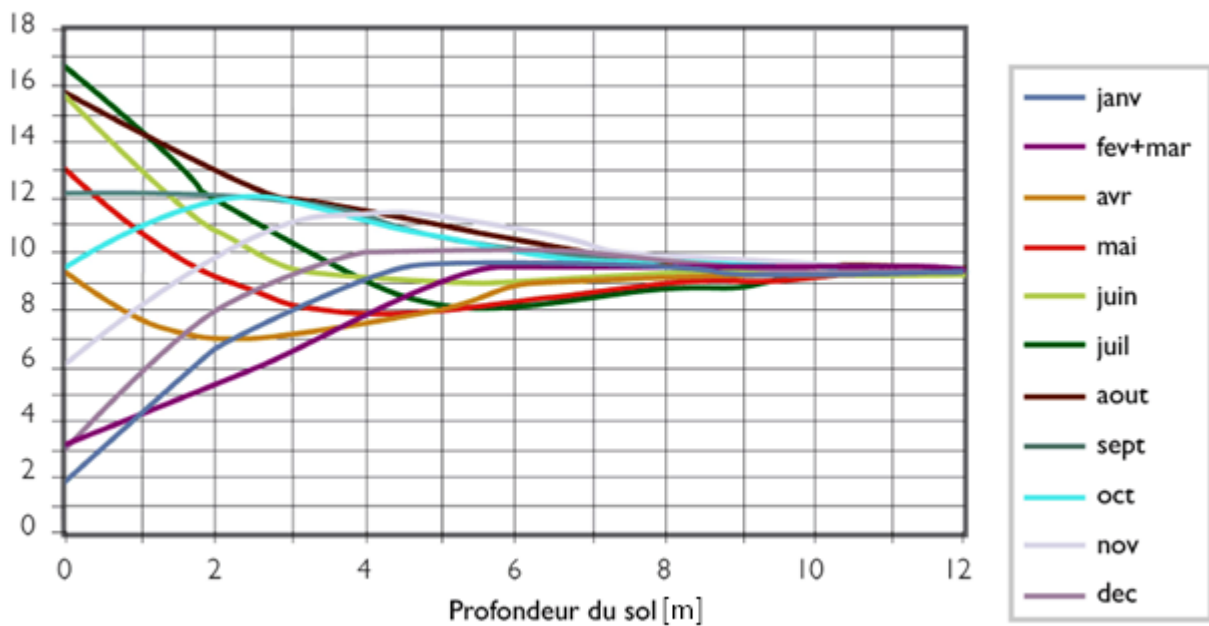


Figure 13 Études températures mesurées en fonction de la profondeur et du mois pour le centre de la France (Caquelin, n.d.)

À partir de 15m de profondeur, on observe une stabilisation à 10°C jusqu'à 30m au-delà desquels la température augmente d'en moyenne 3 à 4°C tous les 100m²⁶. Ces valeurs vont bien sûr varier une fois l'installation géothermique en place. Les dimensionnements dépendront en réalité davantage de la capacité thermique du sol ainsi que de sa conductivité thermique dans le cas de circuit fermé ; de débit et de vitesse d'écoulement dans le cas de systèmes sur nappes.

²⁶ Lemale, 2012, p.239

3.2 TRANSFERT DE CHALEUR DANS LE SOL

Il existe trois types de transfert de chaleur : conduction, convection et radiation. En géothermie de surface sont principalement considérés les deux premiers modes²⁷, mais le troisième peut parfois également prendre une place importante²⁸. Classiquement, un mélange de conduction et de convection est observé au travers de roches poreuses plus moins saturées. Dans le cas de roches cohérentes non poreuses, non fracturées, la convection sera seule à intervenir. La radiation quant à elle peut être prise en considération juste sous la surface où l'influence du soleil est importante.

3.3 DIMENSIONNEMENT DE SYSTEMES A SONDES VERTICALES

Pour le dimensionnement de sondes géothermique, il est préférable dans un premier temps de laisser de côté l'influence de la nappe en mouvement, celle-ci constituera un bonus le cas échéant, pour éviter une surestimation de l'apport en énergie de la nappe. Seule la conduction est dès lors considérée comme transfert de chaleur. Le transfert thermique par conduction s'effectue de proche en proche sans déplacement de matière, par interactions des molécules entre elles. Les paramètres influençant la conduction en géologie sont :

- La conductivité thermique de la matrice solide ;
- La conductivité du contenu des pores ;
- Le rapport entre le volume des pores et celui de la matrice ;
- Le transfert de chaleur aux frontières entre deux particules et entre la matrice et le contenu des pores.

À travers un matériau donné, le flux thermique (par conduction) est régi par la loi de Fourier²⁹ :

$$Q = -\lambda A \frac{d\theta}{dx}$$

Avec Q : le flux de chaleur [J/s=W]

λ : la conductivité thermique du matériau [W/(m.K)]

A : la section à travers laquelle le flux est mesuré [m²]

θ : le gradient de température [K/m]

La conductivité thermique représente la capacité d'un matériau à conduire la chaleur. Typiquement, le cuivre est un bon conducteur de chaleur, alors que les plastiques sont plutôt isolants en général. Les roches se trouvent entre les deux. Avec des conductivités thermiques tournant aux alentours de 1 à 3 W/(m.K), elles ne sont généralement ni trop isolantes, ni trop conductrices, ce qui leur confère

²⁷ Sanner, 2011, p.25

²⁸ Banks, 2008, p.37

²⁹ Bank, 2008, p.5

non seulement la capacité de transférer la chaleur à un capteur, mais aussi d'en stocker³⁰. Le quartz en revanche possède une conductivité particulièrement élevée (7 W/(m.K)) par rapport aux autres minéraux, la conductivité thermique d'une roche risque donc de fortement dépendre de sa proportion en quartz. Le tableau de la figure 15 le montre d'ailleurs avec des valeurs élevées pour le quartzite par exemple, la différence entre argilite et grès est également marquée. Ainsi sont répertoriées les conductivités thermiques mesurées pour les différents types de roches qui peuvent être rencontrées. La fourchette étant souvent assez large, une valeur supplémentaire est recommandée dans la dernière colonne pour la réalisation des calculs de dimensionnement. Lorsqu'il ne s'agit pas d'une moyenne, la valeur conseillée est inférieure à celle-ci. L'inverse amènerait davantage de risques de sous-dimensionnement des installations et de surexploitation des terrains.

Il existe également des tableaux donnant des indications sur la puissance d'extraction possible par unité de longueur de sonde.

Nature du sous-sol	Conductivité thermique (W/mK)	Puissance d'extraction W/m
Gravier, sable, sec	0,45	< 20
Gravier, sable, aquifère	2	60
Argile, limon, humide	1,7	35
Calcaire massif	2,8	52,5
Grès	2,3	60
Granite	3,4	62,5
Basalte	1,7	45
Gneiss	2,9	65

Figure 14 Puissance d'extraction selon la roche (Lemale, 2012, p.251)

³⁰ Banks, 2008, p.34

	Type of rock		Thermal conductivity (W/m/K)	
				recommended
Unconsolidated rock	Clay/silt, dry		0,4 - 1,0	0,5
	Clay/silt, water saturated		0,9 - 2,3	1,7
	Sand, dry		0,3 - 0,8	0,4
	Sand, water saturated		1,5 - 4,0	2,4
	Gravel, dry		0,4 - 0,5	0,4
	Gravel, water saturated		1,6 - 2,0	1,8
	Peat, soft lignite		0,2 - 0,7	0,4
Solid Sediments	Claystone, siltstone		1,1 - 3,5	2,2
	Sandstone		1,3 - 5,1	2,3
	Conglomerates		1,3 - 5,1	2,3
	Marl		1,5 - 3,5	2,1
	Limestone		2,5 - 4,0	2,8
	Dolomite		2,8 - 4,3	3,2
	Anhydrite		1,5 - 7,7	4,1
	Gypsum		1,3 - 2,8	1,6
	Salt		5,3 - 6,4	5,4
	Hard coal		0,3 - 0,6	0,4
Magmatites	Tuff		1,1	1,1
	Vulcanite, acid to intermediate	e.g. rhyolite, trachyte	3,1 - 3,4	3,3
		e.g. latite, dacite	2,0 - 2,9	2,6
	Vulcanite, alkaline to ultra-alkaline	e.g. andesite, basalt	1,3 - 2,3	1,7
	Plutonite, acid to intermediate	Granite	2,1 - 4,1	3,4
		Syenite	1,7 - 3,5	2,6
	Plutonite, alkaline to ultra-alkaline	Diorite	2,0 - 2,9	2,6
Gabbro		1,7 - 2,5	1,9	
Metamorphic rock	Slightly metamorphic	Clay shale	1,5 - 2,6	2,1
		Chert	4,5 - 5,0	4,5
	Moderately to highly metamorphic	Marble	1,3 - 3,1	2,5
		Quartzite	5,0 - 6,0	5,5
		Mica schist	1,5 - 3,1	2,2
		Gneiss	1,5 - 3,1	2,2
		Amphibolite	1,9 - 4,0	2,9
		e.g. rhyolite, trachyte	2,1 - 3,6	2,9

Figure 15 Conductivité thermique des roches (Sanner, 2011, p.26)

Malgré l'accès à ces abaques, il est largement recommandé d'effectuer un test de réponse thermique (TRT) avant l'installation de sondes verticales pour éviter les surprises une fois la machine en route. Ces TRT peuvent apporter une information précise sur la puissance disponible au lieu supposé de l'exploitation. Des tests ont notamment montré que la présence de failles ou fractures peut en effet considérablement changer la conductivité du milieu.

3.4 DIMENSIONNEMENT DE SYSTEMES SUR AQUIFERE

Contrairement à la conduction, la convection suppose un déplacement de matière. En géothermie, il s'agit d'eau. Cette eau contient une certaine énergie dépendant de sa température (4180 J/(l.K)). Par son déplacement, elle entraîne le transport de la chaleur qu'elle contient. Si ce mouvement est induit par une force extérieure, telle qu'exercée par une pompe dans le cas d'une installation sur aquifère, la convection qui en résulte est dite « forcée »³¹.

La formule suivante permet d'évaluer la quantité de chaleur par unité de temps qui peut être fournie dans une installation sur aquifère, autrement dit la puissance thermique obtenue W ³² :

$$W = q \cdot \rho \cdot C_p \cdot \Delta T$$

Avec q : le débit [m^3/s]

ρ : la masse volumique de l'eau [kg/m^3]

C_p : la capacité thermique massique [$J/(kg.K)$]

ΔT : la différence entre la température de production et de rejet [K]

En général, la puissance à obtenir est fixée par les besoins du bâtiment et c'est le débit nécessaire qui doit être déterminé puisque les autres paramètres ne peuvent pas être modifiés. La puissance de la source froide requise (W) multipliée par le coefficient de performance de la pompe à chaleur (COP) étant égale à la puissance nécessaire pour chauffer le bâtiment ($W_{bât}$), la formule devient³³ :

$$q = W_{bât} \cdot \left(1 - \frac{1}{COP}\right) \cdot \frac{1}{\rho \cdot C_p \cdot \Delta T}$$

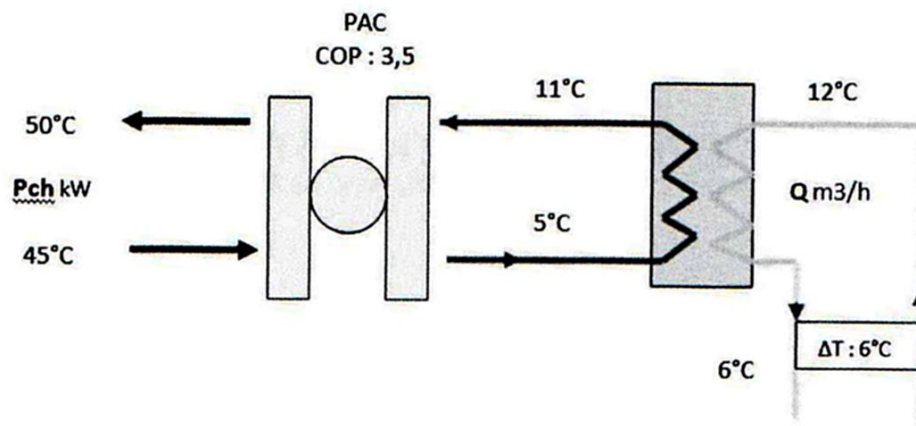


Figure 16 Exemple de fonctionnement en mode chauffage, P_{ch} correspond à $W_{bât}$ (Lemale, 2012, p.219)

³¹ Banks, 2008, p.38

³² VITO Team geo, 2012, p.7

³³ Lemale, 2012, p.218,-219

Pour le geocooling, il n'y a plus de passage par la pompe à chaleur et la formule est amputée du facteur $\left(1 - \frac{1}{COP}\right)$, la puissance nécessaire pour chauffer le bâtiment devant être remplacée par la puissance à extraire de celui-ci pour le refroidir.

Dans les deux cas, le débit est donc déterminant. Il faut dès lors vérifier sa disponibilité, celle-ci dépend de la porosité du sol, en particulier la porosité efficace qui caractérise les espaces où l'eau est mobilisable tout comme la perméabilité. En effet, la porosité est loin d'être indicatrice du débit à elle seule, l'argile est

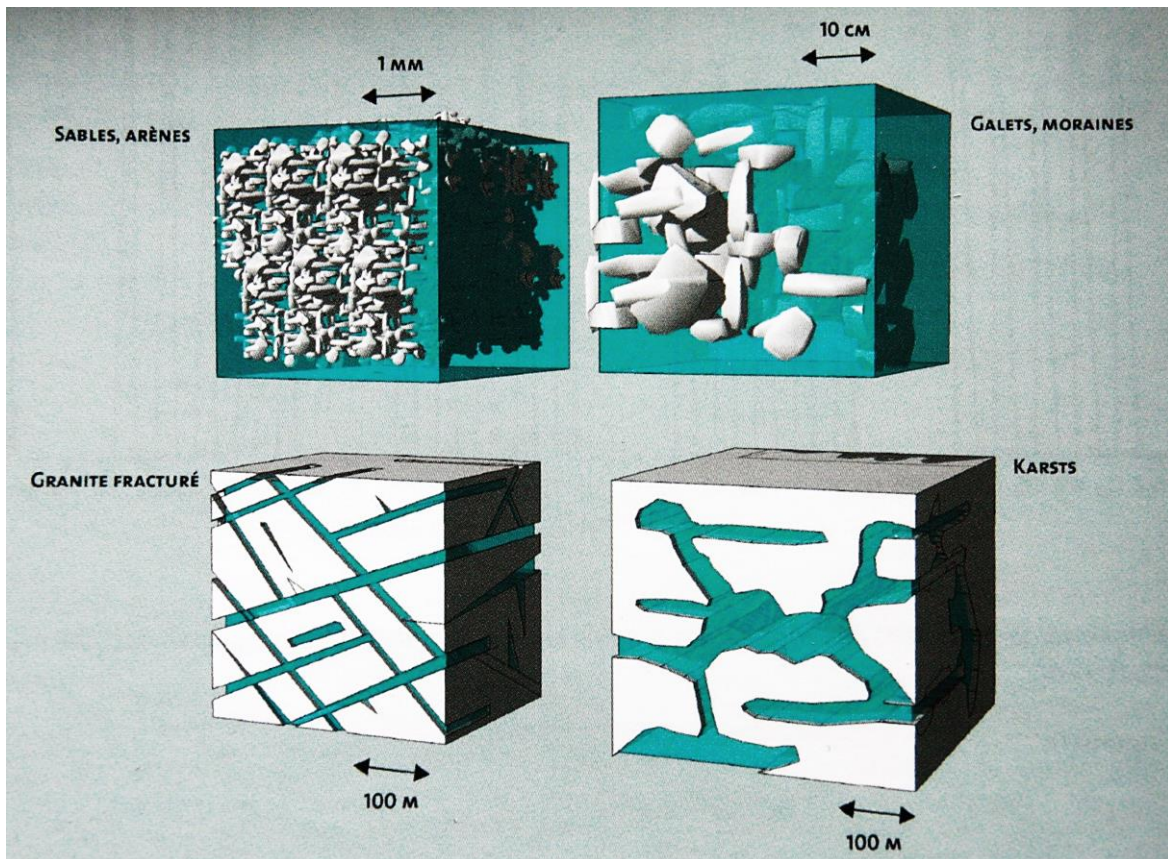


Figure 17 Types de porosité (ADEME & BRGM, 2012a, p.48)

particulièrement poreuse, mais n'autorise pas d'écoulement d'eau vu sa faible perméabilité. Les aquifères qui nous intéresseront sont plutôt ceux contenus dans des sables, des graviers ou des roches fracturées (cf. figure suivante). Par contre, il est déconseillé d'exploiter les zones karstiques qui risquent d'être associées à des instabilités lors du forage et une grande difficulté de mise en œuvre de l'installation.

3.5 FORAGE

La structure géologique en place est déterminante dans le choix de la technique de forage. Le tableau ci-après présente l'association pouvant être faite entre les techniques de forage existantes et les principaux types de roches rencontrés.

	Loose sand Gravel	Alluvial fans Glacial drift with loose Boulders	Clay, Silt, Shale	Sandstone Cemented Conglomerate s	Limestone	Limestone Cavernous	Basalt Layers	Basalt- HighlyFractur ed-Lost Circulation Zones	Granite&Other Non_Fractured Metamorphics
Cable tool	Slow	Slow-difficult	Slow-medium in brittle shale	Slow	Slow	Medium	Slow to medium	Slow, sometimes difficult	Slow
Direct rotary (air)	NOT RECOMMENDED			Fast	Fast	Slow	Fast	Medium	Medium to fast
Direct rotary (fluid)	Fast	Impossible to very slow	Fast	Med. to fast	Med. to fast	Slow to impossible	Slow to medium	Slow to impossible	Slow to medium
Air hammer	NOT RECOMMENDED			Harder types Fast	Very fast	Fast	Fast	Medium to fast	Fast
Reverse rotary	Fast	medium	Fast	Med. to fast	Medium	Slow to impossible	Slow to medium	Slow to impossible	Slow to medium
Drill thru-casing driver	Very fast	Medium to difficult	Fast	NOT APPLICABLE					
Dual wall	Very fast	Medium	Fast	Med. to fast	Med. to fast	Fast	Fast	Med. to fast	Slow to medium

Figure 18 Vitesse de forage en fonction de la technique et la géologie rencontrée (Arrizabalaga, 2011, p.68 – d’après Culver, 1998)

Comme dit plus haut, le forage en zone karstique est déconseillé.

3.6 CAPTEURS HORIZONTAUX

3.6.1 Dimensionnement

Le soleil apporte en moyenne, en Région wallonne, 1200 kWh/m² par an³⁴. Ceci influence principalement la géothermie à boucles horizontales dont le dimensionnement dépend, par ailleurs de la nature du sol, et, les propriétés de celui-ci étant peu variables jusqu’aux profondeurs concernées, des abaques ont pu être réalisés et reprennent la puissance maximale à extraire par mètre de tube ou par unité de surface dans le cas de boucles³⁵.

³⁴Région Wallonne et al., 2009, p.7

³⁵ Lemale, 2012, p.245-246

Nature du sol	Puissance d'extraction W/m	W/m ² – m ² /kW 1 boucle	W/m ² – m ² /kW 2 boucles
Sol sablonneux (sec)	10	20 - 50	25 - 40
Sol argileux (sec)	20	40 - 25	50 - 20
Sol argileux (humide)	25	50 - 20	62 - 16
Sol argileux (saturé d'eau)	35	70 - 14,5	86 - 12

Figure 19 Puissance d'extraction pour les capteurs horizontaux (Lemale, 2012, p.246)

3.6.2 Mise en place

Les capteurs horizontaux sont généralement en contact direct avec le sol. Il est dès lors important de minimiser l'espace libre entre les tubes et la roche, l'air et même l'eau étant moins conductrice que la matrice solide. Cela ne pose pas de problème lorsqu'il s'agit de sable. Mais lorsque le sol est composé de silt et d'argile, il est généralement nécessaire de broyer les mottes risquant de ne pas épouser correctement la forme de tube. Il arrivera même qu'un ciment permettant un meilleur contact soit coulé dans les terrains les plus hétérogènes.

3.7 CONCLUSION

En conclusion, les installations à circuit fermé sont presque partout envisageables. Pour les installations à capteurs horizontaux, la place est le paramètre le plus déterminant, ils occupent deux fois la surface à chauffer³⁶. Quant aux sondes géothermiques, utilisées notamment quand la superficie à chauffer devient trop grande, géologiquement elles rencontrent très peu de freins. Elles conviendraient à 99% du territoire³⁷. Cela montre que la limitation du développement de la géothermie à faible profondeur n'a pas pour origine première le sous-sol rencontré en Wallonie. Par contre, en ce qui concerne les circuits ouverts, il y a nettement plus de contraintes. La présence d'une nappe est requise et son débit doit être suffisamment grand, mais une fois les conditions rencontrées, le système est nettement plus rentable.

³⁶ Lemale, 2012, p.250

³⁷ VITO Team geo, 2012, p.11

4. NUISANCES ET RISQUES PROPRES A LA GEOTHERMIE A FAIBLE PROFONDEUR

Si la géothermie peut générer des conséquences environnementales positives comme la réduction de gaz à effet de serre, elle induit également, comme toute activité, des impacts environnementaux négatifs. Deux phases peuvent être distinguées pour déterminer les nuisances et les risques liés à l'utilisation d'un système géothermique à faible profondeur : la phase de mise en place et la phase d'exploitation d'un système.

4.1 INSTALLATIONS A BOUCLES HORIZONTALES

4.1.1 Phase de mise en place des boucles

La pose de capteurs horizontaux ne nécessite pas de forage. Dans la plupart des cas, quelques tranchées peu profondes suffiront. Il n'y a donc pas de risque important pour le sous-sol. Par contre, comme cela a été expliqué dans le [chapitre 2](#), le système requiert l'absence de végétation trop importante sur la surface qui s'y rapporte et cette dernière ne peut être étanchéifiée. S'il y a présence d'arbres, ils devront donc être déracinés.

4.1.2 Phase d'exploitation

Indépendamment de la suppression directe d'une partie de la végétation, la croissance des plantes peut être affectée par l'exploitation du système en place. Pour éviter cela, il faut être particulièrement attentif au dimensionnement de l'installation. En effet, une surexploitation de l'énergie thermique du terrain peut amener à la destruction des plantes (principalement du gazon ou des fleurs) couvrant la superficie au-dessus des capteurs, voire empêcher la végétation proche de cette zone de pousser. Le second risque lié à une extraction trop intense de la chaleur du sol est associé à une chute de la puissance d'installation. Si la température de la source froide diminue, le COP baisse lui aussi. Une situation extrême peut entraîner une incapacité du système à répondre aux besoins du bâtiment³⁸.

4.2 SYSTEMES SUR AQUIFERE ET SONDES VERTICALES

4.2.1 Forage

La réalisation du forage nécessaire aux systèmes sur aquifère ou à l'installation de sondes peut être accompagnée de nuisances sonores liées aux machines employées. Ce type de nuisance ne sera jamais

³⁸ Caleffi, 2010, p.7

éliminé, mais il peut être atténué à travers l'utilisation d'un moteur peu bruyant. Il est également possible de jouer sur les horaires, le bruit étant nettement moins bien accueilli la nuit que le jour³⁹.

Une partie des risques rencontrés, lors d'un forage, est liée à l'impossibilité d'observer ce qui se trouve sous le sol à l'œil nu. Bien sûr, de nombreuses méthodes, allant de l'utilisation des cartes géologiques à la prospection géophysique, en passant par la consultation de différents documents d'urbanismes, permettent de préciser les connaissances sur le sous-sol à exploiter. Ces données pourront être employées lors d'une étude préliminaire. Les informations que celle-ci peut apporter sont d'une très grande importance pour éviter divers impacts. Un forage ne peut, par exemple, pas être envisagé s'il risque de rencontrer un objet tel qu'une ligne à haute tension, une conduite d'eau, voire une conduite de gaz⁴⁰.

De même, il est impératif d'avoir une vision relativement précise de la géologie, des caractéristiques géotechniques et de l'hydrogéologie. En effet, les aquifères constituent le lieu principal des dommages envisageables sur l'environnement lors d'un forage. En supposant que le site étudié présente un risque de pollution au niveau du sol, celle-ci risque fortement de se propager dans la nappe lors de la formation d'un trou constituant un chemin tout tracé pour les contaminants⁴¹. Des techniques de forage existent pour ces cas précis et permettent de maîtriser les risques. Le borbier fait également partie de ces dangers aujourd'hui bien maîtrisés, il peut survenir lors du forage et être source de rejets de boues, de gaz et de contamination de la nappe libre.

Lors d'un forage en nappe captive, il faut être particulièrement précautionneux afin de ne pas laisser la nappe libre et la nappe captive entrer en contact⁴². À nouveau, les connaissances préalables sur l'hydrogéologie entrent en jeu. Il faut non seulement avoir connaissance de la présence éventuelle d'une nappe captive, mais également en connaître sa profondeur ainsi que l'épaisseur de la couche peu perméable qui la surplombe. Idéalement, la hauteur piézométrique de cet aquifère sera également connue afin de prévoir les pressions pouvant être rencontrées et adapter la technique. Comme cela a été présenté dans le [chapitre 2](#), un aveuglement est nécessaire si la nappe captive doit être atteinte.

4.2.2 Exploitation d'un système sur aquifère

Les impacts éventuels des installations sur nappe souterraine peuvent prendre diverses formes et il est indispensable d'y prêter attention à l'heure où la protection des eaux souterraines doit impérativement faire partie de nos priorités⁴³.

Il existe, tout d'abord, un risque de baisse du niveau de la nappe. Le chapitre précédant présente, à ce sujet des méthodes de caractérisation hydrogéologique dont il est nécessaire de s'inspirer pour parvenir à un équilibre entre le volume pompé et la recharge naturelle sur l'année. Si, toutefois, l'eau prélevée est

³⁹ Raymond, 1998

⁴⁰ Banks, 2008, p.281-282

⁴¹ Banks, 2008, p.282

⁴² Santi et al., 2006, Mayo, 2010

⁴³ Kehew, 2006, p.20-21

réinjectée dans la nappe en constituant, dès lors, une recharge artificielle pour celle-ci, le volume entrant égale le volume sortant et l'impact sur l'installation d'un point de vue volumétrique peut être considéré comme nul⁴⁴. Selon plusieurs auteurs, cette solution apparaît comme étant la meilleure au niveau environnemental. A contrario, le rejet d'eau dans des canalisations menant à l'épuration semble inadapté environnementalement parlant, puisqu'il amène à la réalisation inutile d'un traitement.

Si le niveau global de la nappe est maintenu, il faut toutefois prêter attention à l'environnement direct du puits. En effet, dans la zone d'influence du pompage, le niveau de la nappe baisse et une variation du régime de la nappe peut se ressentir à parfois plusieurs kilomètres du lieu de pompage⁴⁵. Il est important de s'assurer qu'aucun ouvrage n'en sera affecté, qu'aucune pompe ne sera dénoyée, par exemple. Le pompage d'essai joue un rôle important dans cette vérification.

S'ajoute à cela les impacts liés aux hausses et aux baisses de température. Lorsque l'eau est réinjectée dans la nappe, sa température a changé. Cela ne pose, à priori, pas nécessairement de problème si un équilibre s'établit entre recharge d'eau froide et d'eau chaude (bien que nous verrons ci-après des conséquences de changement à moyen terme sur la microbiologie). Mais, si ce n'est pas le cas, le gradient géothermique ne permettant pas de combler la différence de température, plusieurs conséquences peuvent subvenir.

Premièrement, comme le premier chapitre l'a suggéré, les besoins présents, s'ils ont déjà une installation, ou futur des voisins risquent d'être compromis. Il arrive que cela ne soit pas assez considéré et es problèmes ont déjà été constatés notamment à Toulouse et Lyon. Dans ces régions, le chauffage durant la période froide de l'année ne suffit pas à compenser la hausse de la température de la nappe induite par la climatisation. À Lyon, une hausse de température de l'eau pompée dans d'autres installations que celles utilisées pour la géothermie a pu être constatée.

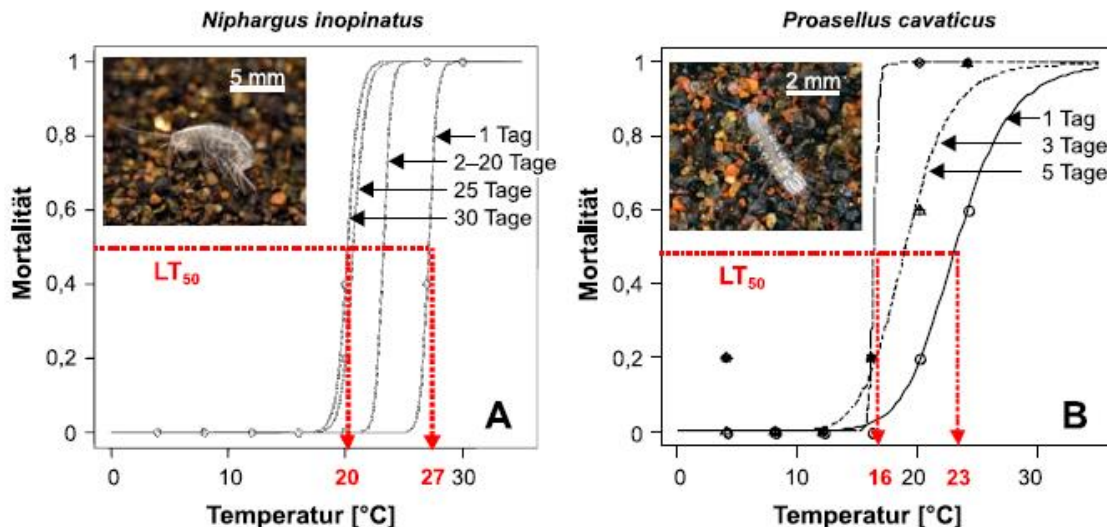


Figure 20 Evaluation de la mortalité de deux espèces en fonction de la température et du temps d'exposition (Briemann et al., 2011)

⁴⁴ Bonte et al., 2011 ; Lemale, 2012, p.224

⁴⁵ Ferguson, 2006 ; Lemale, 2012, p.224-225

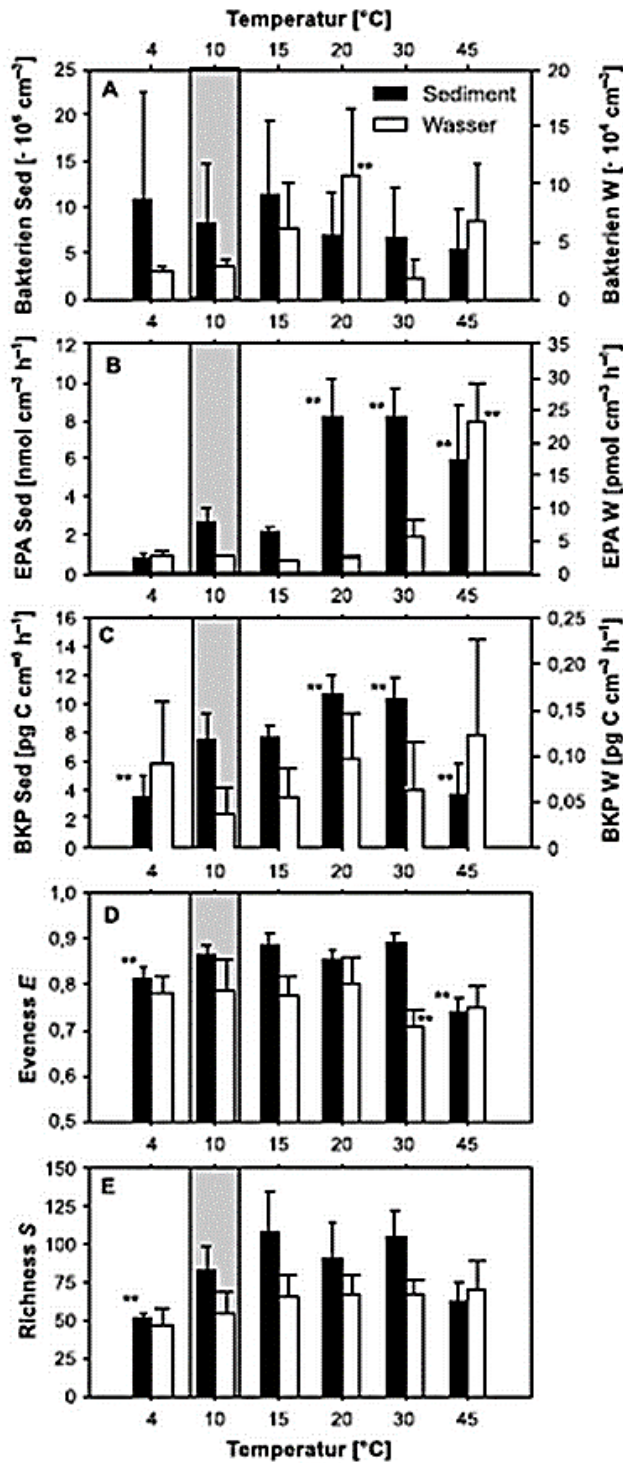


Figure 21 Influence de la température sur différents paramètres caractérisant l'activité microbienne (Brielmann et al., 2011)

Par ailleurs, une installation municipale a subi un développement de bactéries filamenteuses⁴⁶. Il s'agit là du second problème envisageable : un déséquilibre écologique. Les nappes souterraines renferment en effet une biodiversité souvent insoupçonnée, il existerait 50 000 espèces souterraines dont 7000 ont déjà pu être décrites⁴⁷. Il a pu être montré que plusieurs mécanismes microbiens vivants dans le sous-sol sont sensibles aux variations de température, aussi bien aux augmentations qu'aux diminutions. Observons sur les graphiques suivants l'influence de la température sur la mortalité, la structure et l'activité microbienne souterraine.

Remarquons que, même à moyen terme, une augmentation de température peut être conséquente. L'impact peut être très localisé, mais, en fonction du nombre d'installations et de leur rayon d'influence thermique, les dégâts peuvent être plus importants. De plus, s'il n'existe pas encore beaucoup de documents sur les conséquences d'une perturbation de la biodiversité souterraine, il faut rester méfiant par rapport au fait qu'en cas de pollution, ces organismes agissent parfois sur la décomposition du contaminant et leur absence autour d'un point plus vulnérable n'est pas à négliger⁴⁸. Une perturbation biologique des nappes peut également aboutir à une variation de la chimie

⁴⁶ Bézègues-Courtade et al., 2013

⁴⁷ CWEPSS, s.d. ; Griebler, 2009 ; Goldscheider, 2006

⁴⁸ Lansing et al., 2003 p. 663, 1010-1012 ; Kehew, 2006, p.495-496

des eaux souterraines. Enfin, une variation de température peut diminuer ou augmenter l'activité microbienne comme cela a pu être constaté à Lyon. Le risque d'obstruction d'un tube de pompage ou de corrosion dans un puits ou une installation horizontale est, donc, également fonction de cela. La modification de l'activité microbienne est bel et bien démontrée⁴⁹ doit également être surveillée par rapport à la qualité des eaux potabilisables. Il faut en effet éviter le développement d'agents pathogènes. Des incertitudes demeurent sur le sujet, mais il semblerait toutefois opportun dans un premier temps, par précaution, d'éviter la géothermie dans les zones de protection de captage d'eau destinée à la consommation⁵⁰

4.2.3 Exploitation d'une installation à sondes verticales

Comme pour les systèmes à circuits ouverts, une pollution thermique peut entrer en jeu, mais une pollution autre peut également survenir. Il existe en effet un risque de contamination des nappes souterraines par le fluide caloporteur en raison d'un percement du tubage endommagé⁵¹. Les conséquences dépendront de la nature du fluide circulant dans les boucles. Dans les systèmes verticaux, comme cela a été vu dans le second chapitre, il est nécessairement question d'un système à fluide intermédiaire. Il circulera, dès lors, dans la sonde, de l'eau dite glycolée. Une étude a montré que certains composés sont davantage à proscrire que d'autres. En effet, alors que l'éthylène et le propylène glycol sont rapidement biodégradables en conditions aérobie et anaérobie et se dégradent sans qu'il ne soit formé de composés intermédiaires toxiques, la bétaine présente, à contrario, une plus grande menace pour l'environnement et est donc déconseillée⁵². Un suivi de différents paramètres tels que la perte de charge dans les tuyaux permet toutefois de gérer au mieux les risques de contamination qui reste présent via l'ajout de substances anticorrosives et de biocides. Ces additifs servant à prévenir les fuites diminuent la biodégradabilité des agents antigel précités⁵³. D'un point de vue environnemental, il est difficile de trancher, le mieux serait bien sûr de trouver des alternatives à ces additifs.

⁴⁹ Brielmann et al., 2009

⁵⁰ Schijven et al., 2006

⁵¹ Bonte et al., 2011

⁵² Klotzbücher et al. 2007

⁵³ Klotzbücher et al. 2007

5. CADRE JURIDIQUE WALLON RELATIF A LA GEOTHERMIE A FAIBLE PROFONDEUR

Le cadre législatif wallon relatif aux impacts environnementaux de la géothermie de surface est basé sur la nécessité d'obtention de permis. En effet, dans la majorité des cas, un permis d'environnement sera requis pour l'exploitation de cette source d'énergie. Deux types de permis entrent en réalité en jeu pour la partie souterraine de l'installation : le permis d'environnement et le permis unique.

Le permis d'environnement est défini comme « la décision de l'autorité compétente, sur base de laquelle l'exploitant peut exploiter, déplacer, transformer ou étendre un établissement de 1^{re} ou 2^e classe, pour une durée et à des conditions déterminées » (De Doncker, 2013, p13) ; le permis unique, quant à lui, est défini comme « la décision de l'autorité compétente relative à un projet pour lequel il apparaît, au moment de l'introduction de la demande de permis, que sa réalisation requiert un permis d'environnement et un permis d'urbanisme, appelé alors un projet mixte » (De Doncker, 2013, p81).

Le « permis unique » combine donc « permis d'environnement » et « permis d'urbanisme » pour les projets nécessitant les deux types d'autorisation. Les installations géothermiques se retrouvent régulièrement dans ce cas de figure ; néanmoins, ce qui nous intéressera principalement concerne la partie environnementale des autorisations. Celle-ci sera en effet évaluée selon les mêmes critères pour les deux types de permis, le formulaire à remplir pour la demande d'un permis unique étant le même que pour le permis d'environnement, complété par d'autres documents relatifs à l'urbanisme. Les procédures diffèrent toutefois sur certains points, notamment quant à la durée de la procédure et la possibilité de modifier le projet au cours de celle-ci. Ce dernier élément ne se retrouve qu'exclusivement dans le cas de permis unique⁵⁴.

Comme cela a été présenté brièvement dans le [chapitre 2](#), les installations géothermiques nécessitent l'emploi d'une pompe à chaleur, celle-ci ne faisant pas l'objet d'une analyse approfondie dans ce travail, la réglementation s'y rapportant est évoquée, mais ne sera pas détaillée. L'attention a, à nouveau, été retenue sur la partie relative au captage de l'énergie thermique du sol.

5.1 GENERALITES

5.1.1 Le décret et ses arrêtés

Le décret posant le cadre de ce type d'autorisation est celui du 11 mars 1999 relatif au permis d'environnement entré en vigueur le 1^{er} octobre 2002 (abrégé DPE dans la suite du texte). D'une façon générale, le but de celui-ci consiste en la protection de l'environnement, mais aussi de la population contre les nuisances résultantes d'une exploitation humaine parmi lesquelles : la pollution de l'air, des sols, des

⁵⁴ De Doncker, 2013, p82-86

eaux de surface et souterraines, la diminution de la qualité de la biodiversité, la surexploitation des ressources, etc.⁵⁵. Les objectifs du DPE sont explicités dans son article 2.

Il constitue également l'aboutissement d'un projet de rassemblement en un seul permis d'un certain nombre d'autorisations relatives, entre autres, à la prise d'eau, au rejet d'eaux usées, en plus de l'autorisation d'exploitation. Il remplace et succède donc à de nombreuses autorisations auparavant indépendantes les unes des autres⁵⁶.

Il traduit enfin la volonté du législateur de remédier au problème de lenteur fréquemment observé dans le processus, voire d'absence de décision⁵⁷. Nous verrons donc que des délais sont impartis au décideur. Au-delà de ceux-ci, le demandeur connaît la réponse à sa demande, même dans le cas où elle n'a pas été formellement transmise, et a la possibilité, s'il le désire, d'introduire un recours en cas de refus du permis.

Si le titre du décret reprend le terme de « permis d'environnement », il détermine pourtant deux types de démarches différentes à effectuer selon les risques supposés associés à l'activité : d'une part la *déclaration*, ce régime impose au démarcheur de communiquer à l'autorité une série d'informations concernant son exploitation, avant et tout au long de sa mise en pratique à intervalles réguliers, d'autre part le *permis d'environnement* dont la délivrance par la police administrative détermine le droit pour le démarcheur de mener à bien son projet⁵⁸.

Plusieurs arrêtés traduisent le DPE et apportent des précisions à l'exploitant quant au régime auquel il est soumis. Quel que soit le projet, quatre d'entre eux doivent être consultés. Dans le décret édité aux Editions de la Chambre de Commerce et d'Industrie figurent en effet :

- L'Arrêté du Gouvernement wallon du 4 juillet 2002 relatif à la procédure et à diverses mesures d'exécution du décret du 11 mars 1999 relatif au permis d'environnement. Il apporte à l'exploitant les modalités nécessaires dans sa démarche pour l'obtention d'un permis ou pour sa déclaration. C'est en annexe de cet arrêté que se trouvent les formulaires à compléter lors de l'introduction de la demande.
- L'Arrêté du Gouvernement wallon du 4 juillet 2002 arrêtant la liste des projets soumis à étude d'incidences et des installations et activités classées. Il existe en effet trois classes différentes selon lesquelles l'exploitant sera tenu de faire une déclaration ou de réaliser la démarche pour l'obtention d'un permis d'environnement, accompagnée ou non, d'une étude d'incidence. Nous reviendrons plus précisément sur ce point par la suite.

⁵⁵ Barnich et al., 2003, p.20 ; De Doncker, 2013, p.12

⁵⁶ Karolinski, 2013 ; Nibelle, 2008, p.9-10 ; Barnich et al., 2003, p.20

⁵⁷ Nibelle, 2008, p.9-10

⁵⁸ Barnich et al., 2003, p.21 ; De Doncker, 2013, p.12-13

- L'Arrêté du Gouvernement wallon du 4 juillet 2002 fixant les conditions générales d'exploitation des établissements visés par le décret du 11 mars 1999 relatif au permis d'environnement. Il s'agit des conditions applicables à l'exploitation du demandeur, en principe quelles qu'elles soient. Il arrive que dans certains cas des conditions sectorielles, particulières ou intégrales permettent de déroger aux règles fixées par l'arrêté⁵⁹.
- L'Arrêté du Gouvernement wallon du 4 juillet 2002 organisant l'évaluation des incidences sur l'environnement dans la Région wallonne.

5.1.2 Dans quel cas effectuer une demande ?

L'obtention d'un permis d'environnement ou l'introduction d'une déclaration est nécessaire lorsque les deux conditions suivantes sont réunies :

1. L'activité ou l'installation concernée figure dans la liste de l'arrêté ;
2. L'action relative à l'activité ou l'installation consiste en une exploitation, un déplacement, une transformation ou une extension.

Il peut être ajouté que l'exploitant doit introduire une nouvelle déclaration tous les dix ans⁶⁰.

5.1.3 Classement d'un établissement

La liste des établissements classés indique donc au demandeur le régime auquel il est soumis en fonction de son installation. Si aucun élément de son projet ne peut être associé aux activités et installations reprises dans la liste, il n'a pas de compte à rendre concernant l'incidence de celui-ci sur l'environnement. Dans le cas contraire, la ou les activités qui le concernent sont classées en fonction de « leurs impacts sur l'homme et sur l'environnement ainsi que leur aptitude à être encadrées par des conditions générales, sectorielles ou intégrales » (Article 3, al. 1^{er} D.P.E). Ce classement est donc listé dans un arrêté. Les informations qui s'y retrouvent sont les suivantes :

Numéro - Installation ou activité	Classe	EIE	Organismes à consulter	Facteurs de division		
				ZH	ZHR	ZI

Ainsi, chaque installation ou activité est nommée et précédée du numéro qui lui correspond en fonction de la nomenclature européenne. La classe de celle-ci est alors précisée indiquant si le demandeur est concerné par un permis ou une déclaration. Les activités et installations de classes 1 verront une croix apparaître dans la colonne « EIE », ce qui signifie que la demande devra être accompagnée d'un rapport

⁵⁹ Barnich et al., 2003, p.22

⁶⁰ Barnich et al., 2003, p.39

d'étude d'incidences environnementales. Les organismes à consulter sont également indiqués. Enfin, la dernière colonne concerne d'éventuels facteurs de division. Ceux-ci s'appliquent parfois en fonction du type de zone dans laquelle le projet doit s'implanter. Il porte sur la grandeur qui précise la catégorie d'installation concernée (par exemple le nombre de têtes d'un élevage) et ne sera pas rencontré pour les installations géothermiques.

Bien que les activités et installations soient reprises dans la liste, c'est l'établissement dans sa totalité qui est classé. Cela est important, car la notion d'établissement peut aussi englober des éléments non classés s'ils se rapportent directement à l'unité technique et géographique de ce dernier et s'ils peuvent avoir une incidence sur l'environnement ou l'homme. Le décret indique que la classe de l'établissement est celle de l'activité ou l'installation qui lui est incluse ayant le plus d'impact sur l'homme ou l'environnement. Cela signifie qu'il ne s'agit pas d'office de la classe rencontrée la plus élevée. Rappelons en effet que cette classe est également déterminée en fonction de l'aptitude de l'activité à être encadrée par des conditions générales, sectorielles ou intégrales ⁶¹.

5.1.4 Procédures

Dans le cas où l'établissement est soumis à étude d'incidence, celle-ci doit être réalisée avant l'introduction de la demande et jointe à cette dernière. Un droit de dossier doit être versé et s'élève à 125 € dans le cas d'un établissement de classe 2 et 500 € pour la classe 1⁶².

Lors de la demande de permis, un formulaire doit être introduit (pour une déclaration cf. l'annexe XI du formulaire). Mis à part pour les projets agricoles, le formulaire de base est le même pour tous. En revanche, les annexes à compléter dépendent du projet. Plusieurs annexes se rapportent aux différents types d'installations géothermiques. En effet, l'annexe III (Formulaire relatif aux prises d'eau), IV (Formulaire relatif aux demandes de déversement d'eaux usées des stations d'épuration publiques), VIII (Formulaire relatif aux recharges artificielles d'une nappe souterraine), XVIII (Formulaire relatif au forage et à l'équipement de puits) sur lesquelles nous reviendrons par la suite se rapportent aux prises d'eau, au déversement d'eaux usées, à la recharge artificielle d'une nappe et au forage.

Une fois le dossier réceptionné, l'administration le transmet au fonctionnaire technique, c'est-à-dire, au Directeur de la Direction extérieure de la DPA de la commune concernée. Le fonctionnaire technique a alors 15 jours pour juger du caractère complet et recevable de la demande. Dans le cas où le dossier est jugé incomplet, 30 jours sont accordés au demandeur pour se mettre en ordre⁶³.

5.1.5 Durée des procédures

En ce qui concerne les permis, la procédure d'autorisation s'étend sur plusieurs mois. La durée maximale peut aisément être évaluée étant donné que les délais sont explicitement donnés dans le décret.

⁶¹ Barnich et al., 2003, p.29 ; De Doncker, 2013, p.12

⁶² De Doncker, 2013, p.18

⁶³ Barnich et al., 2003, p.53-54

Pour les établissements de classe 2, si la demande est complète et recevable, le demandeur sera informé de la décision dans un délai de 90 jours maximum. Si, toutefois, la demande est jugée incomplète, cela peut aller jusqu'à 140 jours de procédure. À ces deux nombres, peuvent être additionnés 30 jours, sur demande du fonctionnaire technique.

Le même type de schéma est appliqué pour les établissements de classe 1 avec 150 jours (ou 160 jours selon l'établissement) lorsque la demande est d'emblée jugée complète et recevable, et 200 jours (ou 210 jours) dans le cas contraire. À nouveau, 30 jours peuvent être ajoutés à ces délais⁶⁴. Remarquons que les étapes préliminaires à la demande, en particulier dans le cas d'une réalisation d'étude d'incidences sur l'environnement, peuvent également demander beaucoup de temps.

5.1.6 Outils pour la prise de décision⁶⁵

Le demandeur est tenu de respecter certains éléments légaux et réglementaires sur lesquels doit se baser l'autorité pour rendre sa décision. D'autres textes ne sont, quant à eux, pas réglementaires, mais pourront aider l'autorité, qui conserve toutefois un pouvoir d'appréciation discrétionnaire, dans sa prise de décision. Cette dernière devra malgré tout systématiquement être motivée, qu'elle s'écarte ou non des avis émis dans les textes à disposition.

- *Conditions générales et sectorielles*

Les conditions générales concernent l'ensemble des activités et installations classées. Les conditions sectorielles, en revanche, concernent les installations ou activités se rapportant à un secteur économique ou territorial précis ou présentant un risque particulier.

« Respecter les conditions générales et sectorielles constitue une condition nécessaire, mais pas suffisante à l'octroi d'un permis d'environnement » (Barnich, 2003, p67). L'autorité compétente a donc le devoir de refuser le permis dans le cas où ces conditions ne sont pas respectées. Mais dans le cas inverse, le demandeur n'a pas la garantie d'obtenir l'autorisation. D'autres éléments doivent en effet être pris en compte dans l'étude du dossier et l'autorité elle-même peut parfois ajouter des conditions particulières aux conditions générales et sectorielles.

- *Plans d'aménagement du territoire*

Ils désignent le type d'activité autorisé sur chaque parcelle de terrain. Il est parfois possible de déroger à ces plans, mais uniquement sous des conditions très strictes.

- *Plans d'environnement*

Parmi ceux-ci se retrouve le plan wallon en matière d'environnement et de développement durable. Il présente une série d'objectifs fixés pour la Wallonie.

⁶⁴ Barnich et al., 2003, p.47-48

⁶⁵ Le contenu de cette section est principalement basé sur les ouvrages de Barnich et al., 2003 et De Doncker, 2013

- *Avis et réclamations*

Différentes autorités et organismes peuvent être consultés durant la procédure. De même, le public doit être informé et a le droit de donner son avis ou d'émettre une réclamation quant à un projet d'établissement. Des informations précieuses peuvent être recueillies dans ce cadre, notamment en ce qui concerne des particularités du sous-sol aux alentours.

- *Étude d'incidence et formulaire de demande*

Pour les établissements de classe 1, l'étude d'incidence constitue un outil d'aide à la décision important. Aux établissements de classe 2 peuvent être associés les formulaires de demande apportant également un certain nombre de données dont la connaissance peut faciliter la prise de décision.

- *Ligne de conduite et directive administrative*

La ligne de conduite correspond à la façon que prévoit l'autorité d'exercer son pouvoir d'appréciation discrétionnaire dans un domaine particulier. Elle peut être formalisée par une directive administrative ou résulter des précédentes décisions prises par l'autorité. La ligne de conduite n'étant pas un règlement, il est permis de s'en écarter. Le cas échéant, l'autorité doit justifier ce choix.

- *Principe de précaution et principe de prévention*

Ces deux principes interviennent également dans la justification de certaines décisions en matière de délivrance de permis.

5.2 APPLICATION AUX INSTALLATIONS GEOTHERMIQUES A FAIBLE PROFONDEUR

5.2.1 Classement des installations

Dans les pages qui suivent sont présentées les activités et installations classées pouvant être rencontrées en géothermie à faible profondeur. Rappelons que la classe de l'ensemble du projet sera celle de l'élément le plus incident sur l'environnement qu'il comporte. S'il l'on considère toutefois le projet centré uniquement sur une installation géothermique, les démarches exigées en terme d'environnement vont du néant à l'étude d'incidence environnementale. Cela va de soi au vu de la diversité des installations et des risques et impacts qui leur sont associés.

[40.3 PRODUCTION ET DISTRIBUTION DE VAPEUR ET D'EAU CHAUDE, PRODUCTION DE FROID OU DE CHALEUR][A.G.W. 10.11.2005]	
40.30.01	Centrale thermique et autres installations de combustion dont la puissance installée est égale ou supérieure à 0,1 MW et inférieure à 200 MW
40.30.01.01	égale ou supérieure à 200 MW
40.30.01.02	égale ou supérieure à 200 MW
40.30.02	Installation de production de froid ou de chaleur mettant en oeuvre un cycle frigorifique (à compression de vapeur, à absorption ou à adsorption) ou par tout procédé résultant d'une évolution de la technique en la matière :
40.30.02.01	dont la puissance frigorifique nominale utile ^{29bis} est supérieure ou égale à 12 kW et inférieure à 300 kW ou contenant plus de 3 kg d'agent réfrigérant fluoré][A.G.W. 10.11.2005]
40.30.02.02	dont la puissance frigorifique nominale est supérieure ou égale à 300 kW][A.G.W. 10.11.2005]

[29bis]: Puissance frigorifique nominale utile (en kW) : la puissance frigorifique maximale fixée et garantie par le constructeur comme pouvant être fournie en marche continue tout en respectant les rendements utiles annoncés par le constructeur.][A.G.W. 10.11.2005]

Numéro - Installation ou activité	Classe	EIE	Organismes à consulter	Facteurs de division		
				ZH	ZS	ZI
[41 CAPTAGE (PRISE D'EAU), TRAITEMENT ET DISTRIBUTION D'EAU][A.G.W. 22.01.2004]						
[41.0 CAPTAGE (PRISE D'EAU), TRAITEMENT ET DISTRIBUTION D'EAU][A.G.W. 22.01.2004]						
[41.00 Captage (prise d'eau), traitement et distribution d'eau][A.G.W. 22.01.2004]						
[41.00.01	Installation pour la ou les prise(s) d'eau et/ou le traitement des eaux de surface potabilisables ou destinées à la consommation humaine][A.G.W. 22.01.2004]	2	DE			
[41.00.02	Installation pour la ou les prise(s) d'eau et/ou le traitement des eaux souterraines potabilisables ou destinées à la consommation humaine][A.G.W. 22.01.2004]					
[41.00.02.01	d'une capacité de prise d'eau et/ou de traitement inférieure ou égale à 10 000 000 m³/an à l'exception des installations visées en 41.00.02.03][A.G.W. 22.01.2004]	2	DE			
[41.00.02.02	d'une capacité de prise d'eau et/ou de traitement supérieure à 10 000 000 m³/an][A.G.W. 22.01.2004]	1	X	DE		
[41.00.03	d'une capacité de prise d'eau et/ou de traitement inférieure ou égale à 10 m³/jour ou approvisionnement moins de 50 personnes, lorsque la fourniture ne s'effectue pas dans le cadre d'une activité commerciale, touristique ou publique][A.G.W. 22.01.2004]	3				
[41.00.03	Installation pour la ou les prise(s) d'eau et/ou le traitement des eaux souterraines non potabilisables et non destinées à la consommation humaine][A.G.W. 22.01.2004]					
[41.00.03.01	d'une capacité de prise d'eau et/ou de traitement inférieure ou égale à 10 m³/jour et à 3 000 m³/an][A.G.W. 22.01.2004]	3				
[41.00.03.02	d'une capacité de prise d'eau et/ou de traitement supérieure à 10 m³/jour et à 3 000 m³/an et inférieure ou égale à 10 000 000 m³/an	2		DE		
[41.00.03.03	d'une capacité de prise d'eau et/ou de traitement de plus de 10 000 000 m³/an][A.G.W. 22.01.2004]	1	X	DE		
[41.00.04	Installation pour la recharge ou les essais de recharge artificielle des eaux souterraines][A.G.W. 22.01.2004]	1	X	DE		

Figure 22 Troncature de la liste des établissements et activités classés présentée en annexe de l'arrêté du Gouvernement wallon arrêtant la liste des projets soumis à étude d'incidences et des installations et activités classées; en jaune, ceux se rapportant à la géothermie de surface (<http://environnement.wallonie.be/legis/pe/pe006bis.htm>)

Numéro - Installation ou activité	Classe	EIE	Organismes à consulter	Facteurs de division		
				ZH	ZHR	ZI
45 CONSTRUCTION						
[45.1 PREPARATION DES SITES] [A.G.W. 22.01.2004]						
[45.12. Forage et équipement de puits] [A.G.W. 13.09.2012]						
[45.12.01. Forage et équipement de puits destinés au stockage de déchets nucléaires ou destinés à recevoir des sondes géothermiques.] [A.G.W. 13.09.2012]	2		DE			
[45.12.02. Forage et équipement de puits destinés à une future prise d'eau souterraine (hormis les forages inhérents à des situations d'urgence ou accidentelles).] [A.G.W. 13.09.2012]	2		DE			
74.3 ESSAIS ET ANALYSES TECHNIQUES						
74.30 Essais et analyses techniques						
74.30.01 Centre d'essais et d'analyses	3					
74.30.02 Centre d'essais et d'analyses occupant au moins 7 personnes	2		[...]			
[74.30.03. Forage et équipement de puits de reconnaissance géologique, de puits de prospection, de piézomètres, ou de puits de contrôle de la qualité de l'eau.] [A.G.W. 13.09.2012]	3					
90.1 TRAITEMENT DES EAUX						
90.10 [Déversement d'eaux usées industrielles telles que définies à l'article D.2, 42°, du Livre II du Code de l'Environnement, contenant le Code de l'Eau, dans les eaux de surface, les égouts publics ou les collecteurs d'eaux usées						
90.10.01 Rejets supérieurs à 100 équivalent-habitants/jour ou comportant des substances dangereuses visées aux annexes I et VII du Livre II du Code de l'Environnement contenant le Code de l'Eau] [A.G.W. 21.12.2006]	2		DE			

Figure 23 Idem

Ainsi, une installation à boucles horizontales ne fera l'objet d'aucune démarche d'un point de vue environnemental si la PAC, à laquelle elle est reliée, a une puissance inférieure à 12kW et contient moins de 3kg d'agent réfrigérant fluoré. A contrario, un système ouvert rejetant l'eau pompée dans la nappe sera soumis à étude d'incidence.

Reprenons les différents points concernés dans leur ordre d'apparition sur la liste.

- *Pompe à chaleur*

Comme présenté dans le [chapitre 2](#), elle se retrouve dans la plupart des installations géothermiques à faible profondeur. Selon sa puissance et la quantité de fluide frigorigène qu'elle contient, les exigences qui lui sont associées correspondent à une déclaration ou une demande de permis.

Des conditions intégrales et sectorielles ont été établies pour les machines frigorifiques. L'exploitant d'une pompe à chaleur est notamment tenu par certaines obligations principalement axées sur la prévention de fuite de fluide réfrigérant. Une réglementation est également appliquée aux techniciens pratiquant des interventions sur les pompes à chaleur contenant des agents réfrigérants fluorés. Pour être reconnus comme « techniciens frigoristes spécialisés », leur entreprise doit en effet être agréée par la Région wallonne⁶⁶.

- *Prise d'eau*

La réglementation relative aux prises d'eau ne concerne que les installations à circuit ouvert. En fonction du débit pompé quotidiennement et annuellement, le régime associé est la déclaration ou le permis d'environnement (ou unique) avec ou sans étude d'incidence. Des conditions sectorielles ont récemment été établies concernant le pompage d'eau.

- *Rejet d'eau dans la nappe*

Certains circuits ouverts sont conçus de telle façon qu'après son passage dans l'échangeur thermique, l'eau pompée est réintroduite dans la nappe. Quel que soit le débit considéré, ce type d'installation nécessite un permis unique et une étude d'incidence doit être réalisée.

Remarquons qu'un tel projet n'a jamais été réalisé en Wallonie. Et pour cause, si elle n'est pas interdite à proprement parler au sein de la législation, la recharge artificielle de nappe souterraine est sujette à une proposition de refus systématique d'octroi de permis par l'administration. Cette décision s'inspire du principe de précaution, si une substance polluante devait être introduite par ce biais dans la nappe, il semble qu'il serait trop difficile, voire impossible, de l'en extraire ensuite⁶⁷.

⁶⁶ Fallon, 2009

⁶⁷ Fallon, 2009

- *Forage*

L'opération de forage est également classée. Que ce soit pour accueillir des sondes géothermiques dans le cas d'installation à boucles verticales ou pour une prise d'eau dans le cas d'un circuit ouvert, le forage est de classe 2. En revanche, les forages effectués afin de réaliser un test de réponse thermique entrent dans le régime de la déclaration.

Les forages destinés à recevoir des sondes géothermiques ne font à ce jour l'objet d'aucune condition sectorielle⁶⁸.

- *Rejet d'eau en surface*

Cette activité n'est classée (en classe 2) qu'à partir d'un certain débit de l'eau rejetée dans les eaux de surface, dans les égouts ou collecteurs d'eaux usées. Ce débit est de 100 équivalent-habitant/jour, 1EH correspondant à 180l, il s'agit, donc, de 18000 l/j.⁶⁹

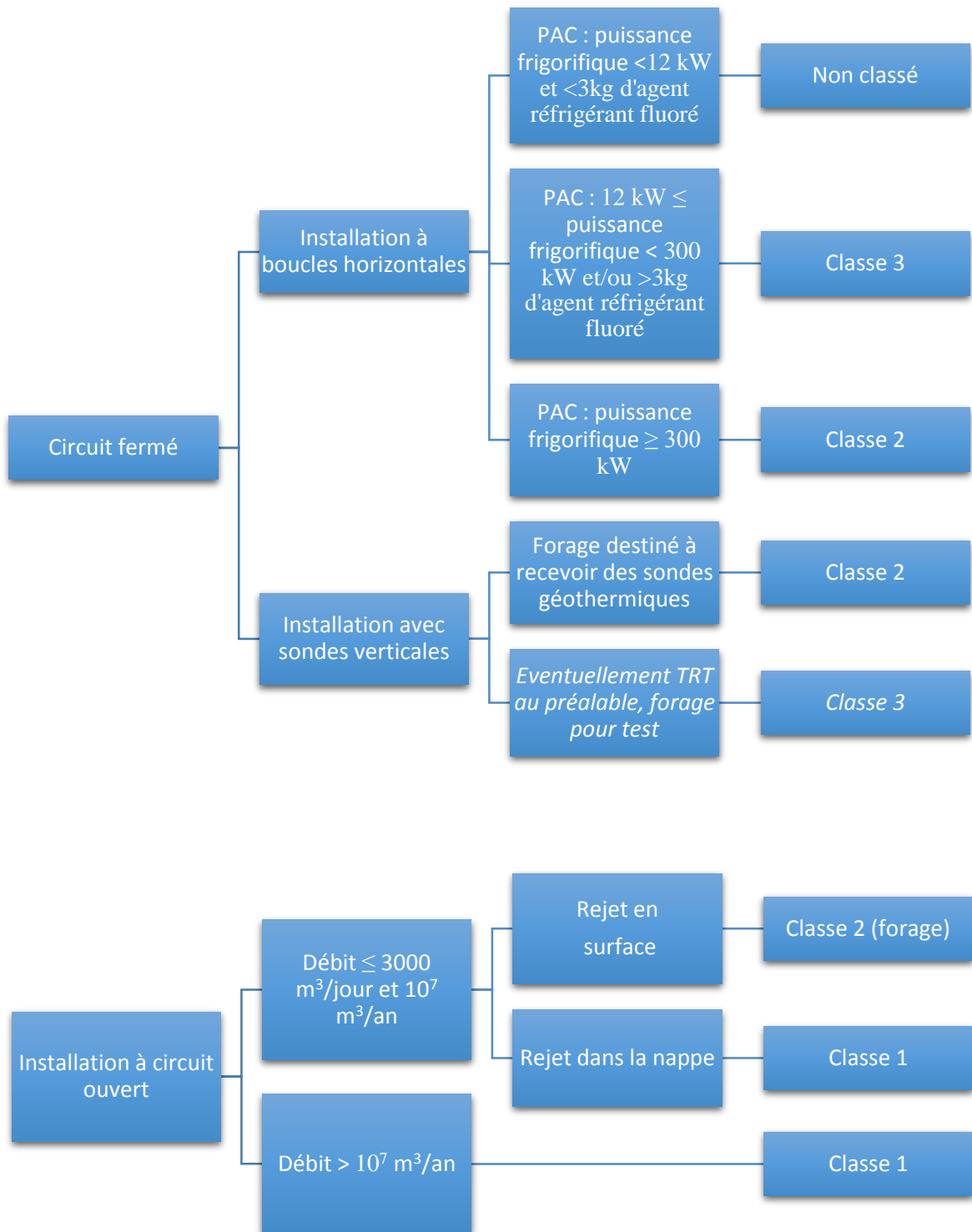
Remarquons que pour les établissements de classe 3, le demandeur est tenu de vérifier s'il existe bien des conditions intégrales se rapportant à son activité ou installation ce qui, dans les cas présentés ci-dessus, est confirmé⁷⁰.

⁶⁸ Jumel, 2013

⁶⁹ Fallon, 2009

⁷⁰ Barnich et al., 2003, p.30

Les schémas suivants résument le régime imposé selon le type d'installation :



5.2.2 Les conditions intégrales et sectorielles en géothermie

L'ensemble des conditions sectorielles et intégrales relatives à la géothermie de surface se trouve en annexe (hormis celles relatives aux pompes à chaleur). Nous reprendrons ici les points importants vis-à-vis de l'analyse des impacts environnementaux effectuée dans le [chapitre 4](#) qui y figurent.

Les textes présentant les conditions intégrales et sectorielles relatives aux prises d'eau font référence à l'arrêté du Gouvernement wallon relatif aux prises d'eau souterraine, aux zones de prise d'eau, de prévention et de surveillance, et à la recharge artificielle des nappes d'eau souterraine. Les installations géothermiques sur aquifère sont concernées par la catégorie A, C et D au sein de l'arrêté. En effet, les catégories C et D comprennent notamment le pompage d'eau non vouée à être rendue potable avec la différence que la catégorie C se rapporte aux débits prélevés supérieurs à 10 m³ par jour ou 3 000 m³ par an et la D aux débits inférieurs. La catégorie A, quant à elle, concerne les ouvrages d'essai ou temporaires. La zone de prise d'eau des ouvrages de catégorie C doit être protégée par des haies denses ou des barrières. Cette zone est définie de la manière suivante (également pour les autres catégories) : « Pour toutes les prises d'eau, la zone de prise d'eau est délimitée par la ligne située à une distance de dix mètres des limites extérieures des installations en surface strictement nécessaires à la prise d'eau » (Art. 9, al. 1^{er}). Cette zone est évoquée dans les conditions intégrales et sectorielles.

- *Conditions intégrales relatives aux installations pour la ou les prise(s) d'eau et/ou le traitement des eaux souterraines non potabilisables et non destinées à la consommation humaine*⁷¹

Ces conditions s'appliquent pour des débits inférieurs à 10m³/jour et 3000m³/an. Ce type d'installation étant de classe 3, il est logique de retrouver des conditions intégrales s'y rapportant. Bien qu'il soit peu probable que ce débit suffise à un système géothermique, il est tout de même intéressant d'y prêter attention afin de comparer les exigences selon le débit et tenter de comprendre les raisons pour lesquelles elles diffèrent les unes des autres.

L'article 3 de l'arrêté s'appuie sur le principe de prévention et déclare que les équipements doivent être « réalisés et aménagés de manière à éviter toute contamination de la nappe d'eau souterraine et de l'eau prélevée » (Art. 3).

L'article 4, à nouveau basé sur la prévention, impose une protection du puits contre tout acte volontaire ou non risquant d'amener une pollution de l'eau prélevée ou de la nappe. Concrètement, il est imposé à l'exploitant de sceller son puits.

⁷¹ Arrêté du Gouvernement wallon déterminant les conditions intégrales relatives aux installations pour la ou les prise(s) d'eau et/ou le traitement des eaux souterraines potabilisables ou destinées à la consommation humaine et aux installations pour la ou les prise(s) d'eau et/ou le traitement des eaux souterraines non potabilisables et non destinées à la consommation humaine (M.B. 12.03.2009)

La zone de prise d'eau définie précédemment doit être établie de telle sorte que le ruissellement d'eau en son sein et à sa frontière soit dirigé vers l'extérieur. Aucune activité ou installation ne peut y prendre place (hormis celles nécessaires à l'extraction de l'eau).

Enfin, le volume prélevé est contrôlé annuellement, l'exploitant est donc tenu d'installer un compteur. Remarquons que ces conditions sont aussi bien applicables pour l'eau potabilisable destinée à la consommation humaine que pour l'eau non potabilisable.

- *Conditions sectorielles relatives aux installations pour la ou les prise(s) d'eau et/ou le traitement des eaux souterraines non potabilisables et non destinées à la consommation humaine* ⁷²

Les débits dont il est question ici sont compris entre 10 et 3000 m³/jour et entre 3000 et 10⁷ m³/an. Les conditions sectorielles reprennent les conditions intégrales et y ajoutent des exigences supplémentaires. Des précautions sont notamment à prendre pour le placement de piézomètres lié à l'installation. Comme cela a été évoqué précédemment, il est imposé à l'exploitant de placer une enceinte tout autour de la zone de captage pour éviter que des personnes n'étant pas liées à l'exploitation y pénètrent. L'ouvrage de prise d'eau doit être muni d'un repère altimétrique, celui-ci sera utile lors de mesures de hauteurs piézométriques. Un compteur d'eau doit également être placé, mais cette fois aucune possibilité d'y déroger n'est présentée et, contrairement aux conditions intégrales, des critères précis concernant les types de compteurs sont établis.

Plus contraignantes donc que les conditions intégrales, les conditions sectorielles imposent également la mise en place de dispositifs permettant la prise d'échantillon de l'eau brute et la mesure de la hauteur d'eau, cette dernière doit d'ailleurs être effectuée tous les mois. L'arrêté prévoit que les conditions particulières permettent de s'assurer que le volume d'eau prélevé d'entraîne pas de variation trop importante de la hauteur d'eau de la nappe et notamment que le débit d'étiage des cours d'eau alimentés par la nappe reste garanti.

Le chapitre IV de l'arrêté est consacré aux conditions sectorielles pour les exploitations de pompages d'essai et de pompages temporaires. Les conditions particulières assurent dans ce cas la protection de la nappe. Une aire de protection temporaire est déterminée. L'eau pompée doit être évacuée à travers une conduite étanche, ce qui évite la stagnation ou l'infiltration aux alentours du trou de pompage. Il existe également des exigences en termes d'équipement du puits : celui-ci doit

⁷² Arrêté du Gouvernement wallon déterminant les conditions sectorielles relatives aux installations pour la ou les prise(s) d'eau et/ou le traitement des eaux souterraines potabilisables ou destinées à la consommation humaine et aux installations pour la ou les prise(s) d'eau et/ou le traitement des eaux souterraines non potabilisables et non destinées à la consommation humaine et modifiant l'arrêté du Gouvernement wallon du 4 juillet 2002 relatif à la procédure et à diverses mesures d'exécution du décret du 11 mars 1999 relatif au permis d'environnement (M.B. 25.03.2009)

être muni d'appareils de mesure de la profondeur de l'ouvrage et du niveau de la nappe. Comme dans les autres cas, l'exploitant est tenu de protéger l'ouvrage et l'aquifère au sein de l'aire de protection temporaire. Plusieurs autres mesures sont imposées concernant la récolte de données telles que le débit de pompage, la hauteur de la nappe, etc. Cette démarche va en réalité de soi lors d'un pompage d'essai, mais doit être précisée pour d'autres types d'ouvrage, tel que le rabattement de nappe temporaire en cas de chantier. Le ruissellement naturel à l'extérieur de l'aire de protection peut être dirigé vers l'intérieur de celle-ci, mais doit alors être dévié. Toutefois, dans le cas d'un pompage d'essai, le puits de forage peut devenir le puits définitif soumis alors aux conditions sectorielles évoquées ci-avant, il est donc préférable que l'installation réponde directement à celles-ci. Un rapport doit être remis à l'administration dans les trois mois suivant la fin du pompage d'essai ou temporaire. Il doit contenir les différentes données récoltées telles que les périodes de pompages, les débits prélevés durant ces périodes, le niveau de l'eau mesuré avant pompage et le niveau minimum pour chaque période, autant de données utiles à la caractérisation d'une nappe.

- *Conditions sectorielles relatives au forage et à l'équipement de puits destinés à une future prise d'eau souterraine*⁷³

Il semble important de souligner d'emblée le fait que les conditions sectorielles abordées ici ne concernent que les « puits destinés à une future prise d'eau souterraine » et donc, en géothermie, que les systèmes sur aquifère.

Différentes précautions sont à prendre avant et durant la réalisation du forage. Les conditions sectorielles attirent l'attention sur l'importance de vérifier l'absence de conduite enterrée au lieu de forage. La migration de polluants dans une nappe et/ou la mise en contact d'une nappe libre et d'une nappe captive doivent impérativement être évitées. Le lieu du forage doit être pensé de telle manière que la zone de prise d'eau citée au paragraphe précédent puisse être établie.

Les diverses techniques utilisées lors de la réalisation du puits ne doivent en aucun cas altérer la qualité des eaux souterraines et la géologie avoisinante. C'est à l'exploitant de s'assurer que la technique de forage permette la stabilité du puits, quelle que soit la structure géologique présente. Pour les terrains meubles, un soutènement est conseillé, mais pas obligatoire tant que la stabilité est assurée par un procédé équivalent. L'arrêté ne présente pas vraiment d'exigence en termes de matériaux employés pour les tubes, que ce soit de soutènement ou d'équipement, ni pour le bouchon qui doit être mis en place à la base du puits lorsqu'une colonne de tubes d'équipements est installée sur toute la profondeur du puits. La seule restriction concerne le béton qui est interdit en nappe d'eau agressive.

⁷³ Arrêté du Gouvernement wallon déterminant les conditions sectorielles relatives au forage et à l'équipement de puits destinés à une future prise d'eau souterraine et modifiant l'arrêté du Gouvernement wallon du 4 juillet 2002 relatif à la procédure et à diverses mesures d'exécution du décret du 11 mars 1999 relatif au permis d'environnement (M.B. 10.10.2012)

Toujours dans un souci de stabilité, l'installation d'un tubage appelé « tubage d'avant-trou » est imposée afin d'éviter un éboulement en surface formant une cuvette entourant l'entrée du puits. Le tubage doit être effectué soit jusqu'à deux mètres de profondeur, soit jusqu'à l'atteinte d'une roche cohérente et une cimentation doit être réalisée à l'extrados de celui-ci, exception faite des cas où la nature du terrain assurerait l'étanchéité du dispositif (argile). Il est strictement interdit de prélever les eaux de deux nappes différentes par le biais d'un même puits et, lorsque la nappe captive doit être atteinte, une opération d'aveuglement doit être réalisée.

L'emploi de centreurs est également requis, mais leur nombre n'est pas imposé, ils doivent assurer une position centrée de la colonne de tubes d'équipement tout en permettant un placement correct des matériaux de remplissage tout autour. La distance entre les tubes et les parois du trou doit être en tout lieu supérieure ou égale à 2,3 centimètres.

Les cuttings ne peuvent pas être utilisés pour combler l'espace annulaire étant donné que celui-ci doit être rendu étanche hormis le long de la crépine. Une précision est donnée ici quant aux matériaux à utiliser. En effet, de l'argile gonflante doit être placée sur au moins deux mètres de hauteur à partir du dessus du « massif filtrant constitué d'un gravier siliceux propre, de forme arrondie, de granulométrie homogène et appropriée à l'ouverture des crépines » (Art.9, al.2) et entourant celle-ci sur toute sa hauteur (cf chapitre 2). Un ciment est ensuite introduit jusqu'à la surface sur une hauteur d'au moins dix mètres, sauf si l'aquifère est peu profond (les conditions particulières prennent alors la relève). La technique de cimentation est aussi précisée : sous pression, par le bas. Le ciment doit parfaitement adhérer aux parois.

Pour résumer, la technique de mise en place du matériel est imposée dans un certain détail, mais les matériaux sont, pour la plupart, laissés au choix de l'exploitant en fonction de la nature de son sol.

Les conditions sectorielles relatives au forage renforcent encore la protection du puits prise en considération dans les conditions pour la prise d'eau, en imposant des hauteurs de partie visible du tube d'équipement et, le cas échéant, des règles de placement de la chambre de visite, de sécurité du local de protection ou, à défaut des deux, de mise en place d'une dalle en béton entourant la partie visible du tube. Un tube de plus faible diamètre doit être introduit dans le puits afin de permettre la mesure de la hauteur d'eau. Une série de précautions sont à prendre sur le chantier et un « kit de dépollution » doit notamment y être disponible.

Un traitement des cuttings, des boues et des eaux extraites du trou de forage durant le chantier peut s'avérer nécessaire, le cas échéant un dispositif doit être prévu et mis en place pour la période de chantier et de pompage d'essai. Comme pour ce dernier, un ensemble de données récoltées lors du forage doit être fourni à l'administration. Parmi elles, des données géologiques (coupe, nature et profondeur des terrains rencontrés, hauteur d'eau, débit de venue d'eau), les informations techniques du puits, la localisation exacte de celui-ci ainsi que son altitude.

Rappelons qu'il revient à priori à l'exploitant et non au foreur de vérifier que les conditions sectorielles sont bel et bien remplies. Un projet d'agrément des foreurs est cependant en cours d'élaboration et traite notamment de la responsabilité de ces derniers.

5.2.3 Formulaire pour les sondes géothermiques

Pour les forages destinés à la mise en place de sondes géothermique, une série d'informations est explicitement demandée dans le formulaire de demande depuis peu. Parmi elles, le type d'installation (chauffage uniquement ou couplée au refroidissement ou geocooling), la géométrie des sondes, les caractéristiques du fluide caloporteur, la puissance venant du sol nécessaire aux besoins et les caractéristiques géologiques du site. Le rapport de dimensionnement doit être fourni, mais un test de réponse thermique n'est pas obligatoire. Tout cela constitue en effet autant d'éléments nécessaires à l'élaboration de mesure de protection, mais n'aide pas, à proprement parler, dans le choix à effectuer quant à la délivrance d'un permis. Cela n'aide pas non plus le demandeur dans la construction de son projet qui n'a pas d'indication suffisamment précise pour orienter ses choix.

5.2.4 L'agrément des foreurs

Un règlement concernant l'agrément des foreurs est donc en cours d'élaboration. Actuellement, le client doit lui-même prêter attention aux termes du contrat qui le lie au foreur afin de ne pas être tenu responsable en cas de problème lors de l'opération de forage. L'agrément des foreurs comportera donc plusieurs volets parmi lesquels la responsabilité en cas de dégâts sur l'environnement. Il apportera également un cadre quant à l'information que le foreur est tenu d'apporter au client, définira diverses conditions techniques à respecter, ainsi que l'obligation de communiquer une série de données récoltées lors du forage à l'administration (probablement davantage que ce qui est actuellement exigé dans les conditions sectorielles)⁷⁴.

5.3 CONCLUSION

Par comparaison avec le chapitre précédent, on remarque que la législation en Région wallonne encadre les forages et les puits de pompage d'une façon générale, mais les risques propres à la géothermie ne sont pas pris en compte. De plus, il demeure une interrogation concernant la recharge des nappes. Il est clair que pour une autre application qui pourrait modifier considérablement la qualité de l'eau avant la réinjection, ce type de pratique est à proscrire. Mais, pour la géothermie et à condition de poser des normes claires sur les températures de rejet autorisées, une recharge permet une stabilité en terme de volume d'eau. Le dernier point à souligner est l'absence totale d'indication pour les capteurs horizontaux. Des nuisances pouvant également survenir, ceux-ci pourraient éventuellement faire l'objet d'une simple déclaration afin de s'assurer d'un dimensionnement correct des installations.

⁷⁴ Nihant, 2013

6. COMPARAISON AVEC LA LEGISLATION DES PAYS LIMITOPHES

En 2010, Stefanie Hähnlein, Peter Bayer et Philipp Blum proposent une synthèse des législations relatives à la géothermie de surface de 39 pays différents dans le monde entier. D'un point de vue général, les pays européens ont instauré davantage d'instruments régulant la mise en place d'installations géothermiques à faible profondeur qu'ailleurs dans le monde. Ceci peut s'expliquer, selon les auteurs, par l'intérêt porté à la technique dans des pays où la géothermie profonde est plus difficilement exploitable.

Toutefois, l'encadrement reste faible et, dans la majorité des cas, aucun cadre spécifique n'est mis en place, mais la géothermie est incluse au sein de réglementations liées au pompage, au rejet d'eau, au forage, comme actuellement en Belgique. Dans la plupart des cas, aucune suggestion n'est faite quant aux températures maximales et minimales de la nappe à respecter. Très peu de pays tiennent compte de l'influence des installations entre voisins en imposant des distances minimales à respecter. De plus, lorsqu'elles sont définies, ces distances restent néanmoins empiriques et varient de 2,5 m à 10 m entre l'installation et la limite de la propriété selon le pays⁷⁵.

Certains pays comme la France, l'Allemagne et la Suisse repensent cette législation avec le problème d'un cadre principalement basé sur des recommandations ne permettant pas de s'assurer du respect de celles-ci.

6.1 ALLEMAGNE

Il n'existe pas de cadre législatif global pour l'ensemble de l'Allemagne. Ce sont les Bundesländern qui déterminent chacun le cadre imposé à travers le droit lié à la gestion de l'eau, de la nature et la protection contre les nuisances.

Dans chaque Bundesland sont donc définis ce qui pourrait être appelé des « guides » (Leitfäden en allemand) relatifs à la protection des eaux souterraines dans le cas d'utilisation d'installations géothermiques⁷⁶.

6.2 PAYS-BAS

Comme pour l'Allemagne, la législation varie en fonction de la province. Ici, des guides sont également rédigés et des interdictions parfois très strictes sont imposées. Certaines provinces excluent tout à fait la possibilité de circuit ouvert pour éviter tout conflit avec d'autres constructions. Partout dans le pays il est interdit de forer au-delà de 2-3m de profondeur dans les zones de protection de captage⁷⁷. Bonte et al. soulignent deux failles importantes dans le système. La première concerne la possibilité toujours présente

⁷⁵ Hähnlein et al., 2010

⁷⁶ Hähnlein et al., 2011

⁷⁷ Bonte et al., 2011

d'installer des capteurs horizontaux en zones de protection et la seconde est qu'il semble peu probable que les provinces puissent à la fois initier les projets et les réguler de façon objective sans qu'il y ait conflit d'intérêts. Un parallèle peut ici être effectué avec le fait qu'en Belgique, la responsable de l'établissement des conditions sectorielles pour les sondes géothermiques fait partie de la DGO3 et il sera légitime de se demander si la DGO4 n'aurait pas un plus grand rôle à jouer afin d'équilibrer au mieux les différents besoins et les améliorations environnementales tant au niveau des sols que de l'énergie.

6.3 FRANCE

En France, la réglementation est en partie intégrée au code minier. En réalité, elle est davantage tournée vers la géothermie plus profonde et la géothermie à très faible énergie manque encore d'encadrement. Il n'y a par exemple pas de limite de température pour l'eau réintroduite dans la nappe⁷⁸. L'ADEME et le BRGM ont, cela dit, établi une série de guides généraux et régionaux avec des règles de bonnes pratiques et des conseils pour l'exploitant.

6.4 REGEOCITIES

Pour la majorité des pays en Europe, des lacunes importantes persistent dans les législations relatives à la géothermie très basse enthalpie. Probablement parce que son développement est encore assez récent et peut-être même, parce qu'il semble que la pratique se soit développée avant que les phénomènes qui lui sont liés ne soient bien connus. Au vu de la nécessité d'avancer au plus vite, il est vrai qu'une structure permettant de rassembler un maximum de connaissances est la bienvenue. REGEOCITIES est un projet capable d'apporter un vrai coup de pouce aux administrations de plusieurs pays européens pour faire avancer le processus d'encadrement de la géothermie à faible profondeur.

« Le projet REGEOCITIES est dédié à l'atteinte des objectifs fixés dans les plans d'action nationaux en faveur des énergies renouvelables (NREAP) pour 2020, dans lesquels certains pays ont fixés des objectifs ambitieux en matière de Géothermie superficielle (Shallow Geothermal – SGE), et pour cela vise à l'aménagement et la clarification des barrières administratives et réglementaires au niveau local et régional » (REGEOCITIES, 2013). Ce projet auquel la Belgique a pris part peut être d'une aide précieuse à la Wallonie.

⁷⁸ Jaudin et al., 2013, p.28-32

CONCLUSIONS

À l'heure où le changement climatique et l'approvisionnement en énergie sont au centre des préoccupations, aucune piste ne doit être négligée pour améliorer la situation. Faible émettrice de CO₂ et ne nécessitant pas de transport, la géothermie à faible profondeur pourrait en constituer une. Il faut toutefois rester méfiant quant à la façon d'exploiter cette source d'énergie. L'idéal est en effet de parvenir à extraire de la chaleur durablement. Plusieurs critères ont été établis par différents auteurs, parmi eux, la nécessité d'assurer un équilibre entre extraction et recharge, naturelle ou artificielle, de l'énergie thermique. Il est également important que les installations des uns n'interfèrent pas avec celles des autres. Qui plus est ces installations ne doivent pas dégrader la qualité des sols et des eaux souterraines de façon trop importante.

Pour parvenir à définir les risques de pollution et de surexploitation, il faut avant tout identifier le type de système utilisé. Une étude de diverses données géologique et l'hydrogéologique du site rencontré permet alors un dimensionnement de l'installation en fonction des besoins requis. Pour un système sur aquifère, le débit de la nappe est déterminant. Une exploitation à sonde verticale dépend, quant à elle, de la capacité et la conductivité thermique de la roche. Enfin, s'il s'agit de boucles horizontales au sein d'un terrain meuble, la recharge dépend principalement de l'ensoleillement et l'exploitant doit prêter attention à ce qu'il y ait un bon contact entre les tuyaux et le sol.

Les impacts et nuisances éventuels que pourraient engendrer de tels établissements dépendent également de la technique employée. En circuits ouverts, l'attention est portée sur la conservation du niveau de la nappe. Pour s'en assurer, une recharge artificielle peut être réalisée, mais peut alors entraîner une hausse ou une diminution locale de la température de l'aquifère. Ceci peut également être observé en cas de circuits fermés comprenant des sondes qui atteignent la nappe. Il peut alors exister un risque de pollution thermique d'installations avoisinantes, mais aussi une menace pour l'écosystème établi dans ces eaux souterraines. Celui-ci ne doit pas être négligé au vu du rôle que peut jouer l'activité microbienne dans la conservation de la qualité des nappes et notamment la dégradation de certains polluants en un lieu où ils peuvent facilement atteindre la nappe. Dans le cas de boucles horizontales, une baisse de température trop importante peut être fatale pour la végétation qui les surplombe. Enfin, des précautions contre les fuites de fluides caloporteurs, dans le cas de circuits fermés, doivent être prises.

Ceci résume les risques propres à la géothermie à faible profondeur sur le sous-sol. S'ajoute à cela ceux liés aux forages et, dans le cas de système sur aquifère, à la présence d'un puits et la possible introduction de polluants capable d'atteindre directement la nappe.

Une fois la législation analysée, il en ressort, dès lors, que la géothermie n'y a pas encore trouvé sa place. En effet, les conditions intégrales et sectorielles établies dans le domaine ne concernent que les forages pour la prise d'eau et la prise d'eau elle-même, quel qu'en soit l'usage, dans la liste des activités

classées, l'installation de sondes géothermiques est dans la même rubrique que l'enfouissement de déchets radioactifs et les capteurs horizontaux ne font l'objet d'aucun classement.

Le problème que pose cette absence de cadre précis est le risque de mauvaise évaluation des impacts de la part de l'administration chargée de délivrer les autorisations. En Belgique, et contrairement à d'autres pays, il n'existe même aucun « guide de bonnes pratiques » pouvant servir d'aide à la décision. Ce manque d'indication entraîne parfois, et ce malgré les délais imposés, un prolongement des procédures qui n'aboutissent pas toujours à une décision claire⁷⁹. Ceci n'étant pas aidé par la faible quantité de littérature que l'on trouve sur le sujet. En Wallonie, l'attention a jusqu'à présent davantage été tournée vers la géothermie à des profondeurs intermédiaires ; en France, cela dit, le nombre de publications, notamment du BRGM, est de plus en plus important, mais l'idéal reste de balayer un champ plus large avec, comme contrainte, le passage à d'autres langues que le français. Il est également possible de s'inspirer de normes d'autres pays. La prudence est toutefois de mise, la géologie et l'hydrogéologie peuvent influencer les mesures à prendre, les valeurs doivent donc systématiquement être replacées dans leur contexte. Qui plus est, les législations étrangères, bien que souvent plus élaborées concernant la géothermie à faible profondeur, ne sont pas toujours idéales. Ce que l'on peut déduire d'une comparaison de celles-ci pour quelques pays est qu'une des lacunes de la Wallonie, par rapport à d'autres régions, est l'absence de réglementation sur les écarts de températures autorisés et la distance qui devrait séparer une exploitation des limites de la propriété. Toutefois, la solution d'une valeur arbitraire fixée, quel que soit le contexte n'est probablement pas non plus idéale.

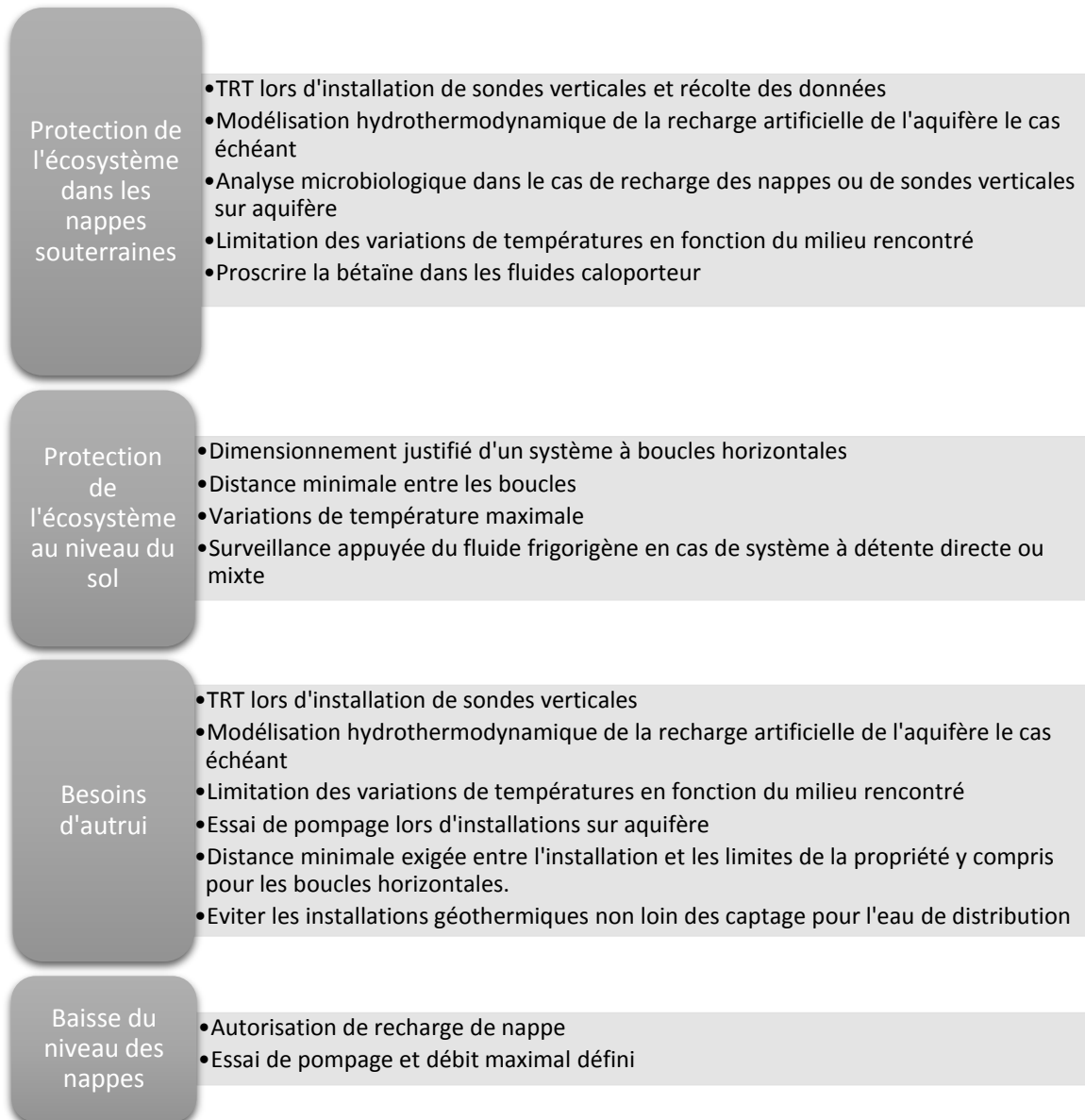
Tout ceci constitue bien sûr un frein pour les exploitants à se lancer dans de telles installations. Si la législation n'interdit pas l'usage des pompes à chaleur sur sol ou aquifère, l'incertitude quant à l'octroi du permis requis pour démarrer la réalisation du projet est parfois trop grande que pour prendre le risque de se lancer dans l'élaboration de ce genre de projet.

Toutefois, en Région wallonne, ce qui apparaît pour certains comme un retard peut à présent être utilisé afin d'élaborer un cadre correctement adapté à la géothermie très basse énergie, en tirant des leçons des conséquences environnementales liées aux premiers systèmes installés sur lesquels il est possible d'avoir un certain recul. Par ailleurs, il serait intéressant d'encourager davantage la recherche dans le domaine, en particulier pour les recharges artificielles des nappes (des projets concernant les sondes verticales étant déjà en route). Le principe de précaution ne peut en effet plus être évoqué au vu de la progression scientifique sur le sujet, le principe de prévention devrait donc lui substituer, auquel cas, réaliser des essais dans un cadre scientifique ne peut qu'améliorer les connaissances sur les phénomènes liés et les mesures préventives à prendre. Après un premier bilan, un guide pourrait être proposé. Cela semble être le meilleur compromis dans l'immédiat. Plus rapide que l'élaboration d'une loi et plus facilement modifiable, il pourrait permettre une évolution des recommandations en fonction des

⁷⁹ Croufer, 2013 ; Verscheure, 2013

nouvelles connaissances durant quelques années et inspirer ensuite directement l'établissement de conditions propres à la géothermie de surface. Il serait encore plus intéressant de proposer une série de conseils en fonction de la région dans laquelle l'exploitant se trouve.

J'ai tenté ci-après de rassembler une série d'éléments propres à la géothermie auxquels il me semble important de prêter attention en fonction du type de risque rencontré. Ceux-ci restent très généraux et il serait intéressant, dans la même optique que l'élaboration du guide, de les préciser pour le cas de la Wallonie.



BIBLIOGRAPHIE

ADEME & BRGM. 2012a. *Les Pompes à chaleur géothermiques à partir de forage sur aquifères: Manuel pour la conception et la mise en œuvre*. Coll. « Collection scientifique et technique ». Orléans : BRGM, Angers : ADEME, 91p.

ADEME & BRGM. 2012b. *Les Pompes à chaleur géothermiques sur champs de sondes: Manuel pour la conception et la mise en œuvre*. Coll. « Collection scientifique et technique ». Orléans : BRGM, Angers : ADEME, 103p.

Architecture et Climat (UCL). 2013. « Les émissions de polluants liée à la consommation énergétique : Emission de CO₂ ». In *Energie+, version 8: Théories*. En ligne <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=15568>>. Consulté le 12 juillet 2013.

Arrizabalga I. 2011. « Drilling ». In *Geotraining training manual for designers of shallow geothermal system*, p.61-70. Brussels : Geotraining.

Banks D. 2008. *An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling*. Oxford: Blackwell Publishing, 339p.

Barnich L., Bellefroid M., Delnoy M. & Haenen V. 2003. *Le Permis d'Environnement Expliqué*. Liège: Éd. de la Chambre de Commerce et d'Industrie, 395p.

Bart S. 2011. *Recommandations sur le choix des équipements de forage d'eau rappel des bonnes pratiques*. En ligne. 11p.

<http://www.sfeg-forages.fr/images/files/recommandation_equipement_forage_eau_johnson_lr.pdf>. Consulté le 27 juillet 2013.

Bézèlgues-Coutrade S., Durst P., Garnier F. & Ignatiadis I. 2013. « ImpAC Lyon : évaluer l'impact environnemental et thermique de l'exploitation des aquifères superficiels pour la climatisation ». In *Géosciences*, n°16 (mars), p.64-69.

Bonte M., Stuyfzand P.J., Hulsmann A. & Van Beelen P. 2011. « Underground Thermal Energy Storage: Environmental Risks and Policy Developments in the Netherlands and European Union ». In *Ecology and Society*, Vol. 16, n°1. En ligne. <<http://www.ecologyandsociety.org/vol16/iss1/art22/>>. Consulté le 23 juillet 2013.

Birreaux C., Bataille C. & Sido B. 2011. « L'avenir de la filière nucléaire en France, Tome 1 ». In *Rapport de la mission parlementaire sur la sécurité nucléaire, la place de la filière et son avenir*. En ligne. <<http://www.senat.fr/rap/r11-199-1/r11-199-11.pdf>> Consulté le 27 juillet 2013.

Brahy V. (Éd. intellectuel), Bellayachi A. & Guissard V. (Cartographe). 2010. *Tableau de bord de l'environnement wallon : rapport sur l'état de l'environnement wallon*. Jambes : Cellule Etat de l'environnement wallon, 232p.

Briemann H., Griebler C., Schmidt S. I., Michel R. & Lueders T. 2009. « Effects of thermal energy discharge on shallow groundwater ecosystems ». In *FEMS Microbiology Ecology*, Vol. 68, n°3, p.273-286.

Briemann H., Lueders T., Schreglmann K., Ferraro F., Avramov M., Hammerl V., Blum P., Bayer P. & Griebler C. 2011. « Oberflächennahe Geothermie und ihre potenziellen Auswirkungen auf Grundwasserökosysteme ». In *Grundwasser-Zeitschrift des Fachsektion Hydrogeologie*, n°16, p.77-91.

Caleffi M. (Dir.), Guidetti F. (Réd.), Carlier J., Meskel ., Dujardin E. & Planca R. 2010. « Installations de pompes à chaleur géothermiques ». *Hydraulique*, n°5 (novembre), 47p.

Caquelin P. (dir.) s.d. « PRINCIPES GENERAUX du puits climatique: A quoi faut-il veiller? ». In *Elixir by Pamline*. En ligne. <http://www.pamline.fr/images/add/newsletter/PAM-ELIXAIR_Puits-Canadien-Fonte_Principes-Generaux_A-Quoi-Veiller.html>. Consulté le 23 juillet 2013.

Claret B. 2006. « Géothermie, pompe à chaleur : le pour et le contre d'un dossier brûlant ! ». In *Sortir du nucléaire*, n°30, p19-22.

Croufer M., entrevue personnelle, août 2013.

Culver G. 1998. « Drilling and Well Construction ». In *Geothermal Direct Use Engineering and Design Guidebook (third edition)*. En ligne. < <http://geoheat.oit.edu/pdf/tp65.pdf>>. Consulté le 20 juillet 2013.

CWEPSS. s.d. « Projet Pascalis ». In *Le site web du CWEPSS : Etudes : Conservation du milieu*. En ligne. < <http://www.cwepss.org/pascalis.htm>>. Consulté le 20 juillet 2013.

DEC Energies. 2013. « Pompe à chaleur eau/eau ». In *DEC Energies: Pompes à chaleur*. En Ligne. <<http://www.dec-energies.fr/installation-pompe-a-chaleur-landes.php5>>. Consulté le 20 juillet 2013.

Decrop J. 2011. *Chaleur verte et réseaux de chaleur: quelle ambition?*. En ligne. <<http://www.glea.net/AGRAOST/doc/GNollet-chaleur-verteetreseaudechaleur-FRpdf.pdf>> Consulté le 13 juillet 2013.

De Doncker C. 2013. *Environnement: Autorisations et Permis 2013*. Éd. 2013, Waterloo: Kluwer, 561p.

DGARNE. 2013. *Portail environnement de Wallonie*. En ligne. <<http://environnement.wallonie.be/>>. Consulté le 20 juillet 2013.

Direction Générale de l'Energie et du Climat. 2011. « Géothermie ». In *Rapport sur l'industrie des énergies décarbonées en 2010*, p. 95-110. Ministère de l'écologie, du développement durable (France)

Fallon G. 2009. *Synthèse sur les réglementations et permis relatifs à l'installation et à l'exploitation de pompes à chaleur en Région wallonne*. En ligne. 15p. <http://www.ef4.be/documents/pompes-a-chaleur/permis_et_reglementation_relatifs_aux_pompes_a_chaleur_en_Region_wallonnie_28mai2009_1.pdf>. Consulté le 27 juillet 2013.

Ferguson G. 2006. « Potential use of particle tracking in the analysis of low-temperature geothermal developments ». In *Geothermics*, vol 35, n°1, p.44-58.

Gao Q., Li M., Yu M., Spitler J. D. & Yan Y. Y. 2009. « Review of development from GSHP to UTES in China and other countries ». In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, n°13, p.1383-1394.

Goldscheider N., Hunkeler D. & Rossi P. 2006. « Review: microbial biocenoses in pristine aquifers and an assessment of investigative methods ». In *Hydrogeology Journal*, Vol. 14, n°6, p.926-941.

Gouvernement wallon. 1995. *Plan d'environnement pour le développement durable*. En ligne. <http://environnement.wallonie.be/cgi/dgrne/plateforme_dgrne/visiteur/animsv2.cfm?pere=261>. Consulté le 20 juillet 2013.

Griebler C. & Lueders T. 2009. « Microbial biodiversity in groundwater ecosystems ». In *Freshwater Biology*, Vol. 54, n°4, p.649-677.

Hähnlein S., Bayer P. & Blum P. 2010. « International legal status of the use of shallow geothermal energy ». In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, n°14, p.2611–2625

Hähnlein S., Bayer P., Ferguson G. & Blum P. 2013. « Sustainability and policy for the thermal use of shallow geothermal energy ». In *Energy Policy*, n°59, p.914-925.

Hähnlein S., Blum P. & Bayer P. 2011. « Oberflächennahe Geothermie : aktuelle rechtliche Situation ». In *Grundwasser*, n°16, p.69–75.

Jaudin F., Bezelgues-Courtade S. & Poux A. 2013. *French regulative framework*. En ligne. 36p. <http://regeocities.eu/wp-content/uploads/2012/12/REGEOCITIESFrenchReport_final.pdf>. Consulté le 31 juillet 2013.

Jumel V., communication personnelle (email), avril 2013.

Kehew A.E. 2006. *Geology for Engineers & Environmental Scientists: Third Edition*. Upper Saddle River : Pearson Education, 695p.

Klotzbücher T., Kappler A., Straub K. & Haderlein S. 2007. « Biodegradability and groundwater pollutant potential of organic anti-freeze liquids used in borehole heat exchangers ». In *Geothermics*, n°36, p.348-361.

Laplaige P. & Lemale J., 2010. *Géothermie de surface - Aquifères superficiels et stockage thermique souterrain*. En Ligne. <<http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/energies-th4/sources-d-energie-hors-nucleaire-42215210/geothermie-de-surface-be8593/geothermie-des-aquiferes-superficiels-be8593niv10001.html>>. Consulté le 27 juillet 2013.

Lemale J. & Gourmez D. 2008. *Pompe à chaleur géothermique sur aquifère : Conception et mise en œuvre, Cas de l'Île-de-France*. Coll. "Collection scientifique et technique". Orléans : BRGM, Puteaux : ADEME, Paris : ARENE, Moret-sur-Loing : EDF, 72p.

Lemale J. 2012. *La Géothermie*. 2^{ème} éd. Coll. « Technique et Ingénierie, Série Environnement et Sécurité ». Paris: Dunod, 305p.

Lund J.W., Sanner B., Rybach L., Curtis R. & Hellström G. 2004. « Geothermal (ground-source) heat pumps a world overview ». In *GHC Bulletin* (septembre), 10p.

Mayo A. L. 2010. « Ambient well-bore mixing, aquifer cross-contamination, pumping stress, and water quality from long-screened wells: What is sampled and what is not? ». In *Hydrogeology Journal*. Vol. 18, n°4, p.823-837.

Mock J., Tester J. & Wright M. 1997. « Geothermal Energy from the Earth: Its Potential Impact as an Environmentally Sustainable Resource ». In *Annual Review of Energy and the Environment*. n°22, p.305-356.

Nibelle D. 2008. *Le Permis d'Environnement en Région Wallonne*. Waterloo: Kluwer, 109p.

Nihant M., entrevue personnelle, avril 2013.

Prescott L.M., Harley J.P. & Klein D.A. 2003. *Microbiologie* (2^{ème} éd. française). Paris : De Boeck, 1139p.

Raymond F. 1998. *La chaleur de la Terre, de l'origine de la chaleur à l'exploitation géothermique*. Paris: ADEME, 398p.

REGEOCITIES. 2012. *Regeocities Project*. En ligne. <<http://regeocities.eu/>>. Consulté le 31 juillet 2013.

Région Wallonne, CREAT & LEPUR. 2009. « Energies renouvelables, Partie : géothermie, subvention 2008-2009 ». In *Conférence Permanente du Développement Territorial* (Septembre 2009), 10p.

Rumohr S. 2009. « Nutzung der oberflächennahen Geothermie in Hessen - Zahlen und Kenngrößen ». In *Bbr Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau*, Vol. 3, p.46–52.

Rybach L. & Eugster W.J. 2002. « Sustainability aspects of geothermal heat pumps ». In *Proceedings, Twenty-Seventh Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford University, 28-30 janvier.

Saner D., Juraske R., Kübert M., Blum P., Hellweg S. & Bayer P. 2010. « Is it only CO₂ that matters? A life cycle perspective on shallowgeothermal systems ». In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. n°14, p.1798–1813.

Sanner B. & Mands E. 2009. « Erdgekoppelte Wärmepumpen in Deutschland und Europa: ein Wachstumsmarkt ». In *Bbr Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau* (édition spéciale), p.22-35.

Sanner B. 2011. « Ground heat transfer ». In *Geotrained training manual for designers of shallow geothermal system*, p.25-30. Brussels : Geotrained.

Santi P. M., McCray J. E. & Martens J. L. 2006. « Investigating cross-contamination of aquifer ». In *Hydrogeology Journal*, vol. 14, n°1-2, p.51-68.

Schijven J. F., Mülschlegel J. H. C., Hassanizadeh S. M., Teunis P. F. M. & de Roda Husman A. M. 2006. « Determination of protection zones for Dutch groundwater wells against virus contamination - uncertainty and sensitivity analysis ». In *Journal of Water and Health*, Vol. 4, n°3, p.297-312.

Socaciu 2011. « Seasonal sensible thermal energy storage solution ». In *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, n°19, p.49-68. En ligne. <http://lejpt.academicdirect.org/A19/049_068.pdf>. Consulté le 20 juillet 2013.

Verscheure D., entrevue personnelle, février 2013.

VITO Team geo, De Boever E., Lagrou D. & Laenen B. 2012. *Guide de la Géothermie en Belgique*. Mol : VITO, 26p.

Younger P. 2008. « Ground-Coupled Heating-Cooling Systems in Urban Areas: How Sustainable Are They?. In *Bulletin of Science Technology & Society*. n°28, p.174-182.