

Revue des effets potentiels sur l'environnement des systèmes de pompe à chaleur géothermique qui prélèvent de l'eau souterraine.

Rapport final

Par

Samuel Lacombe
Félix-Antoine Comeau, géo., M.Sc.
Jasmin Raymond, géo., PhD.

Réalisé dans le cadre du projet Aquifroid en collaboration avec le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC)

Rapport de recherche R2074

Institut national de la recherche scientifique – Centre Eau Terre Environnement
490 de la Couronne, Québec, QC, G1K 9A9
21 décembre 2021

© INRS, Centre - Eau Terre Environnement, 2021
Tous droits réservés

ISBN : 978-2-89146-957-9 (version électronique)

Dépôt légal - Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2024
Dépôt légal - Bibliothèque et Archives Canada, 2024

Résumé

L'exploitation des systèmes géothermiques superficiels utilisés pour la climatisation et le chauffage des infrastructures connaît une expansion mondiale due, entre autres, à leur contribution à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et à leur potentiel d'exploitation dans tout type d'environnement géologique. Au Québec, l'installation des pompes à chaleur (PAC) géothermique qui impliquent un prélèvement d'eau souterraine au-delà de 379 m³/j, soit essentiellement les doublets géothermiques et les puits à colonne permanente (PCP), nécessite la réalisation d'une étude hydrogéologique pour l'obtention d'une autorisation ministérielle. Le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) souhaite acquérir des connaissances supplémentaires sur les effets potentiels que peuvent engendrer de telles technologies sur la qualité de l'eau souterraine et sur leurs utilisateurs pour offrir davantage de directives.

Les impacts potentiels sur l'environnement qu'engendrent les doublets géothermiques et les PCP se résument par des déséquilibres géochimiques, microbiologiques et biogéochimiques provoqués par les effets de mélange et les variations de température dans l'aquifère. Bien que ces systèmes n'aient pas de conséquence sur la quantité d'eau souterraine disponible, ils peuvent toutefois perturber le niveau piézométrique et le réseau d'écoulement souterrain. La considération de ces effets nécessite une caractérisation du site exploité afin de minimiser les impacts potentiels sur l'environnement et les autres usagers. Pour ce faire, l'évaluation du cône de rabattement et de l'étendue du panache thermique peut être faite afin de minimiser les interactions entre les systèmes géothermiques aménagés et les autres usagers. Aussi, l'échantillonnage d'eau souterraine permet, entre autres, de prédire les conditions favorables aux phénomènes de colmatage en plus d'établir les conditions initiales de la qualité de l'eau souterraine. Finalement, le contrôle du changement de la température de l'eau réinjectée par le système géothermique permet de limiter les déséquilibres géochimiques et microbiologiques dans l'aquifère, associés aux hausses de température trop élevée.

Il s'avère que les effets provoqués par une altération thermique de l'aquifère sont peu documentés dans la littérature à l'échelle d'une exploitation géothermique à long terme. Ainsi, afin d'acquérir davantage de connaissances sur leurs impacts en plus de favoriser le développement d'outils d'analyse adaptés, l'installation des PAC d'aquifère de grande taille (requérant un prélèvement d'eau souterraine supérieur à 379 m³/j) devrait être appuyée par un programme de suivi des paramètres chimiques, microbiologiques et physico-chimiques de l'aquifère. Cette surveillance permettrait, entre autres, d'ajuster un entretien périodique du système en fonction des conditions hydrogéologiques et géologiques du site.

Table des matières

Résumé	i
Liste des tableaux	iv
Liste des figures	iv
Liste des abréviations	vi
1. Introduction	1
1.1 Mise en contexte	1
1.2 Les systèmes géothermiques superficiels (ou de basse température)	2
1.2.1 Les configurations existantes	2
1.2.2 Les familles de pompes à chaleur géothermique	4
1.3 Le cadre législatif et réglementaire au Québec	8
1.3.1 La gestion des prélèvements d'eau	8
1.3.2 Seuil d'assujettissement des prélèvements d'eau à l'autorisation ministérielle	9
1.3.3 Puissance des systèmes géothermiques assujettis à la réglementation	12
1.4 Problématique	15
1.5 Objectifs	15
1.6 Structure du rapport	15
2. Les pompes à chaleur d'aquifère: Une revue de leurs effets	16
2.1 Impact thermique	16
2.2 Impact hydrogéologique	17
2.3 Impact géochimique	17
2.3.1 Effet de la température	17
2.3.2 Effet du mélange	19
2.4 Impact microbiologique et biogéochimique	19
3. Éléments d'une étude hydrogéologique	20
3.1 Évaluation des impacts sur les usagers	23
3.1.1 Évaluation des propriétés hydrauliques et thermiques de l'aquifère	24
3.1.2 Simulation numérique et solutions analytiques	26
3.2 Évaluation des impacts sur la qualité de l'eau souterraine	30
3.2.1 Échantillonnage d'eau souterraine	30
3.2.2 Seuils de température	32
3.3 Évaluation de la durabilité du système	34

3.3.1	La surveillance du système géothermique	34
3.3.2	L'entretien des puits géothermiques	36
4.	Conclusions	36
5.	Remerciements.....	37
6.	Références bibliographiques	38

Liste des tableaux

Tableau 1.1: Comparaison entre: 1) les fiches techniques des PAC accessibles sur le marché par le fournisseur <i>Daikin</i> , 2) les seuils de débits de prélèvement établis par la loi au Québec et 3) la capacité typique des installations géothermiques superficielles pour différents groupes d'infrastructures établies par le <i>British Geological Survey</i>	13
Tableau 1.2: Exemple de capacité totale pour différentes installations de puits à colonne permanente localisées en Nouvelle-Angleterre, aux États-Unis.	14
Tableau 3.1: Liste de quelques logiciels servant à réaliser des simulations numériques pour caractériser les phénomènes d'écoulement et de transfert de chaleur des aquifères avec leur méthode de calcul respective.	28
Tableau 3.2: Solutions analytiques valides pour les systèmes géothermiques à boucle ouverte.	29
Tableau 3.3: Paramètres physico-chimiques, chimiques, bactériologiques et de la charge particulaire à évaluer dans l'eau souterraine afin d'assurer la pérennité du système géothermique.	32

Liste des figures

Figure 1.1: Utilisation directe de l'énergie géothermique à l'échelle mondiale de 1995 à 2020.	2
Figure 1.2: a) Configuration d'un système à boucle ouverte, fermée et semi-ouverte suivie b) d'une représentation simplifiée du fonctionnement d'une pompe à chaleur géothermique. 1) La chaleur est transférée du fluide à un réfrigérant par le biais d'un échangeur de chaleur, où le réfrigérant initialement à basse pression, donc sous forme liquide, commence à s'évaporer, à la suite de la hausse de température. 2) Ce processus cause alors une augmentation de la pression du réfrigérant qui est amplifiée au niveau du compresseur, ce qui nécessite toutefois un apport en énergie pour son fonctionnement. 3) Le réfrigérant, maintenant sous forme de vapeur à haute pression, transfère à son tour son énergie thermique à l'air du bâtiment par le biais d'un second échangeur de chaleur. 4) Finalement, la pression du réfrigérant diminue au niveau du détendeur et il se condense pour redevenir sous forme liquide et terminer le cycle de la PAC, lequel peut être inversé pour le fonctionnement en mode climatisation.	4
Figure 1.3: Classification des systèmes de PAC géothermique.	5
Figure 1.4: Principales configurations de PAC couplée au sol où les échangeurs de chaleur sont horizontaux a) ou verticaux b).	6
Figure 1.5: Principales configurations de PAC d'aquifère où la réinjection d'eau se fait dans l'aquifère initial par le biais d'un puits d'injection a) ou directement à l'intérieur du puits de prélèvement ou c) en surface.	8
Figure 1.6: Principales configurations de PAC d'eau de surface où le système fonctionne en boucle ouverte a) ou alors en boucle fermée b).	8
Figure 1.7: Résumé du cadre réglementaire québécois pour l'exploitation des systèmes de PAC d'aquifère et de PAC couplée au sol. Le texte réglementaire prévaut en cas de divergence.	11

Figure 3.1: Les éléments à considérer lors de la réalisation d'une étude hydrogéologique requise pour la demande d'autorisation ministérielle de prélèvement d'eau souterraine pour un système géothermique superficiel.....	22
Figure 3.2: Représentation d'un modèle type réalisée à l'aide de la méthode des différences finies.	27
Figure 3.3: Représentation d'un modèle type réalisée à l'aide de la méthode des éléments finis.	27
Figure 3.4: Compilation des seuils de température d'eau souterraine réglementés pour l'utilisation de doublets géothermiques. * ¹ : La Grande-Bretagne ne présente pas de seuil de température d'eau souterraine minimale. * ² : La valeur négative de différence de température acceptée au Liechtenstein indique qu'un seuil différent s'applique pour le refroidissement ($\Delta T \approx 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$) et pour le chauffage ($\Delta T \approx 1.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$).	33
Figure 3.5: Schéma simplifié d'un doublet géothermique indiquant le positionnement des différents capteurs mentionnés par Burté (2018) afin d'assurer un suivi des paramètres hydrodynamiques.	35

Liste des abréviations

Acronymes

1D :	Une dimension ou unidimensionnel
2D :	Deux dimensions ou bidimensionnel
3D :	Trois dimensions ou tridimensionnel
BTR :	Bactérie thiosulfato-réductrice
BSR :	Bactérie sulfato-réductrice
BOS :	Bactérie oxydant le sulfure d'hydrogène
CCÉG :	Coalition canadienne de l'énergie géothermique
Eh :	Potentiel d'oxydoréduction
LQE :	Loi sur la qualité de l'environnement
Loi sur l'eau :	Loi affirmant le caractère collectif des ressources en eau et favorisant une meilleure gouvernance de l'eau et des milieux associés
MELCC :	Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
MES :	Matière en suspension
PAC :	Pompe à chaleur
PCP :	Puits à colonne permanente
PPRLPI :	Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables
REAFIE :	Règlement sur l'encadrement d'activités en fonction de leurs impacts sur l'environnement
RPEP :	Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection
RQEP :	Règlement sur la qualité de l'eau potable
SIH :	Système d'information hydrogéologique
TRT :	Test de réponse thermique

Unités de mesure

BTU/h :	<i>British thermal unit</i> par heure
°C :	Degré Celsius

gpm :	Gallon par minute
GWh :	Gigawatt-heure
kW :	Kilowatts
L :	Litre
L/j :	Litre par jour
m/j :	Mètre par jour
m ³ /j :	Mètre cube par jour
MW :	Mégawatts
TJ/an :	Térajoule par année
tonne :	Tonne de réfrigération
W :	Watts

1. Introduction

1.1 Mise en contexte

Depuis plusieurs années, une attention particulière est portée vers les impacts négatifs que peuvent engendrer les activités anthropiques sur les écosystèmes. Il en résulte que les nouvelles technologies et installations doivent désormais être reconsidérées et orientées vers une utilisation durable qui favorise la préservation de l'intégrité de l'environnement. L'utilisation des sources d'énergie renouvelable et environnementalement propre a alors connu une expansion considérable à travers le monde (Halkos et Gkampoura, 2020). L'une de ces sources est la chaleur naturellement stockée dans le sol. L'exploitation de cette ressource, usuellement qualifiée de ressource géothermique, permet de produire de l'énergie sous différente forme selon sa méthode ou technologie d'exploitation.

Les systèmes géothermiques superficiels (ou de basse température) bénéficient de l'inertie thermique du sous-sol avec des échangeurs de chaleur installés à de faibles profondeurs, généralement moins de 200 m. En effet, en dessous d'une profondeur d'environ 10 m, la température du sol reste constante malgré les variations saisonnières et les conditions climatiques. Au Québec, cette température est généralement inférieure à 12 °C, et procure donc la possibilité de non seulement chauffer, mais d'également climatiser des bâtiments et infrastructures selon les besoins. Ainsi, les systèmes géothermiques de basse température doivent être munis d'une pompe à chaleur (PAC) afin de bonifier le transfert de l'énergie thermique entre le sous-sol et les infrastructures. Les informations mentionnées dans ce paragraphe proviennent d'une revue de la littérature réalisée par Comeau et Raymond (2018).

L'utilisation directe de la chaleur et les systèmes géothermiques de basse température connaissent une expansion mondiale considérable depuis les deux dernières décennies. Selon une compilation de 88 pays, dont ceux d'Amérique du Nord, l'énergie annuelle totale produite par les technologies géothermiques (ex.: chauffage, climatisation, utilisation industrielle) connaissait une hausse mondiale de 72.3 % entre 2015 et 2019, atteignant une consommation d'énergie de 1 020 887 TJ (283 580 GWh) en 2019-2020 (Figure 1.1). Cette hausse est principalement due à une utilisation accrue des systèmes superficiels avec PAC géothermique, qui ont connu une croissance moyenne d'environ 13 % par année entre 2015 et 2020 (Lund et Toth, 2021). Ceci est notamment le résultat de l'amélioration de l'efficacité des PAC qui ont un potentiel d'exploitation dans tout type d'environnement géologique à travers le monde (Lund et Toth, 2021; Comeau et Raymond, 2018). Ces systèmes géothermiques sont présents partout sur le territoire canadien, mais ils sont en concentration plus importante dans le sud de l'Ontario et dans la province de Québec (Lund et Toth, 2021).

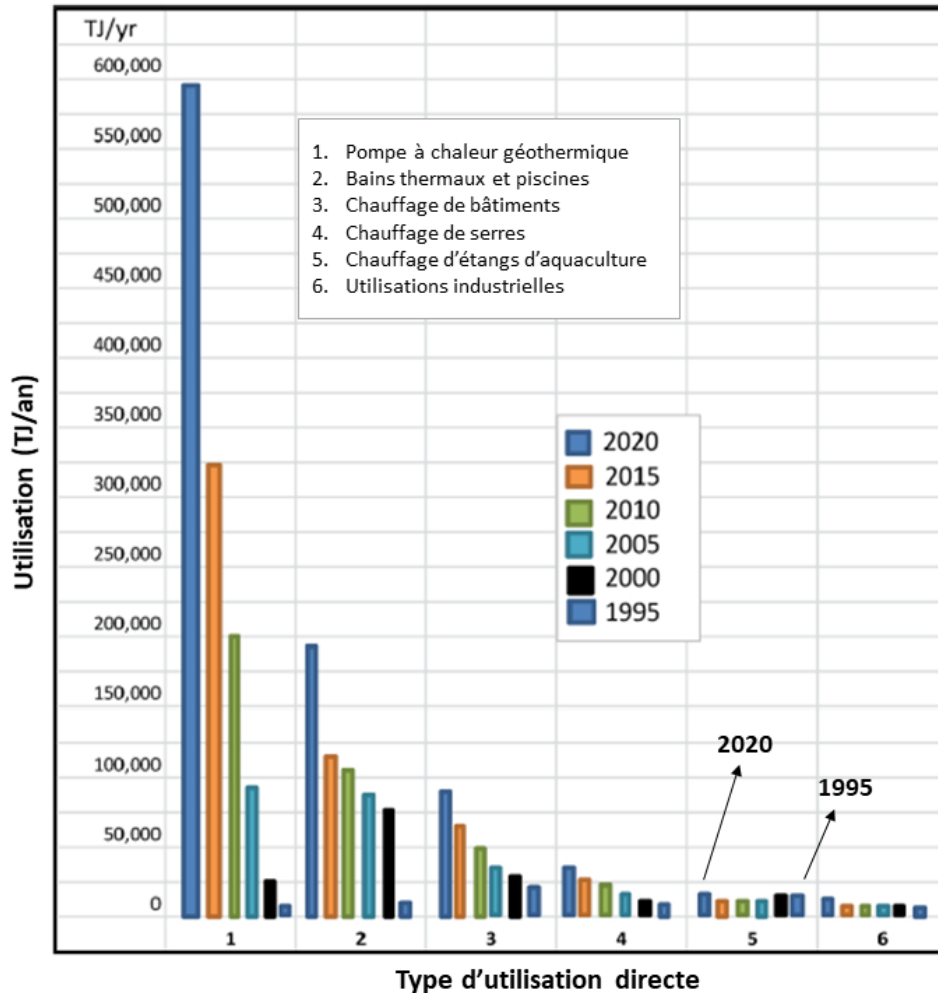


Figure 1.1: Utilisation directe de l'énergie géothermique à l'échelle mondiale de 1995 à 2020 (Lund et Toth, 2021).

1.2 Les systèmes géothermiques superficiels (ou de basse température)

1.2.1 Les configurations existantes

Il existe deux principaux types de systèmes géothermiques superficiels, différenciés par leur configuration. Dans les deux cas, les systèmes utilisent une pompe à chaleur géothermique alimentée par un fluide duquel l'énergie thermique est extraite ou injectée en changeant sa température, selon le besoin. Les systèmes dits à **boucle ouverte** utilisent l'eau souterraine prélevée directement d'un aquifère. À la suite de l'extraction de son énergie thermique, l'eau est réinjectée dans l'aquifère initial (Figure 1.2). Cela permet de préserver globalement la quantité d'eau disponible dans l'aquifère. Pour les systèmes dits à **boucle fermée**, le fluide utilisé circule à l'intérieur d'un réseau de tuyaux enfouis dans le sol. À la suite de son passage dans les tuyaux, le fluide change de température ce qui permet d'extraire ou d'injecter l'énergie thermique avec la pompe à chaleur (Figure 1.2). Contrairement aux systèmes à boucle ouverte, cette configuration ne nécessite aucun prélèvement d'eau souterraine et, à moins d'une fuite inattendue, le fluide caloporteur

utilisé n'est dans aucun cas en contact avec les matériaux géologiques. Les systèmes à boucles fermées ont un potentiel d'efficacité moindre que les systèmes à boucle ouverte aménagés dans un milieu perméable, mais peuvent en contrepartie être utilisés dans n'importe quel environnement, donc même là où les conditions hydrogéologiques sont moins propices.

Malgré sa faible popularité au Québec jusqu'à ce jour, il existe toutefois des systèmes expérimentaux développés ailleurs dans le monde comme au Japon et qui permet de bénéficier simultanément des avantages que procurent les boucles ouvertes et fermées. Ce système, connu sous le nom de **boucle semi-ouverte** ou **d'échangeur de chaleur hybride** est avant tout une boucle fermée, puisque l'énergie thermique est extraite par la circulation d'un fluide caloporteur dans des tuyaux. Toutefois, les tuyaux sont généralement insérés dans deux puits remplis d'eau souterraine qui est pompée d'un puits à l'autre de la même manière qu'une boucle ouverte (Figure 1.2), d'où l'appellation hybride. L'eau souterraine peut également être circulée dans le même forage si la formation géologique est peu perméable. Le but derrière cette circulation d'eau souterraine est de générer un écoulement artificiel autour du système géothermique pour faciliter le transfert de chaleur par advection (Farabi-Asl et al., 2018).

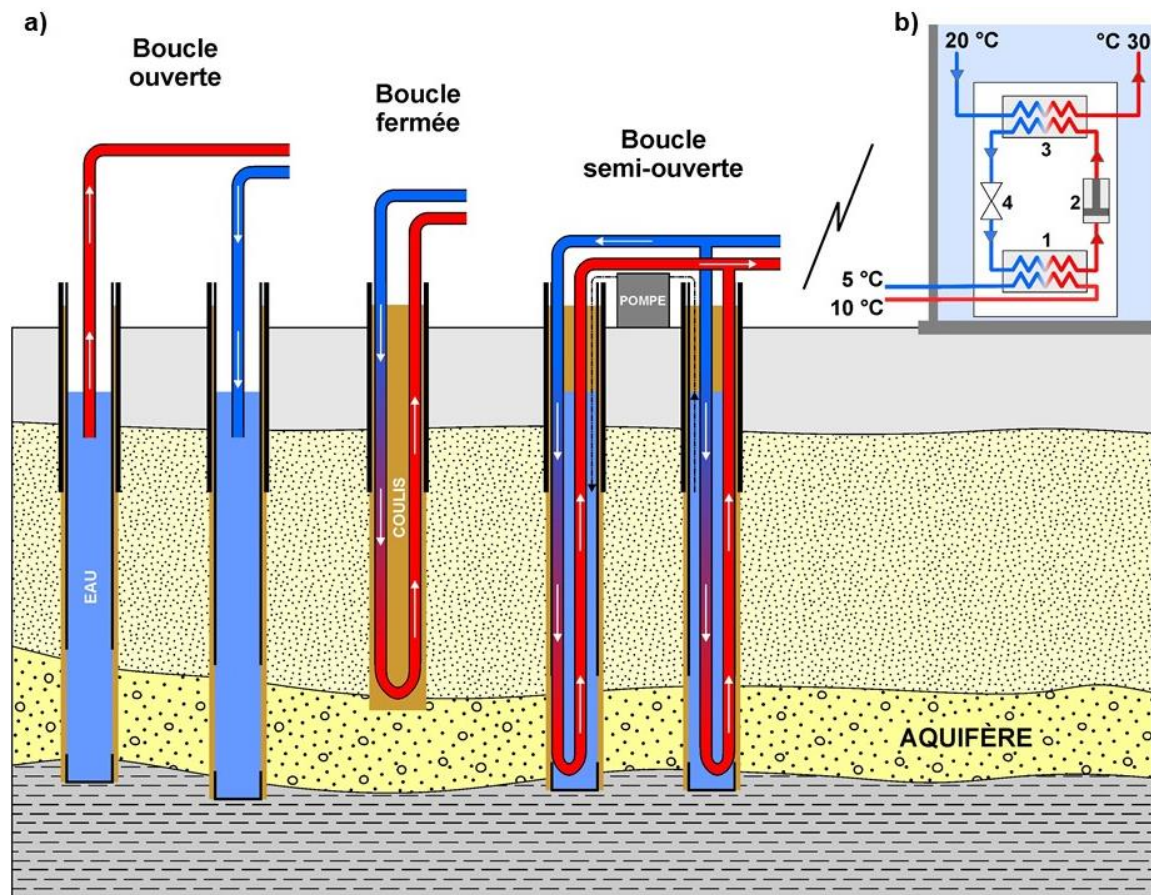


Figure 1.2: a) Configuration d'un système à boucle ouverte, fermée et semi-ouverte suivie b) d'une représentation simplifiée du fonctionnement d'une pompe à chaleur géothermique. 1) La chaleur est transférée du fluide à un réfrigérant par le biais d'un échangeur de chaleur, où le réfrigérant initialement à basse pression, donc sous forme liquide, commence à s'évaporer, à la suite de la hausse de température. 2) Ce processus cause alors une augmentation de la pression du réfrigérant qui est amplifiée au niveau du compresseur, ce qui nécessite toutefois un apport en énergie pour son fonctionnement. 3) Le réfrigérant, maintenant sous forme de vapeur à haute pression, transfère à son tour son énergie thermique à l'air du bâtiment par le biais d'un second échangeur de chaleur. 4) Finalement, la pression du réfrigérant diminue au niveau du détendeur et il se condense pour redevenir sous forme liquide et terminer le cycle de la PAC, lequel peut être inversé pour le fonctionnement en mode climatisation (Comeau et Raymond, 2018).

1.2.2 Les familles de pompes à chaleur géothermique

Mis à part sous terre, les échangeurs de chaleur des systèmes à boucle ouverte et fermée peuvent également être installés dans un plan d'eau ou un cours d'eau. Ainsi, les différentes pompes à chaleur peuvent se diviser en trois grandes familles : 1) **couplée au sol**, 2) **d'aquifère** et 3) **d'eau de surface**. Les sous-sections suivantes décrivent brièvement les différentes configurations possibles pour ces trois grandes familles (Figure 1.3).

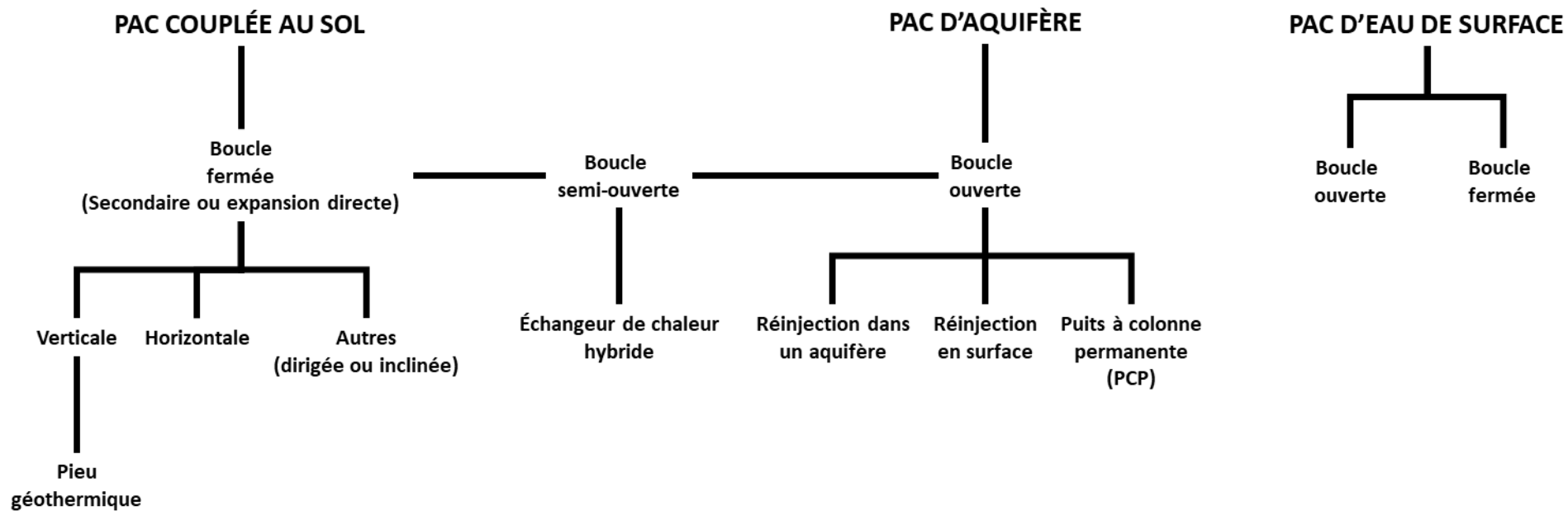


Figure 1.3: Classification des systèmes de PAC géothermique (adaptée de Comeau et Raymond, 2018).

Selon une étude de marché réalisée par la Coalition canadienne de l'énergie géothermique en 2010 (CCÉG, 2012), 90 % des installations de PAC résidentielles au Québec sont composées des systèmes couplés au sol, 7 % sont constituées de PAC d'aquifère alors que seulement 3 % correspond à des systèmes d'eau de surface.

1.2.2.1 PAC couplée au sol

Les PAC couplées au sol permettent d'extraire ou d'injecter l'énergie thermique des matériaux géologiques composant le sol. Ce sont des systèmes à boucle fermée, car le fluide caloporteur amenant l'énergie à la pompe à chaleur ne circule que dans des tuyaux, et n'entre pas en contact direct avec l'eau souterraine et les matériaux géologiques. Au Québec, ce fluide caloporteur est généralement composé d'un mélange d'eau et d'antigel, car il peut parfois atteindre des températures négatives. Dans la plupart des cas, ce fluide caloporteur qui entre dans la pompe à chaleur transfère son énergie à un réfrigérant, catégorisé comme une boucle fermée **secondaire** (Figure 1.3; Comeau et Raymond, 2018). Cependant, lorsque le fluide caloporteur est le réfrigérant de la pompe à chaleur qui circule sous la surface du sol, le système géothermique est alors considéré comme étant à **expansion directe** (Figure 1.3; Comeau et Raymond, 2018).

Les PAC couplées au sol comprennent généralement deux configurations typiques : verticale et horizontale. Cette dernière consiste à enfouir un réseau de tuyaux dans des tranchées creusées à l'horizontale à une faible profondeur, généralement 5 m et moins (Figure 1.4 a), tandis que dans le deuxième cas, les tuyaux sont insérés à l'intérieur de trous forés à la verticale remplis ensuite de *coulis*, généralement un mélange de sable de silice et de bentonite, afin d'améliorer les transferts thermiques (Figure 1.4 b). Parfois, la boucle peut être insérée à même la structure de soutènement d'une infrastructure, et dans ce cas ce système porte alors le nom de **pieu géothermique** (Figure 1.3; Comeau et Raymond, 2018). De plus, de nouvelles configurations existent où les tuyaux d'échangeurs de chaleur sont installés dans des forages directionnels, inclinés ou simplement enfoncés dans des dépôts meubles.

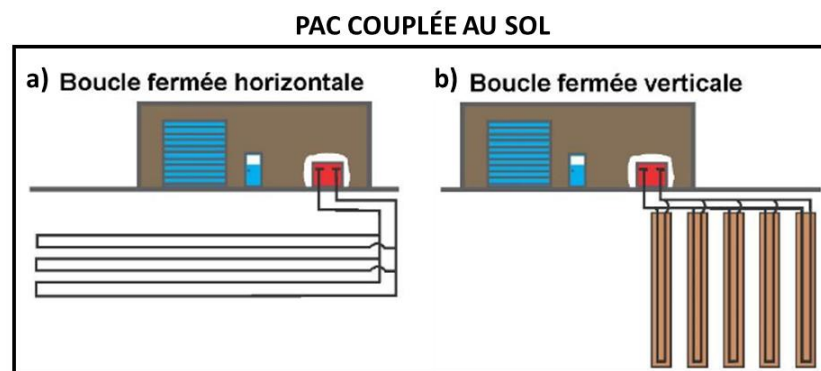


Figure 1.4: Principales configurations de PAC couplée au sol où les échangeurs de chaleur sont horizontaux a) ou verticaux b) (Comeau et Raymond, 2018).

1.2.2.2 PAC d'aquifère

Il existe plusieurs configurations possibles afin d'exploiter efficacement l'énergie thermique à partir de l'eau des unités géologiques aquifères. Après le passage à la PAC, l'eau souterraine peut être réinjectée dans l'environnement de différentes manières.

Les PAC d'aquifère représentent des systèmes à boucle ouverte. La configuration la plus commune consiste à faire circuler l'eau souterraine entre un puits de prélèvement et d'injection (***doublet géothermique***). Cette eau circule dans le système jusqu'à la PAC permettant d'y extraire ou d'y injecter de la chaleur dans le sous-sol (Figure 1.5 a). En effet, la température de l'eau souterraine varie peu sur une base saisonnière, quelles que soient les températures extrêmes retrouvées à la surface du sol. L'eau souterraine est plus chaude durant l'hiver et plus froide durant l'été que l'air extérieur (Wu et al., 2015). Cette configuration nécessite généralement des conditions hydrogéologiques favorables où l'aquifère est suffisamment perméable pour répondre au besoin énergétique. Toutefois, la conception de tels systèmes peut s'adapter selon les conditions rencontrées par l'ajout de plusieurs puits de pompage ou par la répartition de la quantité d'eau prélevée à l'intérieur de plusieurs puits d'injection.

Une seconde configuration, connue sous le nom de ***puits à colonne permanente*** (PCP) consiste à circuler l'eau souterraine à l'intérieur du même puits (Figure 1.5 b). De plus, ce type d'échangeur de chaleur peut être connecté à un second puits d'injection externe, permettant de rejeter un certain pourcentage (généralement entre 5 et 25 % du taux de prélèvement total) de l'eau souterraine hors du système (Pasquier et al., 2016). Ce rejet, communément appelé ***saignée***, favorise l'infiltration de l'eau souterraine dans le puits de prélèvement procurant un meilleur rendement énergétique grâce au transfert de chaleur par advection (Pasquier et al., 2016; Croteau, 2011). Contrairement à un système à boucle ouverte conventionnel, les PCP peuvent être installés dans des milieux où l'aquifère est peu perméable puisque son opération dépend essentiellement de l'emmagasinement de l'eau à l'intérieur du puits (Pasquier et al., 2016; Croteau, 2011).

Finalement, il existe une configuration permettant de réinjecter l'eau en surface, soit dans un cours d'eau à proximité, dans un lac ou une fosse de captage (Figure 1.5 c; Wu et al., 2015).

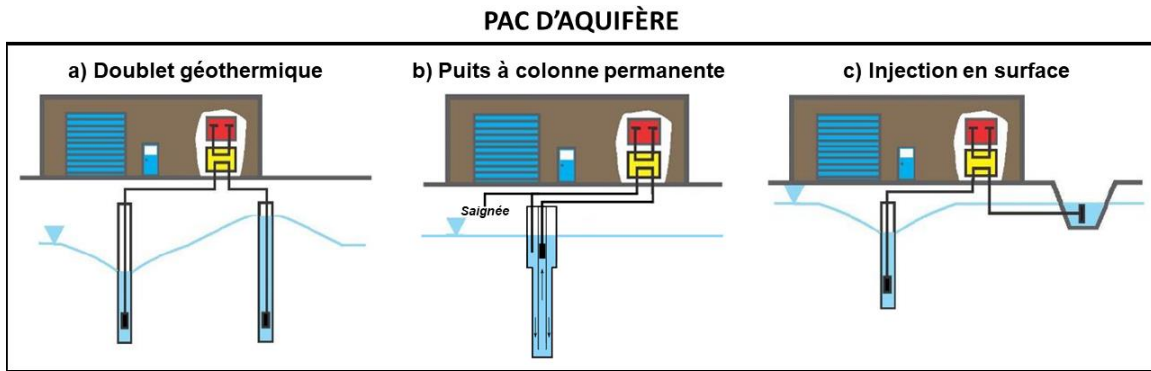


Figure 1.5: Principales configurations de PAC d'aquifère où la réinjection d'eau se fait dans l'aquifère initial par le biais d'un puits d'injection a) ou directement à l'intérieur du puits de prélèvement ou c) en surface (adaptée de Comeau et Raymond, 2018).

1.2.2.3 PAC d'eau de surface

Les PAC d'eau de surface permettent d'extraire de l'énergie thermique à partir d'étendue d'eau, telle que des lacs ou d'anciennes mines et carrières inondées. Les PAC d'eau de surface peuvent bénéficier d'un système à boucle ouverte permettant à l'eau puisée d'être réinjectée à l'intérieur de sa source initiale (Figure 1.6 a). Il est aussi envisageable d'insérer, à une certaine profondeur de la source, un système à boucle fermée par l'immersion d'échangeurs de chaleur en forme de serpentin ou de plaques (Figure 1.6 b; Comeau et Raymond, 2018).

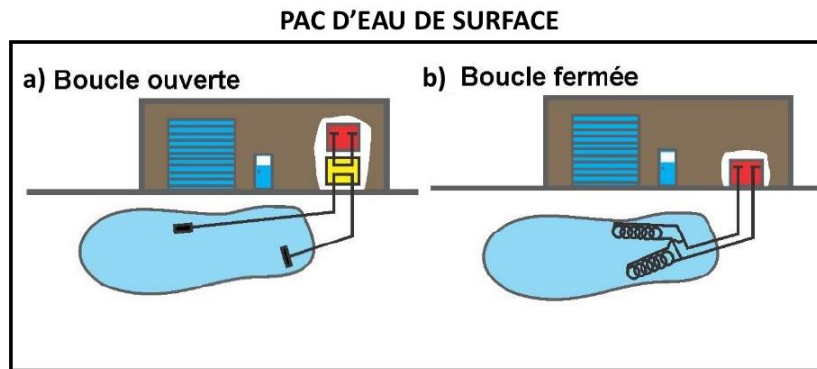


Figure 1.6: Principales configurations de PAC d'eau de surface où le système fonctionne en boucle ouverte a) ou alors en boucle fermée b) (Comeau et Raymond, 2018).

1.3 Le cadre législatif et réglementaire au Québec

Cette section fait un survol du cadre législatif et réglementaire applicable aux systèmes géothermiques. Toutefois, **le texte réglementaire prévaut en cas de divergence.**

1.3.1 La gestion des prélèvements d'eau

La Loi affirmant le caractère collectif des ressources en eau et visant à renforcer leur protection (Loi sur l'eau) a été adoptée en juin 2009. Elle confirme le statut juridique des ressources en eau comme faisant partie du patrimoine de la collectivité et précise que l'État

en est le gardien. Le régime d'autorisation des prélèvements d'eau découlant de la loi sur la qualité de l'environnement (LQE) et de la loi sur l'eau reconnaît la nécessité de satisfaire en priorité les besoins de la population et de concilier ensuite les besoins des écosystèmes et des activités à caractère économique. Plusieurs ententes et règlements encadrent donc les prélèvements d'eau (MELCC, 2021c):

- Règlement sur l'encadrement d'activités en fonction de leur impact sur l'environnement
- Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection
- Règlement sur la redevance exigible pour l'utilisation de l'eau
- Règlement sur la déclaration des prélèvements d'eau
- Entente sur les ressources en eaux durables du bassin des Grands Lacs et du fleuve Saint-Laurent

Les systèmes géothermiques qui prélèvent de l'eau sont assujettis à cette réglementation tout comme les prélèvements d'eau à d'autres fins.

1.3.1.1 Les systèmes de PAC d'eau de surface

Les travaux d'aménagement de ce type d'installations sont soumis à la politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables (PPRLPI) par le biais des réglementations municipales (Comeau et Raymond, 2018). Ces travaux sont aussi encadrés par le Règlement sur les activités dans des milieux humides, hydriques et sensibles (MTESS, 2020). Lorsqu'il y a prélèvement d'eau par le système, ce prélèvement d'eau de surface est soumis à l'autorisation ministérielle s'il dépasse 75 m³ par jour comme les prélèvements d'eau à d'autres fins. Le présent rapport ne concerne toutefois pas les effets potentiels sur l'environnement liés aux PAC d'eau de surface.

1.3.1.2 Les systèmes de PAC couplée au sol et d'aquifère

Au Québec, la conception et l'installation de ces types de systèmes géothermiques sont encadrées par la Loi sur la qualité de l'environnement (LQE), le règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection (RPEP) ou le règlement sur l'encadrement d'activités en fonction de leur impact sur l'environnement (REAFIE) tout comme les prélèvements d'eau effectués à d'autres fins que celles géothermiques.

Le REAFIE est entré en vigueur le 31 décembre 2020 à la suite de l'adoption de la Loi modifiant la LQE en mars 2018 (MELCC, 2021). Les dispositions concernant l'autorisation de prélèvement d'eau qui étaient présentes dans le RPEP depuis 2014 ont été transférées dans le REAFIE avec des modifications mineures seulement. Les dispositions s'appliquant aux systèmes non assujettis à l'autorisation ministérielle demeurent dans le chapitre IV du RPEP qui est d'application municipale tel que le précise le nouvel article 27.1 du RPEP.

1.3.2 Seuil d'assujettissement des prélèvements d'eau à l'autorisation ministérielle

Les systèmes géothermiques dont le débit maximal est égal ou supérieur 75 m³ (75 000 L) par jour sont assujettis à l'autorisation ministérielle (art. 31.75 de la LQE) alors que ceux prélevant moins que ce débit doivent respecter les normes de l'article 28 du RPEP et sont

soumis à un permis municipal. Ce seuil correspond au débit prélevé, peu importe que l'eau soit utilisée, en tout ou en partie ou qu'elle soit entièrement retournée dans le milieu. Le calcul du débit maximal doit aussi considérer l'ensemble des sites de prélèvement de l'établissement. Par exemple, pour savoir si une entreprise dépasse ce seuil de 75 m³/j (75 000 L/j), il faudra additionner ces prélèvements faits à des fins géothermiques et ceux faits à d'autres fins (ex. : approvisionnement en eau potable, procédés industriels, etc.).

1.3.2.1 Autorisation ministérielle de prélèvement d'eau

Les éléments à fournir pour la demande d'autorisation sont spécifiés dans le REAFIE. L'article 169 du REAFIE précise les informations à fournir pour l'autorisation de prélèvement d'eau en plus des informations générales exigées aux articles 16, 17 et 18 pour toute demande d'autorisation ministérielle. L'article 18 précise notamment que les impacts anticipés du projet sur l'environnement et les mesures de suivi, d'entretien, de surveillance et de contrôle proposées doivent être documentés dans la demande. Une évaluation des effets du prélèvement d'eau doit être réalisée pour la demande d'autorisation. Cette évaluation peut prendre deux formes différentes selon le volume moyen d'eau prélevé :

- Si le système prélève de l'eau souterraine **entre 75 et 379 m³/j**, le demandeur doit fournir une évaluation des effets du prélèvement d'eau sur les usagers voisins et sur les milieux humides situés à proximité (Figure 1.7). Cette évaluation doit être faite par un professionnel dans un rapport technique dans lequel la zone d'influence du système de pompage est caractérisée. La méthode employée est à la discrétion du professionnel responsable du rapport.
- Si le système prélève **plus de 379 m³/j**, une étude hydrogéologique faite par un professionnel doit être soumise avec la demande d'autorisation ministérielle. Cette étude exhaustive doit alors répondre à une série de critères énoncés à l'article 171 du REAFIE (Figure 1.7).

1.3.2.2 Permis municipal

Les systèmes géothermiques qui ne sont pas assujettis à l'autorisation ministérielle doivent respecter les normes du chapitre IV du RPEP (MELCC, 2021d). La municipalité est responsable de l'application de ces normes par l'émission d'un permis municipal.

- Les systèmes qui prélèvent de l'eau (**inférieur à 75 m³/j**) sont encadrés par l'article 28 du RPEP (Figure 1.7).
- Les systèmes à boucle fermée qui ne prélèvent pas d'eau sont encadrés par les articles 29 et 30 du RPEP (Figure 1.7).

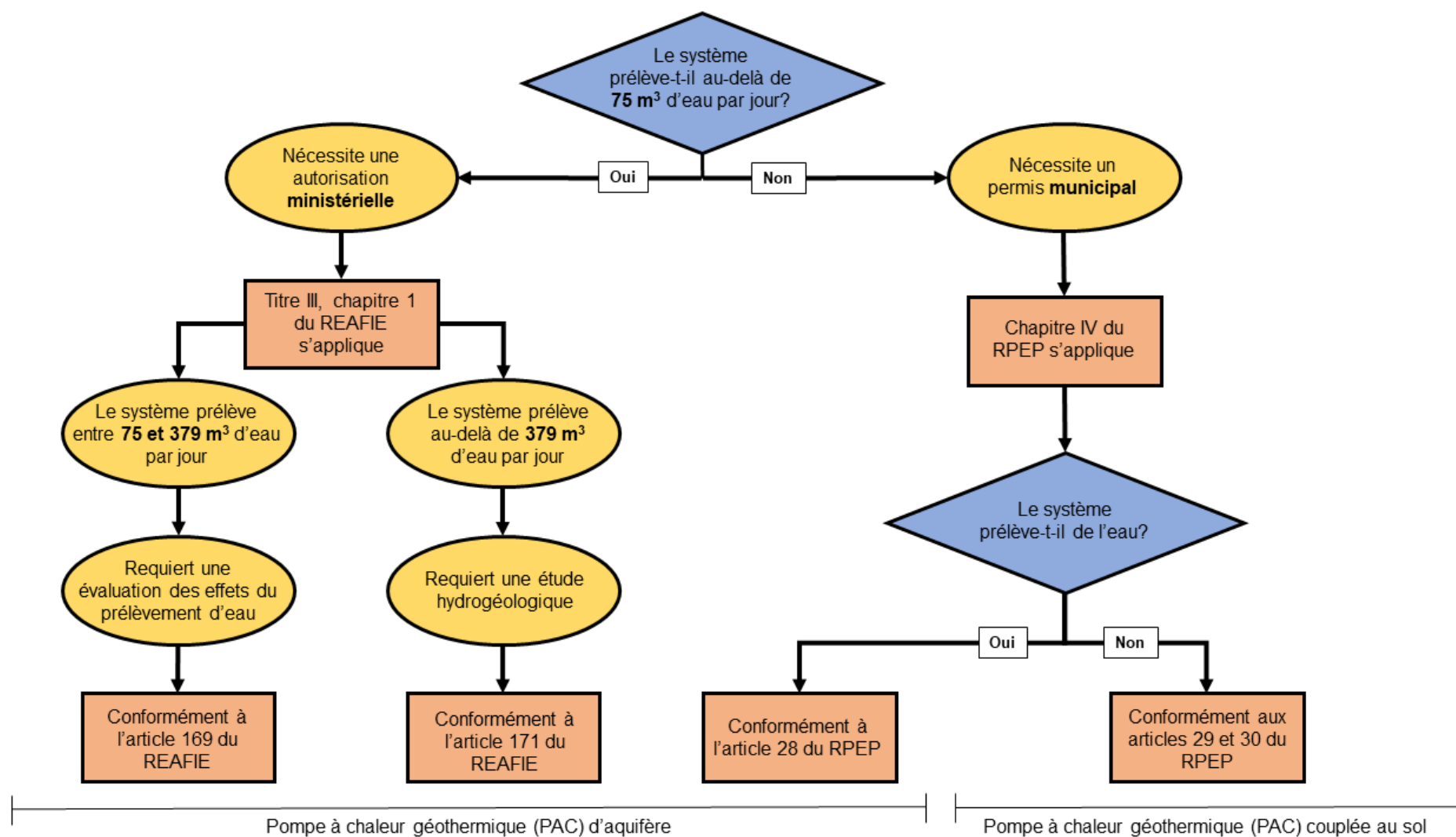


Figure 1.7: Résumé du cadre réglementaire québécois pour l'exploitation des systèmes de PAC d'aquifère et de PAC couplée au sol. Le texte réglementaire prévaut en cas de divergence.

1.3.3 Puissance des systèmes géothermiques assujettis à la réglementation

La taille du système géothermique dépend directement de l'ampleur de l'infrastructure à chauffer et/ou climatiser. Ainsi, les exigences réglementaires applicables sont nécessairement dépendantes de la demande énergétique et donc de l'envergure des bâtiments. Selon les chartes techniques du fournisseur *Daikin* (*Daikin Applied*, 2021) et une estimation de la capacité typique de différents systèmes de PAC par le *British Geological Survey* (Abesser, 2007), il est possible d'associer des groupes d'infrastructures à différentes tailles de PAC selon leur débit de prélèvement respectif (Tableau 1.1). Cette estimation permet de constater que pour la majorité des cas, un permis municipal serait suffisant lors de l'installation d'un système géothermique résidentiel. Cependant, pour les infrastructures d'envergure telles que les immeubles de bureaux, les centres commerciaux, les écoles et autres secteurs publics, la demande énergétique nécessite l'installation de systèmes géothermiques requérant un débit de prélèvement d'eau souterraine pouvant excéder 379 m³/j. C'est particulièrement pour ces cas qu'une étude hydrogéologique doit être réalisée pour l'obtention d'une autorisation ministérielle.

Tableau 1.1: Comparaison entre: 1) les fiches techniques des PAC accessibles sur le marché par le fournisseur *Daikin*, 2) les seuils de débits de prélèvement établis par la loi au Québec et 3) la capacité typique des installations géothermiques superficielles pour différents groupes d'infrastructures établies par le *British Geological Survey (Daikin Applied, 2021; Abesser, 2007)*.

1) Caractéristiques techniques des PAC accessibles sur le marché				2) Critères réglementaires au Québec		3) Capacité typique des systèmes géothermiques	
Puissance		Débit		Seuil de débit de prélèvement d'eau	Autorisation		
BTU/h	tonne	gpm	m³/j	m³/j			
7000	0,6	2,2	12,0	< 75	Permis municipal		
9000	0,8	2,4	13,1				
12000	1,0	3,3	18,0				
15000	1,3	3,8	20,7				
19000	1,6	4,4	24,0				
24000	2,0	6,5	35,4				
30000	2,5	7,5	40,9				
36000	3,0	9,0	49,1				
42000	3,5	10,5	57,2				
48000	4,0	12,2	66,5				
60000	5,0	16,0	87,2	75 - 379	Autorisation ministérielle		
70000	5,8	17,5	95,4				
72000	6,0	18,5	100,8				
96000	8,0	22,2	121,0				
120000	10,0	30,0	163,5				
180000	15,0	46,0	250,7				
215000	17,9	54,0	294,4				
290000	24,2	80,0	436,1	> 379			

Légende

	Domestique/résidentiel	(Capacité typique : 2-15 kW)
	Logement/association	(Capacité typique : 20-100 kW)
	Commercial	(Capacité typique : 50 kW-MW)
	Secteur public	(Capacité typique : 50 kW-MW)

Au Québec, les systèmes géothermiques requérant l'extraction d'eau souterraine sont essentiellement les doublets géothermiques et les puits à colonne permanente. Les doublets aménagés dans des aquifères perméables représentent la configuration la plus efficace parmi tous les systèmes de PAC géothermique (*Water Energy Distributors, 2021*). Cette configuration a la capacité de subvenir au besoin en climatisation et en chauffage des infrastructures auxquels la demande énergétique peut atteindre jusqu'à 50 MW (*SQGI,*

2021). Son potentiel énergétique a comme seule limite les conditions hydrogéologiques et géologiques du secteur. Ainsi, la rentabilité énergétique du système dépend directement de la productivité de l'aquifère. De plus, les PCP ont aussi le potentiel de répondre à d'importante demande énergétique, mais de moindre mesure comparativement aux doublets. Malgré tout, un seul PCP peut subvenir entre 30 – 40 tonnes de réfrigération (0.106 – 0.141 MW; Pasquier et al., 2016). Ainsi, l'installation de plusieurs PCP peut accroître rapidement la capacité énergétique totale du système. Cette configuration peut répondre à des demandes pouvant atteindre jusqu'à 20 MW (SQGI, 2021). Le Tableau 1.2 comprend plusieurs exemples d'installations de PCP, répertoriées aux États-Unis en Nouvelle-Angleterre.

Tableau 1.2: Exemple de capacité totale pour différentes installations de puits à colonne permanente localisées en Nouvelle-Angleterre, aux États-Unis (Orio et al., 2005).

Type de système géothermique	Localisation	Type d'Infrastructure	Capacité totale du système		Nombre de puits
			tonne	kW	
-	-	-	-	-	-
Puits à colonne permanente	Uxbridge, Massachusetts	Résidence	5.0	17.6	1
	N. Easton, Massachusetts	Résidence	5.0	17.6	1
	Tapsham, Maine	Résidence	5.0	17.6	1
	Carlisle, Massachusetts	Résidence	6.0	21.1	1
	Rockport, Massachusetts	<i>Halibut Point State Park</i>	6.5	22.9	1
	Raymond, Maine	Résidence	7.0	24.6	1
	Windham, New Hampshire	Résidence	7.5	26.4	1
	Bedford, Massachusetts	<i>Hanseom AFB</i>	10.0	35.2	1
	Cambridge, Massachusetts	Appartement	10.0	35.2	1
	Raymond, Maine	Résidence	10.0	35.2	1
	Rye, New Hampshire	Résidence	10.0	35.2	1
	Falmouth, Maine	<i>Maine Audubon</i>	15.0	52.8	1
	Okemo Mt, Vermont	Résidence	15.0	52.8	1
	Scarborough, Maine	<i>Maine Cottages</i>	26.5	93.2	1
	Scarborough, Maine	<i>Inn Maine #2</i>	38.5	135.4	1
	Lowell, Massachusetts	<i>New England Quilt Museum</i>	60.0	211.0	2
	Saugus, Massachusetts	Appartement	63.0	221.6	4
	Haverhill, Massachusetts	<i>Haverhill Library</i>	110.0	386.9	4
	Scarborough, Maine	<i>Main Blackport Inn</i>	200.0	703.4	4
	Westborough, Massachusetts	<i>Hasltings School</i>	200.0	703.4	6

Les pompes submersibles, généralement utilisées pour le fonctionnement des doublets géothermiques et des PCP, procurent des taux de prélèvement variant entre 1.5 et 3 gpm par tonne de réfrigération (0.43 et 0.85 gpm/kW; Wu et al., 2015; Croteau, 2011; Orio et al., 2005). Ainsi, en considérant que ces systèmes ont la capacité de répondre aux demandes

de climatisation et de chauffage autant pour le secteur résidentiel qu'industriel, ces deux configurations ont le potentiel d'excéder un taux de prélèvement d'eau souterraine de 379 m³/j.

Il existe peu de données sur les échangeurs de chaleur hybride permettant d'estimer leur taux de prélèvement typique en eau souterraine. Cependant, il est important de souligner que l'eau souterraine n'est pas utilisée comme caloporteur pour cette configuration. De ce fait, le taux de prélèvement peut être moins important que pour les PCP et les doublets géothermiques pour une demande énergétique similaire. Selon le système expérimental, documenté par Farabi-Asl et al. (2018), le prélèvement d'eau souterraine avait atteint un débit maximal de 21.6 m³/j ($\approx$ 4 gpm) pour la climatisation et le réchauffement d'une superficie de 100 m² (1076 pi²).

1.4 Problématique

L'expansion mondiale de l'installation des PAC géothermique soulève des questions chez les législateurs et les professionnels à savoir les différents impacts potentiels que peut engendrer cette technologie sur l'intégrité de l'environnement et sur les usagers voisins. Malgré l'encadrement applicable au Québec, il existe un manque de directives précises lorsque l'installation d'une PAC géothermique nécessite une étude hydrogéologique pour l'obtention d'une autorisation ministérielle. Afin d'offrir davantage de directives applicables aux systèmes géothermiques, le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) a besoin de connaissances supplémentaires sur les effets potentiels des systèmes géothermiques sur l'environnement, particulièrement sur les eaux souterraines et leurs utilisateurs (autres usagers et écosystèmes).

1.5 Objectifs

Ce rapport a pour objectif de recenser les connaissances scientifiques et techniques sur les effets potentiels sur l'environnement et les autres usagers des systèmes géothermiques de basse température qui prélèvent de l'eau souterraine.

Ces informations permettront de mettre en lumière les effets potentiels sur l'environnement à considérer lors de la réalisation d'une étude hydrogéologique, exigée lors d'une demande d'autorisation ministérielle pour un prélèvement d'eau à des fins géothermiques. Les systèmes ciblés par ce rapport sont essentiellement :

- Les doublets géothermiques (Figure 1.5 a)
- Les puits à colonnes permanentes (Figure 1.6 b)

Les échangeurs de chaleur hybride (système semi-ouvert) (Figure 1.2) sont considérés dans une moindre mesure par ce rapport puisque ce système est actuellement une configuration expérimentale.

1.6 Structure du rapport

Une revue des effets potentiels sur l'environnement pour des systèmes géothermiques qui prélèvent de l'eau souterraine est d'abord présentée. Cette section aborde les impacts considérés et étudiés par la communauté scientifique, soit les impacts thermiques,

hydrogéologiques, géochimiques, microbiologiques et biogéochimiques. Ensuite, une deuxième section présente des éléments à considérer lors de la réalisation d'une étude hydrogéologique, pour l'aménagement d'un doublet géothermique et d'un PCP. Des essais et des méthodes d'analyse technique et numérique, utiles à la caractérisation des impacts potentiels sur les autres usagers et sur l'eau souterraine sont alors décrits. De plus, cette section soulève l'importance du suivi et de l'entretien des puits pour favoriser la durabilité et l'efficacité des systèmes géothermiques.

2. Les pompes à chaleur d'aquifère: Une revue de leurs effets

L'exploitation de PAC géothermique a avant tout un effet positif sur l'environnement puisque cette technologie n'émet pas de dioxyde de carbone, de monoxyde de carbone ou tout autre gaz à effet de serre lorsque l'électricité consommée pour faire fonctionner la PAC est de source renouvelable (Wu et al., 2015). En revanche, les PAC géothermique d'aquifère comprennent des implications environnementales importantes et leur installation nécessite une bonne compréhension du milieu exploité (Comeau et Raymond, 2018). Pour l'humain, l'eau souterraine offre un large éventail de services écosystémiques et le plus important est probablement son rôle en tant que source d'eau douce (Hähnlein, 2013). De ce fait, l'utilisation de cette ressource comme réservoir d'énergie doit être bien gérée. Ainsi, la conception de PAC d'aquifère doit assurer une utilisation durable (Hähnlein, 2013). Selon une revue de leurs effets, quatre groupes de risques environnementaux ont été distingués : 1) l'impact thermique, 2) l'impact hydrogéologique, 3) l'impact géochimique et 4) l'impact microbiologique et biogéochimique (Bonte, 2013).

2.1 Impact thermique

Les effets causés par l'altération thermique sur les propriétés hydrogéologiques de l'aquifère sont les principales préoccupations concernant l'utilisation de PAC d'aquifère (Tsarakakis et al., 2020; Wu et al., 2015). L'utilisation de l'eau souterraine lors de l'opération de la PAC nécessite la décharge de l'eau dans un puits d'injection après son passage dans le système. Cette décharge sera thermiquement altérée par une augmentation ou une diminution de la température, en fonction du mode d'utilisation de la PAC (Wu et al., 2015). En effet, en mode climatisation, l'eau injectée sera plus chaude que la température de l'eau dans le sol alors qu'en mode chauffage, l'eau injectée sera plus froide.

L'augmentation ou la diminution de la température peut influencer les propriétés géochimiques, microbiologiques et physiques de l'eau souterraine (Hähnlein, 2013). Ces déséquilibres peuvent compromettre l'efficacité et la durabilité d'installations voisines, localisées en aval hydraulique du/des puits d'injection (Pophillat et al., 2020; Bonte, 2013; Hähnlein, 2013). Ces installations peuvent comprendre, par exemple, d'autres systèmes géothermiques ou des puits de prélèvement d'eau potable.

L'ampleur des changements de température de l'eau souterraine dépend fortement des conditions hydrogéologiques du site (Hähnlein, 2013). Cette anomalie peut prendre la forme d'un panache d'altération thermique contrôlée par l'écoulement naturel de l'eau souterraine de l'aquifère exploité. **L'expansion spatiale de ce panache dépend de la vitesse de l'écoulement de l'eau souterraine, du taux de consommation d'énergie par**

la PAC et des propriétés thermiques de l'aquifère (Wu et al., 2015; Hähnlein, 2013). Dans des conditions où la vitesse de l'écoulement de l'eau souterraine est relativement élevée, tel que dans le sable et le gravier, le panache thermique atteint rapidement un état stable. Il en résulte que sous ces conditions, l'expansion du panache sera plus faible (Hähnlein, 2013). En effet, la température de l'eau souterraine peut alors retrouver son état initial rapidement lorsque le système est mis en arrêt ou à la suite de l'inversion de son mode d'opération (Hähnlein, 2013). Dans le cas contraire, le panache thermique prendra plus de temps à présenter un état stable si le taux d'extraction de la chaleur augmente (Hähnlein, 2013).

2.2 Impact hydrogéologique

L'exploitation de PAC d'aquifère a peu d'impact sur la quantité d'eau disponible dans l'aquifère lorsque le volume d'eau prélevé est entièrement réinjecté dans son aquifère initial. Cependant, le système de puits d'extraction et de réinjection a la possibilité de perturber le niveau piézométrique et l'écoulement souterrain de l'aquifère (Bonte, 2013). **L'un des principaux problèmes anticipés est la formation d'un cône de dépression au pourtour du puits d'extraction** (Wu et al., 2015). Le contrôle de cette dépression de la nappe peut s'avérer un défi lorsque le système géothermique sis dans un secteur où l'aquifère est fortement exploité par d'autres usagers. Cependant, cet effet peut être diminué lorsque les puits d'injection sont situés à l'intérieur de la zone d'influence du puits d'extraction (tel que la configuration des PCP). De plus, même si le taux d'extraction et d'injection est balancé, le système engendre une constante perturbation du régime d'écoulement de l'eau souterraine (Wu et al., 2015). Il est à noter que les conséquences liées à cette perturbation ne sont pas clairement définies. Toutefois, il en résulte que la trajectoire de l'eau souterraine sera déviée et que sa vitesse d'écoulement sera augmentée en périphérie des puits (Bonte, 2013). La déviation de la trajectoire de l'écoulement souterrain n'a pas nécessairement un impact environnemental lorsque l'eau souterraine est considérée comme étant propre. Cependant, **le puits d'extraction peut favoriser la déviation de la propagation d'un contaminant dans l'aquifère** (Possemiers et al., 2014). S'il advient que le contaminant atteigne le puits d'extraction, il s'ensuit que le puits d'injection contribuera à l'expansion et à la dispersion spatiale du contaminant.

2.3 Impact géochimique

La composition chimique de l'eau souterraine est fonction d'une variété d'interactions complexes qui dépendent des caractéristiques géologiques, hydrologiques et biologiques de l'aquifère (Wu et al., 2015). Les PAC d'aquifère peuvent influencer la chimie de l'eau souterraine par: 1) le changement de température affectant l'interaction entre l'eau et les sédiments ou le roc et 2) le mélange de l'eau souterraine de composition différente (Bonte, 2013).

2.3.1 Effet de la température

Le changement de température de l'eau souterraine peut engendrer des déséquilibres chimiques dans l'aquifère (Wu et al., 2015). **Ces déséquilibres correspondent, entre autres, à des changements dans la solubilité des minéraux, dans la cinétique des**

réactions chimiques et dans l'oxydation de la matière organique (Bonte, 2013). Certains minéraux peuvent se dissoudre aux puits d'extraction pour finalement précipiter dans les puits d'injection et vice versa. Dans les puits où la température est plus élevée, les silicates auront tendance à se dissoudre engendrant une augmentation de la concentration en Si. Ce déséquilibre favorise la précipitation de silicate (talc, quartz) dans les puits où l'eau est refroidie (Possemiers et al., 2014). En outre, les carbonates (CaCO_3 et FeCO_3), auront tendance à précipiter dans les puits où la température est plus élevée et à dissoudre dans les puits où la température est plus basse (Possemiers et al., 2014). De plus, le carbonate de calcium peut précipiter par la diminution de la concentration en CO_2 , provoquée par une baisse de la pression ou par un échange gazeux avec l'atmosphère (Burté, 2018). Un autre impact potentiel considéré est la précipitation de minéraux de sels pouvant colmater les pores de l'aquifère, tels que le magnésium et le calcium (Wu et al., 2015). Selon une étude géochimique mentionnée par Possemiers et al. (2014), une eau souterraine passant de 10 à 50 °C réduit significativement la perméabilité de l'aquifère par la précipitation de calcium. Toutefois, cette température est nettement supérieure à la plage de température (5 – 20 °C) que procurent la plupart des PAC géothermique conventionnelles (Possemiers et al., 2014). Puisque l'altération thermique de l'aquifère dépend des conditions géologiques et hydrogéologiques locales et du rendement énergétique de la PAC, les variations de température observées dans l'aquifère sont limitées par la plage que procure la PAC géothermique (entre 5 et 20 °C pour les systèmes conventionnels).

Plusieurs réactions chimiques sont contrôlées non seulement par un déséquilibre géochimique, mais aussi par la cinétique des réactions. Pour sa part, la cinétique des réactions chimiques peut être influencée par de faibles variations de température. Possemiers et al. (2014) mentionnent que lors d'une étude, une hausse de température de l'eau souterraine de 2 à 23 °C a été suffisante afin d'observer une augmentation du taux d'oxydation de la pyrite et de la matière organique. En outre, une hausse de la température augmente les vitesses des réactions chimiques et favorise le taux de formation des carbonates (Burté, 2018). Toutefois, lorsque le système géothermique est thermiquement stable, aucun effet considérable n'est attendu lorsque $\Delta T < 20$ °C. Dans le cas contraire, **s'il existe un déséquilibre thermique dans le système et si $\Delta T > 20$ °C, l'impact de la variation de la température aura un effet exponentiel sur la cinétique des réactions chimiques** (Possemiers et al., 2014).

La variation de la température de l'eau souterraine a des effets sur les caractéristiques de la matière organique de l'aquifère. Lorsque la température est supérieure à 45 °C, le carbone organique se mobilise engendrant une croissance de la demande chimique en oxygène (COD) de l'eau souterraine (Possemiers et al., 2014). Il en résulte que la capacité de la matière organique d'adsorber les polluants organiques ou les éléments traces est alors diminuée (Possemiers et al., 2014).

2.3.2 Effet du mélange

Mis à part l'effet de la température sur le déséquilibre géochimique de l'aquifère, le mélange d'eau souterraine de composition différente peut aussi avoir une influence sur sa géochimie (Possemiers et al., 2014; Bonte, 2013). **La qualité de l'eau souterraine peut varier en fonction de la profondeur grâce aux réactions chimiques qu'engendre l'infiltration de l'eau de surface dans le sol.** L'impact potentiel du mélange dépend alors du type de gradient que présente l'eau souterraine du secteur: gradient d'oxydoréduction (redox), gradient de salinité (chlorite), gradient de pH ou gradient de contamination (Possemiers et al., 2014).

Le gradient de redox est causé par les différentes réactions chimiques d'oxydoréduction eau-eau et eau-sédiment de l'aquifère. L'eau en surface présente une composition généralement riche en oxygène et en nitrate alors que l'eau en profondeur est riche en fer (Possemiers et al., 2014; Bonte, 2013). **Le mélange de ces eaux aux différentes conditions d'oxydoréduction engendre la formation de phases gazeuses (N_2 et CO_2) favorisant la précipitation d'oxydes ($FeOOH$ et $MnOOH$) et de carbonates pouvant perturber la durabilité du système par le colmatage des puits** (Possemiers et al., 2014). Un autre type de gradient est celui de la salinité de l'eau (ou gradient de chlorite). Le mélange de ces eaux a pour effet de compromettre la potabilité de l'eau souterraine, mais aussi d'augmenter la force ionique des éléments ayant pour effet de perturber l'équilibre géochimique de l'eau (Possemiers et al., 2014). En outre, un mélange entre deux eaux dont la dureté est différente peut engendrer une dissolution de la calcite de manière plus importante (Possemiers et al., 2014). Finalement, le transport de contaminants à de plus grandes profondeurs peut être accéléré par le procédé de mélange. La dégradation des contaminants dépend des conditions d'oxydoréduction de l'aquifère, ainsi le mélange peut entraîner des conditions favorables ou défavorables à la dégradation du contaminant (Possemiers et al., 2014).

2.4 Impact microbiologique et biogéochimique

L'eau souterraine comprend naturellement une quantité considérable de microorganismes même sous des conditions anaérobiques (Bonte, 2013). Les microorganismes utilisent des oxydants comme nutriment tels que l'oxygène, le nitrate et le sulfate et réduisent le potentiel d'oxydoréduction de l'aquifère (Bonte, 2013). Le contrôle des nutriments est important afin de réduire la croissance de microorganismes pathogènes, spécifiquement lorsque l'eau est utilisée pour des fins de consommation. L'impact microbiologique engendré par les PAC géothermique peut se produire suite aux changements de température dans l'aquifère ou par un ajout de nutriments par le biais des fluides utilisés lors des forages des puits (Bonte, 2013). Des études antérieures ont démontré que l'utilisation de PAC géothermique n'entraîne pas de conditions favorables à la croissance et à la survie d'agents pathogènes, mais plutôt des changements considérables dans la composition des communautés bactériennes (Bonte, 2013). Même si les systèmes géothermiques ont un impact sur la diversité microbienne, **l'impact est limité par rapport à la variabilité saisonnière et pose peu de menaces potentielles pour la production d'eau potable dans les aquifères peu profonds** (Bonte, 2013).

Des processus biologiques peuvent participer au problème de colmatage de puits par l'action de différentes communautés bactériennes du cycle du soufre, telles que les bactéries filamenteuses (BOS) et sulfurogènes (BTR et BSR; Burté, 2018). Toute exploitation de la nappe peut entraîner un apport en oxygène qui favorise le développement des bactéries filamenteuses qui oxydent l'hydrogène sulfuré produit par les bactéries sulfurogènes, ce qui entraîne la formation de biofilms denses sur les parois des tubages et équipements (Burté, 2018). La coexistence et l'interaction entre ces communautés bactériennes sont possibles sur une large gamme de température. **Ainsi, les variations de température engendrées par le fonctionnement des doublets géothermiques et des PCP ne semblent pas suffisantes pour affecter la viabilité des communautés bactériennes** (Burté, 2018).

Finalement, **le colmatage induit par la précipitation d'oxydes de fer et de manganèse par le biais de processus biogéochimiques est le problème le plus couramment observé, particulièrement pour les doublets géothermiques** (Burté, 2018). Comme mentionné précédemment, les effets de mélange peuvent provoquer l'oxydation du fer et du manganèse, principalement lorsque ces composés existent en état réduit (Fe^{2+} et Mn^{2+}) et qu'ils sont mis en contact avec des espèces oxydantes (O_2 et N_2 ; Burté, 2018). En présence de ces ions, les bactéries ferro-oxydantes (FeOB) et mangano-oxydante (MnOB) peuvent activer l'oxydation du fer et du manganèse et donc favoriser la formation de dépôts colmatant (Burté, 2018). En consommant l'oxygène, les bactéries ferro-oxydantes réduisent les ions de fer (Fe^{2+}) en fer ferrique (Fe^{3+}) et favorisent la formation de biofilms constitués d'hydroxyde de fer (Burté, 2018).

3. Éléments d'une étude hydrogéologique

Comme mentionné à la section 1.3, les systèmes d'envergure impliquant un débit de prélèvement supérieur à $379 \text{ m}^3/\text{j}$ sont soumis à une autorisation ministérielle de prélèvement d'eau dont la demande doit contenir une étude hydrogéologique. Le captage de l'eau souterraine pour l'opération des systèmes de PAC géothermique implique des préoccupations supplémentaires à celle des autres usages, comme l'approvisionnement en eau potable. En effet, les PAC géothermique se distinguent par leur capacité d'engendrer une altération thermique à l'aquifère. Afin de conserver l'intégrité de l'eau souterraine pour les autres usagers (écosystèmes et consommation humaine), il est nécessaire de développer une stratégie d'utilisation durable de l'énergie géothermique (Hähnlein, 2013).

La Figure 3.1 présente les éléments à considérer lors de la réalisation d'une étude hydrogéologique pour l'aménagement d'un système géothermique nécessitant un prélèvement d'eau souterraine. Trois considérations se distinguent : 1) celle des impacts sur les usagers, 2) celle des impacts sur la qualité de l'eau souterraine et finalement 3) celle sur la durabilité du système. Il est à noter que ces considérations soulèvent, entre autres, des impacts associés à l'opération qui n'affectent pas nécessairement l'intégrité de l'environnement, mais altèrent plutôt la durabilité et l'efficacité du système géothermique. Ces impacts sont toutefois soulignés dans les prochaines sections puisqu'ils font partie des éléments à considérer lors de la réalisation d'une étude hydrogéologique. Ces

recommandations sont basées sur les travaux de revue de littérature scientifique réalisés par l'INRS. Elles ne représentent pas les directives officielles du Ministère à ce sujet; celles-ci étant en développement.

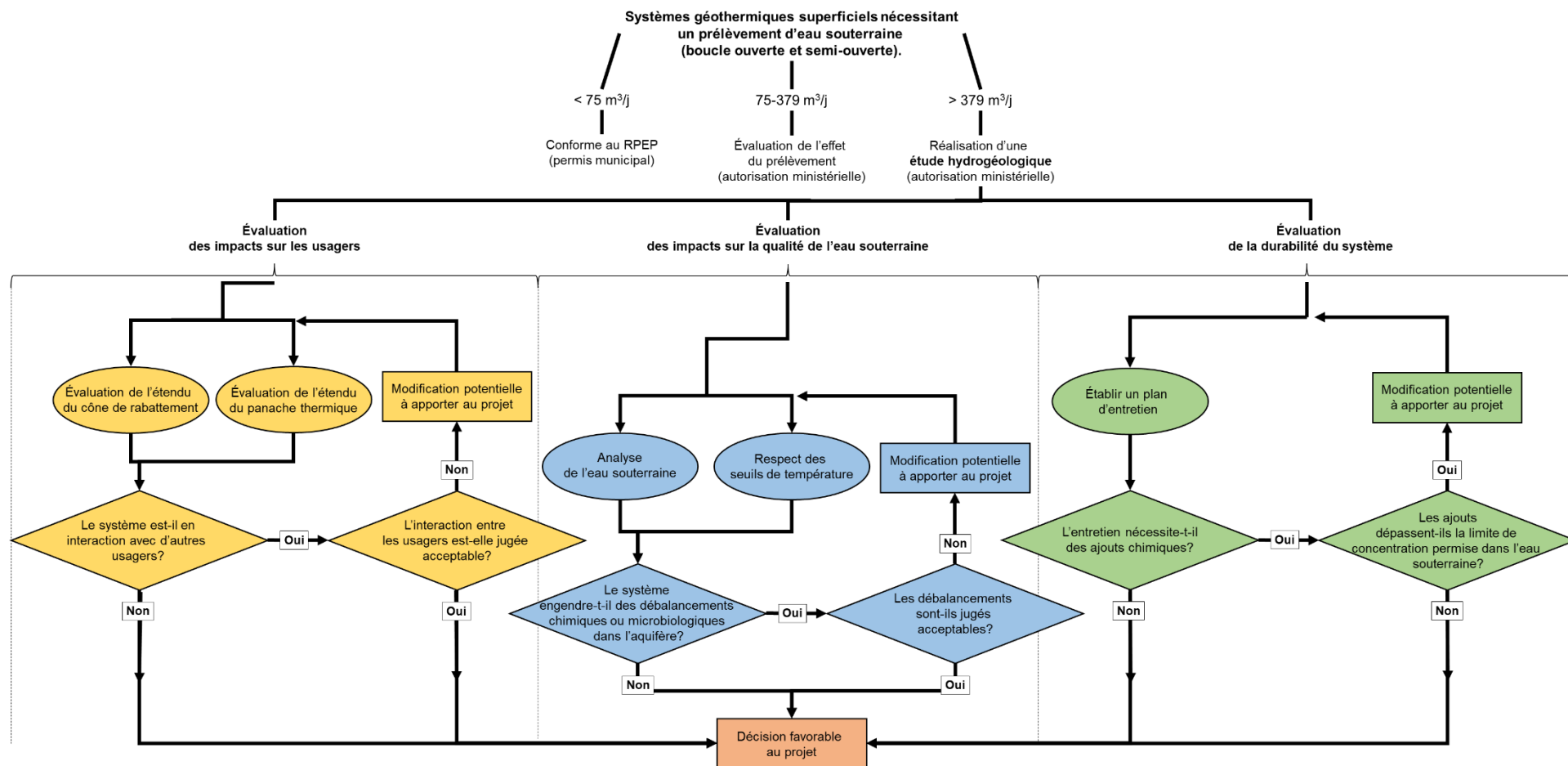


Figure 3.1: Les éléments à considérer lors de la réalisation d'une étude hydrogéologique requise pour la demande d'autorisation ministérielle de prélèvement d'eau souterraine pour un système géothermique superficiel

3.1 Évaluation des impacts sur les usagers

Cette section fait mention du potentiel d'interaction entre le système géothermique et les autres usagers de l'aquifère exploité par l'effet de la diminution piézométrique causée par le taux de prélèvement et l'étendue d'un panache thermique. Certes, s'il existe une interaction quelconque entre les systèmes géothermiques et d'autres installations, les répercussions peuvent occasionner une diminution de durabilité et d'efficacité (Pophillat et al., 2020; Wu et al., 2015). Dans le cas où une interaction serait observée, une évaluation du projet peut être réalisée pour déterminer si l'impact causé par le panache thermique ou par la diminution piézométrique est jugé acceptable. En effet, si l'interaction est jugée inacceptable, une première solution serait de relocaliser le système de manière à éliminer, ou du moins à diminuer les conséquences. En revanche, si le système ne peut pas être déplacé, d'autres méthodes de mitigations telles que l'ajustement du débit de prélèvement ou le contrôle du changement de température entre le puits de pompage et d'injection peuvent être des éléments de conception reconsidérés. De plus, une proposition d'une configuration différente peut aussi être une solution convenable, par exemple par le remplacement d'un doublet géothermique par des PCP.

Plusieurs revues de la littérature ont été réalisées à travers le monde pour répertorier des distances minimales de séparation entre différentes installations établies par les juridictions pour l'encadrement des PAC géothermique afin d'éviter les problématiques d'interaction (Tsagarakis et al., 2020; Karytsas et Chaldezios, 2017; Somogyi et al., 2017; Hähnlein, 2013). Cependant, les distances minimales adoptées dans certains pays ne font pas nécessairement l'unanimité, car chaque juridiction a un contexte et une réalité propre. Il s'avère que ces distances varient entre 5 et 300 m selon les différentes recommandations et réglementations consultées (Hähnlein et al., 2010). Au Québec, il existe des exigences axées sur les distances de séparation minimales à respecter lors de l'installation de puits en général. Ces distances sont énumérées dans le chapitre III du RPEP à l'article 17. Ces distances sont :

- 15 m ou plus d'un système étanche de traitement des eaux usées.
- 30 m ou plus d'un système non étanche de traitement des eaux usées ou 15 m si le puits est scellé conformément à l'article 19.
- 30 m ou plus d'une aire de compostage, d'une cour d'exercice, d'une installation d'élevage, d'un ouvrage de stockage de déjections animales, d'une parcelle d'un pâturage ou des terrains où s'exerce l'exploitation d'un cimetière.

De plus, la norme CSA C448 suggère aussi des distances minimales, similaires à celles mentionnées dans le RPEP. Ces distances sont :

- 15 m d'un puits d'eau potable.
- 15 m d'une fosse septique.
- 30 m d'un champ d'épuration.
- 30 m d'une source (ou résurgence).

Toutefois, de manière semblable à la caractérisation du cône de rabattement piézométrique, l'expansion du panache thermique dépend fortement des conditions géologiques et hydrogéologiques du site. L'étendue du panache thermique dans l'aquifère dépend, entre autres, du taux d'extraction ou d'injection de chaleur par la PAC, de la conductivité hydraulique de l'aquifère et de la conductivité thermique du sol ou du roc (Wu et al., 2015; Hähnlein, 2013). **Les distances minimales entre différentes installations devraient être établies selon une décision de cas par cas basée sur des essais permettant d'évaluer les propriétés hydrauliques et thermiques de l'aquifère** (Hähnlein, 2013).

D'une part, la zone d'influence du prélèvement d'eau souterraine peut être définie par des essais de pompage conventionnel (Hähnlein, 2013). De plus, l'expansion du panache thermique dans l'aquifère peut être estimée grâce à des solutions analytiques ou par des simulations numériques à la suite de la détermination des propriétés hydrauliques et thermiques de l'aquifère. La réalisation de ces études permet ultimement d'évaluer l'acceptabilité des interactions potentielles entre le système géothermique aménagé et les autres usagers.

3.1.1 Évaluation des propriétés hydrauliques et thermiques de l'aquifère

Les propriétés hydrauliques et thermiques de l'aquifère sont des éléments qui permettent de dimensionner le système géothermique de manière à optimiser son efficacité selon les conditions environnantes rencontrées. Ces propriétés peuvent être déterminées de manière *in situ*, entre autres par des essais de pompages et par des tests de réponses thermiques (TRT). Il est important de mentionner que selon le type de système aménagé, ces essais peuvent être adaptés.

3.1.1.1 Essais hydrauliques

Les essais de pompage ou essais d'aquifère (pompage en un ou plusieurs paliers à débit constant, suivi de la remontée) permettent de déterminer des caractéristiques hydrauliques de l'aquifère, tels que le type d'aquifère, la transmissivité, le coefficient d'emmagasinement et ses frontières, en plus d'obtenir de l'information sur la performance et l'efficacité de l'installation de pompage (Chapuis, 2007). Pour l'installation d'un doublet géothermique, des essais de pompage peuvent être réalisés, dans le puits d'extraction et dans le ou les puits d'injections. L'essai réalisé dans le puits d'extraction a pour objectifs l'évaluation des caractéristiques de l'aquifère et de la zone d'influence du rabattement. De plus, la réalisation d'un essai dans le ou les puits d'injections permettrait d'évaluer la capacité d'injecter la quantité d'eau soutirée initialement dans l'aquifère.

La durée de l'essai peut varier selon son objectif. Toutefois, il est fortement recommandé de réaliser un essai jusqu'à l'obtention d'un régime quasi-permanent d'écoulement. L'obtention de cette condition permet de simplifier l'analyse de l'essai en plus de reproduire les conditions extrêmes pour la ressource en eau. Ce régime permanent peut être obtenu après un délai variant de plusieurs heures à plusieurs jours selon les caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère.

La méthodologie et les conventions pour la réalisation de tels essais sont décrites de manière exhaustive dans le Guide des essais de pompage et leurs interprétations, fourni par le MELCC (Chapuis, 2007).

3.1.1.2 Essais thermiques

Les TRT permettent d'évaluer la température du sol, la résistance thermique du puits et la conductivité thermique effective du site (Farabi-Asl, 2017). Ces essais consistent à extraire ou injecter de la chaleur à un taux constant par la circulation d'un fluide caloporteur à l'intérieur du puits géothermique. Les propriétés thermiques du sous-sol peuvent être déduites en reproduisant les températures observées à celles calculées avec des équations mathématiques permettant de décrire le comportement thermique de l'échangeur de chaleur et du milieu qui l'entoure. Les équations analytiques le plus couramment utilisées sont celles de la source de chaleur linéaire infinie ou finie (Raymond, 2018). Les unités utilisées pour la réalisation d'un TRT sur le terrain se composent typiquement d'une pompe, des valves de purge, d'un élément de chauffage électrique, des sondes de température, d'un débitmètre et d'un enregistreur de données. Cette unité peut varier en taille s'étendant à celle d'une valise à une remorque, selon la demande énergétique requise pour la réalisation de l'essai (Talabouma, 2013).

Avant la réalisation de l'essai, la température non perturbée du sous-sol peut être établie selon deux méthodes principales. L'une d'entre elles consiste à enregistrer le profil vertical de température à l'intérieur du puits géothermique. Une deuxième méthode consiste à injecter de l'eau dans l'échangeur de chaleur de l'unité et de mesurer sa température après 10 à 20 minutes (Gehlin et Nordell, 2003).

L'essai consiste ensuite à perturber la température naturelle du sous-sol par l'injection de chaleur. Le taux constant d'injection recommandé est de 50 à 80 W par mètre avec un intervalle d'enregistrement de la température et du débit au moins au 10 minutes. Il n'existe cependant aucune directive spécifique pour la durée de l'essai, mais il est proposé qu'il soit suffisamment long afin que la température atteigne un rayon d'influence d'un à deux mètres (Raymond et al., 2014). L'essai peut varier ainsi entre 30 et 60 heures dépendamment des conditions géologiques du site ainsi que du taux d'injection de chaleur considéré. De plus, cette durée peut être augmentée si l'essai comprend l'évaluation du rétablissement de la température à la suite de l'injection de chaleur (Raymond et al., 2011).

Les TRT sont couramment effectués pour les échangeurs de chaleur à boucle fermée et les PCP de grande taille. Toutefois, il n'existe pas de procédure standard pour la réalisation de ces essais pour les PCP. De plus, ces tests ne sont pas adaptés aux doublets géothermiques. Une solution alternative pour cette configuration serait de réaliser un essai de pompage avec injection d'eau réchauffée lorsque les systèmes requièrent des débits de prélèvement important (plus que 379 m³/j). Cependant, contrairement aux TRT pour les systèmes à boucle fermée, aucune directive ou norme n'existent pour encadrer la réalisation de ces essais. Les procédures de ces tests relèvent donc du jugement et de l'expertise du professionnel responsable du projet.

3.1.2 Simulation numérique et solutions analytiques

Les systèmes de PAC d'aquifère génèrent des changements thermiques dans l'eau souterraine qui, dans les zones fortement peuplées, peuvent affecter l'efficacité des installations voisines (Pophillat et al., 2020). Afin de faciliter la gestion spatiale du sous-sol lors de l'intégration de tels systèmes à boucle ouverte, des directives concernant des méthodes rapides et efficaces pour évaluer l'étendue de cet impact thermique sont requises (Pophillat et al., 2020). Lorsque les débits prélevés par le système géothermique sont **au-delà de 379 m³/j**, la réalisation de **simulations numériques** pour représenter les phénomènes d'écoulement et de transfert de chaleur est recommandée. D'autre part, lorsque le système requiert un prélèvement d'eau **entre 75 et 379 m³/j**, les impacts thermiques anticipés sont moindres et l'utilisation de **solutions analytiques** peut être envisagée, car ces analyses sont généralement plus rapides à réaliser.

3.1.2.1 Simulations numériques

Les simulations numériques sont considérées comme étant la méthode la plus appropriée pour simuler la réponse de l'exploitation géothermique dans des aquifères peu profonds, particulièrement dans les cas d'hétérogénéités hydrauliques, de variabilité thermique et de conditions transitoires complexes (Pophillat et al., 2020). Toutefois, la simulation numérique peut nécessiter beaucoup de temps à développer, car elle permet de prendre en considération plusieurs caractéristiques des conditions environnantes à l'étude. Les deux méthodes les plus utilisées pour la résolution de problèmes numériques sont les différences finies et les éléments finis. Ces méthodes permettent de représenter la géométrie du problème à l'aide d'une représentation tridimensionnelle (3D) dont le domaine est restreint aux limites par des conditions et des hypothèses.

La méthode des différences finies, implémentée entre autres dans le logiciel *MODFLOW* (*MODFLOW and Related Programs*, n.d.), génère des modèles dont la structure est représentée par des éléments rectangulaires (Figure 3.2). Cette solution est relativement simple à comprendre et à calculer et le logiciel *MODFLOW* comprend plusieurs extensions (*Waterloo Hydrogeologic*, 2016). Cependant, malgré le fait que les grilles sont simples à créer, ces modèles ne permettent pas de raffiner efficacement autour des zones d'intérêts, tels que des puits et des limites. De plus, une géologie complexe comprenant plusieurs couches discontinues est plus difficile à modéliser. Le modèle doit être représenté par des éléments continus sur tout le domaine, il est donc plus difficile de modéliser de plus petites formations (lentilles) comprises dans un grand corps (*Waterloo Hydrogeologic*, 2016). Il est à noter que le logiciel *MODFLOW* permet de bien représenter les phénomènes d'écoulement, mais nécessite une extension afin de modéliser les transferts de chaleurs. *SEAWAT* est, par exemple, un programme informatique basée sur *MODFLOW* permettant de simuler l'écoulement d'eau souterraine à densité variable couplé à un transport de chaleur (*USGS*, 2012).

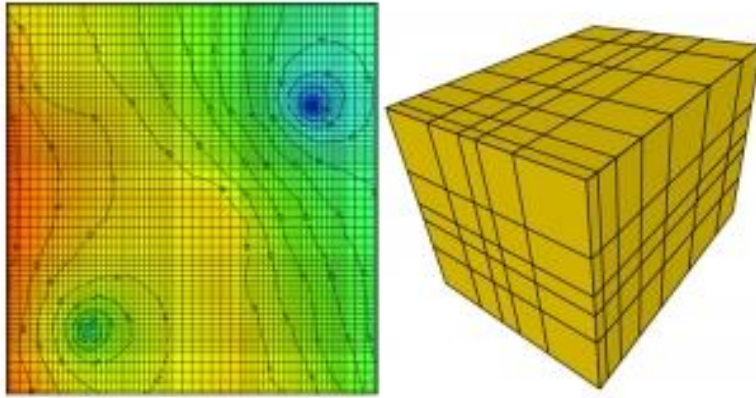


Figure 3.2: Représentation d'un modèle type réalisée à l'aide de la méthode des différences finies (Waterloo Hydrogeologic, 2016).

La méthode des éléments finis, implémentée entre autres dans le logiciel *FEFLOW* (Mike Powered by DHI, n.d.), crée des modèles dont le domaine est constitué d'éléments triangulaires (Figure 3.3). Cette solution permet de représenter plus efficacement les conditions autour des puits et des limites. Un maillage triangulaire est plus efficace pour modéliser des variations de stratigraphies et représenter des conditions anisotropes (Waterloo Hydrogeologic, 2016). Cependant, la méthode des éléments finis ne permet pas de garantir une conservation de masse hydrique locale. Elle peut générer des vitesses d'écoulement discontinues aux limites des éléments, ce qui peut rendre plus difficile la détermination de trajectoires (Waterloo Hydrogeologic, 2016). Pour sa part, *FEFLOW* est un logiciel capable de coupler les phénomènes d'écoulement et de transfert de chaleur.

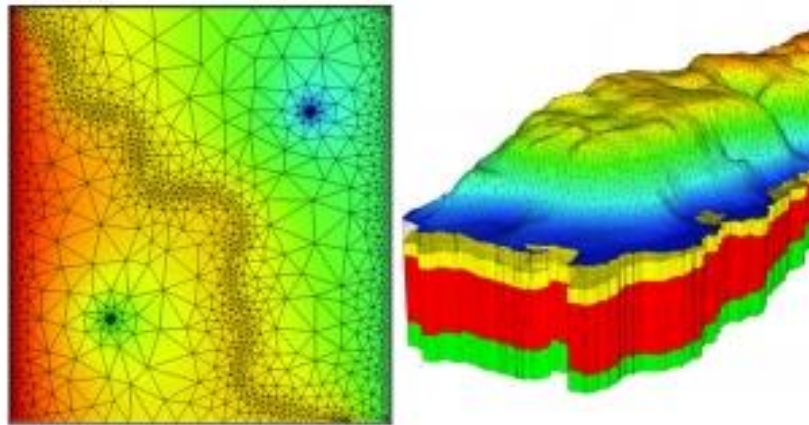


Figure 3.3: Représentation d'un modèle type réalisée à l'aide de la méthode des éléments finis (Waterloo Hydrogeologic, 2016).

Le Tableau 3.1, présenté ci-dessous, propose quelques logiciels permettant de réaliser une simulation de la propagation d'un panache thermique dans l'aquifère résultant de l'exploitation d'un système géothermique avec prélèvement d'eau souterraine.

Tableau 3.1: Liste de quelques logiciels servant à réaliser des simulations numériques pour caractériser les phénomènes d'écoulement et de transfert de chaleur des aquifères avec leur méthode de calcul respective.

Sources	Logiciels	Méthode de calcul	
		Éléments finis	Différences finies
<i>Mike Powered by DHI, n.d.</i>	<i>FEFLOW</i>	X	
<i>USGS, 2012</i>	<i>MODFLOW - SEAWAT</i>		X
<i>Aquanty, n.d.</i>	<i>HydroGeoSphere</i>	X	
<i>OpenGeoSys, 2020</i>	<i>OpenGeoSys</i>	X	
<i>COMSOL, n.d.</i>	<i>COMSOL</i>	X	
<i>TOUGH, 2021</i>	<i>TOUGH2</i>		X

3.1.2.2 Solutions analytiques

Les solutions analytiques couplant des équations d'écoulement et de transport de chaleur sont, pour leur part, relativement faciles d'utilisation (Pophillat et al., 2020). Cette méthode utilise des formules mathématiques exactes dont le calcul est relativement rapide. Elle repose toutefois sur des simplifications, des processus physiques simulés et de la géométrie du système. Un aperçu de quelques solutions analytiques accessibles pour les doublets géothermiques est présenté au Tableau 3.2.

Tableau 3.2: Solutions analytiques valides pour les systèmes géothermiques à boucle ouverte (Stauffer et al., 2013).

Sources	Type d'écoulement			Conduction thermique dans l'aquifère		Conduction thermique dans la couche confinée		Conduction aux limites	
	Linéaire	Radial	Arbitraire	Linéaire	Radial	Roche couverture	Roche-mère	Température variable	Échange de chaleur
Lauwerier, 1955	X					Infinie	Infinie		
Malofeev, 1960		X				Infinie	Infinie		
Avdonin, 1964	X			X		Infinie	Infinie		
Avdonin, 1964		X			X	Infinie	Infinie		
Guimerà et al., 2007		X			X				
Chen et Reddell, 1983		X			X	Infinie	Infinie		
Voigt et Haefner, 1987		X			X	Finie	Infinie	X	
Güven et al., 1983		X			X	Finie	Infinie		X
Shaw-Yang et Hund-Der, 2008		X				Finie	Finie		
Gringarten et Sauty 1975			X			Infinie	Infinie		

En effet, étant donné que les solutions analytiques sont développées pour répondre à des conditions spécifiques (aquifère confiné ou non confiné, écoulement transitoire, permanent, linéaire ou radial, type de géométrie de la source, etc.), une attention particulière doit être portée lorsqu'elles sont utilisées en dehors des conditions spécifiques des méthodes (Pophillat et al., 2020). Par exemple, les solutions présentées par Lauwerier (1955), Malofeev (1960), Shaw-Yang et Hund-Der (2008) et Gringarten et Sauty (1975) permettent de simuler la conduction de chaleur seulement dans les couches de confinement (Stauffer et al., 2013). La solution analytique présentée par Guimerà et al. (2007) permet quant à elle de considérer la conduction de chaleur dans un aquifère avec un écoulement radial au puits de pompage en négligeant l'écoulement régional, mais cette méthode ne permet pas de considérer la conduction de chaleur dans les couches de confinement (Pophillat et al., 2020; Stauffer et al., 2013). Une synthèse exhaustive et une description des conditions relatives à quelques-unes de ces solutions analytiques sont abordées en détail par Stauffer et al. (2013).

La solution analytique proposée par Schulz (1987) a été utilisée dans le cadre du projet *Aquifroid* pour représenter la distribution de la variation de température dans l'aquifère du site d'Estimauville (ville de Québec). Cette méthode est applicable pour un aquifère confiné et suppose un domaine horizontal infini et un contexte en régime permanent s'appuyant sur la loi de Darcy. Le modèle unidimensionnel (1D) que procure cette méthode permet de considérer l'écoulement de l'eau souterraine seulement dans un sens cartésien ou dans une direction radiale. Toutefois, son modèle bidimensionnel (2D) permet de prendre en considération de manière intégrée l'effet du fonctionnement de deux ou plusieurs puits et de l'écoulement naturel de l'eau souterraine sur la dispersion du panache thermique (Schulz, 1987). Aussi, la solution analytique de Guimerà et al. (2007) a été adoptée pour le développement d'un outil d'analyse permettant d'évaluer la faisabilité d'installation d'un doublet géothermique réalisé par *CanmetÉNERGIE* dans le cadre du projet *Aquifroid* (Ngansop Ngopjop, 2020).

3.2 Évaluation des impacts sur la qualité de l'eau souterraine

Cette section aborde les impacts potentiels sur l'intégrité de la qualité de l'eau souterraine, entre autres par un transport de contaminant et par les déséquilibres géochimiques et microbiologiques de l'aquifère. La qualité de l'eau souterraine peut être évaluée par l'échantillonnage d'eau souterraine. De plus, les réglementations et législations de certains pays ont établi des seuils de température d'injection permettant d'anticiper les déséquilibres géochimiques et microbiologiques éventuels de l'eau souterraine.

3.2.1 Échantillonnage d'eau souterraine

Les campagnes d'échantillonnage représentent une pratique courante lors de la réalisation d'une étude hydrogéologique. Le Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales (MELCC, 2021a) est composé de plusieurs cahiers dans lesquels sont décrites les bonnes pratiques à adopter pour la planification et la réalisation de l'échantillonnage afin d'assurer la qualité des échantillons et la validité des résultats (MELCC, 2021a). Le cahier 3 présente les étapes pour la réalisation du prélèvement des

échantillons d'eau souterraine et définit des lignes directrices pour les choix des méthodes employées selon les conditions du terrain et les objectifs de la campagne (MELCC, 2011). Avant l'installation d'un système géothermique qui nécessite un prélèvement d'eau souterraine, le profil général de la qualité de l'eau prélevée et l'anticipation du potentiel de risque de colmatage sont deux éléments importants à considérer. Il peut être particulièrement intéressant de réaliser un échantillonnage au moins à deux reprises, soit à l'état initial de l'étude et après une période de chauffage ou à la suite d'un essai d'injection de chaleur. La première analyse permettrait d'établir l'état initial de la qualité de l'eau souterraine alors que la deuxième analyse servirait à vérifier les effets de l'altération thermique sur la qualité de l'eau souterraine exploitée.

3.2.1.1 Évaluation de la présence de contaminants dans l'eau souterraine

En considérant que toute l'eau extraite doit être rejetée dans l'aquifère, la présence de contaminant potentiel dans l'eau souterraine doit être déterminée afin d'éviter que le système contribue à la propagation de contaminants. Cela consiste à comparer la concentration mesurée de contaminants potentiels aux critères listés dans l'annexe 1 du RQEP pour les contaminants microbiologiques et les substances inorganiques. La concentration des substances organiques peut aussi être déterminée si le site à l'étude ou les terrains voisins sont des sites contaminés ou potentiellement contaminés par des activités à risque (ex. : agricole, industrielle, etc.). Ces éléments à analyser sont alors sélectionnés à la discrétion du professionnel à la suite d'une étude du contexte environnant.

3.2.1.2 Évaluation de la tendance corrosive et entartrante de l'eau souterraine

L'évaluation de la tendance corrosive et entartrante de l'eau souterraine pour les systèmes géothermiques peut être évaluée de manière conventionnelle, soit par la détermination des indices de Ryznar (Ryznar, 1944), de Langelier (Langelier, 1936) et de Puckorius (Puckorius et Brooke, 1991). Selon ces indices, la tendance d'entartrage d'une eau peut être évaluée par deux principaux indicateurs, soit la dureté et l'alcalinité par le biais d'une évaluation de la concentration en CaCO_3 de l'eau souterraine. De plus, l'évaluation du pH permet d'obtenir de l'information sur l'alcalinité de l'eau (Rafferty, 1999). Ainsi, afin d'évaluer le caractère général (entartrant ou corrosif) de l'eau souterraine, il est nécessaire de connaître le total des solides dissous (TDS), le pH, la température, la dureté et l'alcalinité (Rafferty, 1999). De plus, la tendance corrosive d'une eau au contact d'un acier doux (acier au carbone) peut être déterminée grâce à l'indice de Larson-Skold qui s'appuie sur une évaluation de la concentration en chlore (Cl^-), en sulfate (SO_4^{2-}) et en bicarbonate (HCO_3^-) dans l'eau souterraine (Alvarado, 2020; Larson et Skold, 1958)

3.2.1.3 Évaluation du potentiel de colmatage

Comme il a déjà été mentionné, un colmatage rapide des puits du système peut être causé par des réactions redox induites par un effet de mélange d'eau souterraine (Burté et al., 2019; Possemiers et al., 2014). Le colmatage peut s'exacerber par les activités microbiennes, agissantes sur les surfaces accumulées d'oxyde hydraté (Burté et al., 2019). Toutefois, l'évaluation du taux de Fe et de Mn dissous est particulièrement importante afin d'anticiper la présence de précipité. De plus, la détermination de la présence de bactéries

de fer et du cycle du soufre dans l'eau souterraine permet d'anticiper des problèmes de colmatage biologique lors de l'exploitation du système.

3.2.1.4 Résumé des analyses à réaliser

Le Tableau 3.3 comprend un résumé des éléments physico-chimiques, chimiques et bactériologiques ainsi que de la charge particulaire de l'eau qui devraient être pris en considération selon Burté (2018) afin d'évaluer convenablement les risques de colmatage du système géothermique.

Tableau 3.3: Paramètres physico-chimiques, chimiques, bactériologiques et de la charge particulaire à évaluer dans l'eau souterraine afin d'assurer la pérennité du système géothermique (Burté, 2018).

Paramètres		
Physico-chimique		Température, pH, Eh (potentiel redox), Oxygène dissous, Conductivité
Charge particulaire		Matière en suspension (MES), Distribution granulométrique des particules
Chimique	Anions et cations majeurs	Ca, Mg, K, Na, Cl, SO ₄ , HCO ₃ , CO ₃ , NO ₃
	Éléments traces	CO ₂ dissous, NO ₂ , NH ₄ , PO ₄ , SiO ₂ , F, Al, Br, As, Sr, Ba, Cu, Zn, Pb, I, Ni, Fe dissous (Fe ²⁺), Fe total, Mn dissous (Mn ²⁺), Mn total, H ₂ S
	Organiques	Carbone organique dissous et total, hydrocarbure total, COHV
Bactériologique	Bactérie de fer	FeOB (bactérie ferro-oxydante)
	Bactérie du cycle du soufre	BTR (bactérie thiosulfato-réductrice), BSR (bactérie sulfato-réductrice), BOS (bactérie oxydant l'H ₂ S)

3.2.2 Seuils de température

Le changement contrôlé de la température est considéré comme un élément clé pour une utilisation de l'énergie thermique de l'eau souterraine de manière à respecter l'environnement (Haehnlein et al., 2010). Plusieurs revues de la littérature ont été réalisées afin de répertorier l'ensemble des seuils établis dans le monde permettant de mieux encadrer l'utilisation de PAC géothermique. Il s'avère que, contrairement aux distances minimales de séparation, il existe une certaine concordance entre les seuils de température proposés par les différentes recommandations et réglementations adoptées dans le monde. La Figure 3.4 illustre différentes valeurs de seuils réglementés au niveau national pour les températures de l'eau souterraine réinjectée par les PAC d'aquifère (doublet géothermique, PCP; Hähnlein, 2013). Selon une revue des seuils de température de l'eau souterraine, réalisée pour environ 40 pays, les valeurs minimales et maximales les plus couramment utilisées pour le chauffage et la climatisation sont de 5 et 25 °C respectivement (Hähnlein,

2013). De plus, selon cette même revue, les variations de température acceptables sont de 3 °C en Suisse et 11 °C en France (Hähnlein, 2013).

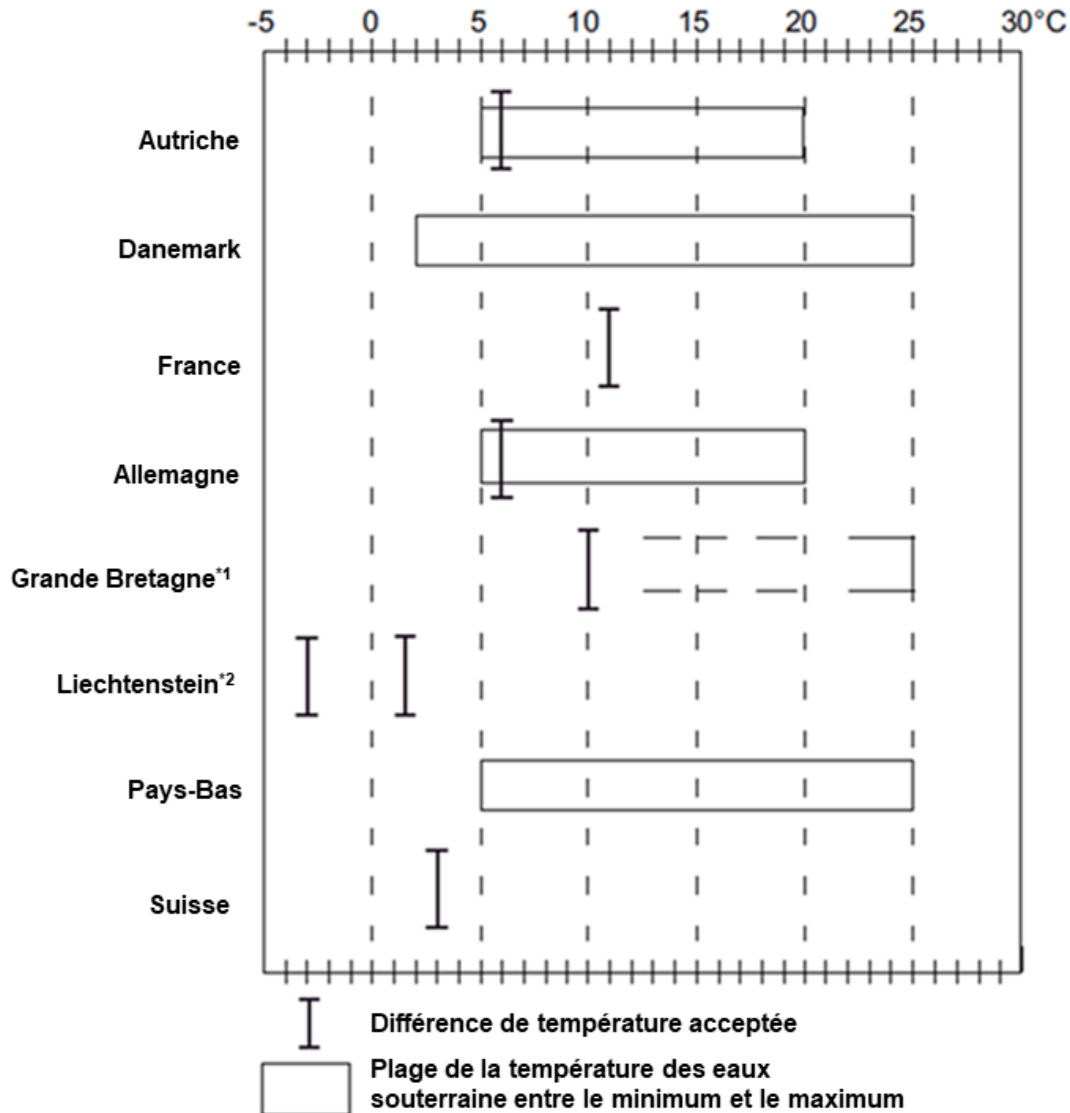


Figure 3.4: Compilation des seuils de température d'eau souterraine réglementés pour l'utilisation de doublets géothermiques.*¹ : La Grande-Bretagne ne présente pas de seuil de température d'eau souterraine minimale.*² : La valeur négative de différence de température acceptée au Liechtenstein indique qu'un seuil différent s'applique pour le refroidissement ($\Delta T \approx 3$ °C) et pour le chauffage ($\Delta T \approx 1.5$ °C) (adaptée de Hähnlein, 2013).

Selon les résultats des études présentées par Bonte (2013), la majorité des processus hydrochimiques inorganiques vont jouer un rôle significatif lorsque la température de l'eau souterraine est supérieure à 30 °C. Afin de contrer les déséquilibres géochimiques provoqués par les hausses de température trop élevées, **il peut être recommandé de respecter une température de réinjection maximale de 25 °C et une différence**

maximale de $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ entre l'eau extraite et l'eau réinjectée. Cependant, ces seuils ne doivent pas être considérés comme étant une valeur absolue mais plutôt comme étant des critères flexibles. Les seuils de température devraient être établis selon une décision de cas par cas, puisque les déséquilibres dans l'aquifère dépendent fortement des conditions géologiques et géochimiques environnantes. **Ainsi, les seuils de température devraient s'appuyer sur des études d'impacts plutôt que sur des valeurs établies arbitrairement.**

Toutefois, au Québec, bien que cela dépende du type de bâtiment, les hausses de température de l'eau souterraine sont généralement moins importantes puisque la période de chauffage est plus longue que celle de climatisation, ce qui entraîne une plus grande extraction de chaleur que d'injection (Comeau et Raymond, 2018). De plus, en considérant le climat du Québec, une limite de température de réinjection établie à $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ne permet pas de chauffer des bâtiments adéquatement lors de la période hivernale. Une étude réalisée à Varenne (Québec) démontre qu'il existe, certes, un impact de la température sur la concentration de calcium mais celle-ci reste faible et limitée sur l'environnement immédiat (Cercllet et al., 2020). **Cette étude démontre qu'une température de réinjection en période de chauffage entre 0 et $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ n'engendre pas de déséquilibres géochimiques considérables dans l'aquifère exploité (Cercllet et al., 2020).**

3.3 Évaluation de la durabilité du système

Un système géothermique présentant une capacité de production sur une longue période (> 30 ans) est considéré durable (Hähnlein, 2013). Cependant, les changements de température de l'eau souterraine induits par l'exploitation de tels systèmes sont inévitables (Hähnlein, 2013). Les doublets géothermiques et les PCP sont donc plus vulnérables aux problèmes de colmatage comparativement aux puits de pompage utilisés pour le captage d'eau potable. Les puits d'injection sont plus susceptibles d'engendrer des déséquilibres géochimiques et biogéochimiques favorisant la formation de précipité et/ou de biofilms (voir section 2). Ainsi, l'installation d'un système de surveillance, entre autres par un échantillonnage périodique de l'eau souterraine et par le respect de seuils de température, assure une utilisation durable de l'eau souterraine et contribue à empêcher les impacts négatifs sur l'environnement (Wu et al., 2015). La description dans l'étude hydrogéologique des mesures de suivi, d'entretien, de surveillance et de contrôle permettra aussi de répondre aux exigences de l'article 18 du REAFIE.

3.3.1 La surveillance du système géothermique

L'objectif principal de la surveillance du système géothermique est d'anticiper et de cibler le développement d'encrassement ou de colmatage, sans nécessiter l'arrêt du fonctionnement de la PAC (Gjengedal et al., 2020).

3.3.1.1 Les paramètres hydrodynamiques

Les éléments à considérer, que ce soit pour les puits de pompage ou d'injection, sont: le débit, la température, le niveau d'eau et le volume d'eau prélevé et réinjecté. L'installation d'une série de capteurs permet d'enregistrer ces paramètres de manière continue (Burté, 2018) :

- Débitmètres
- Capteurs volumétriques
- Capteurs de pression/niveau d'eau
- Capteurs de température

Les capteurs de température permettent d'évaluer la performance de l'échangeur de chaleur (Gjengedal et al. 2020). Ils contribuent ainsi à assurer un rendement énergétique optimal tout en assurant que les variations de température n'excèdent pas les limites recommandées par les fabricants de PAC. Ces capteurs peuvent aussi servir à assurer que les seuils de température recommandés pour limiter les déséquilibres géochimiques potentiels ne sont pas excédés. De plus, les capteurs de pressions permettent d'évaluer la performance du système de puits (Gjengedal et al., 2020). Une augmentation de la pression dans le système peut signaler, entre autres, un problème de colmatage qui s'amorce. Ainsi, l'interprétation des données récoltées par ces capteurs permet de diagnostiquer l'origine des problèmes, de prévoir le débordement des puits d'injection ou la mise en pression du rejet et finalement de mieux planifier les opérations de maintenance (Burté, 2018). De plus, il peut être envisagé d'installer des capteurs de température et de pression à l'intérieur de puits d'observation pour distinguer les variations engendrées par le système de celles présentes dans l'aquifère local (Gjengedal et al., 2020). Le positionnement des différents types de capteurs proposés par Burté (2018) est schématisé sur la Figure 3.5.

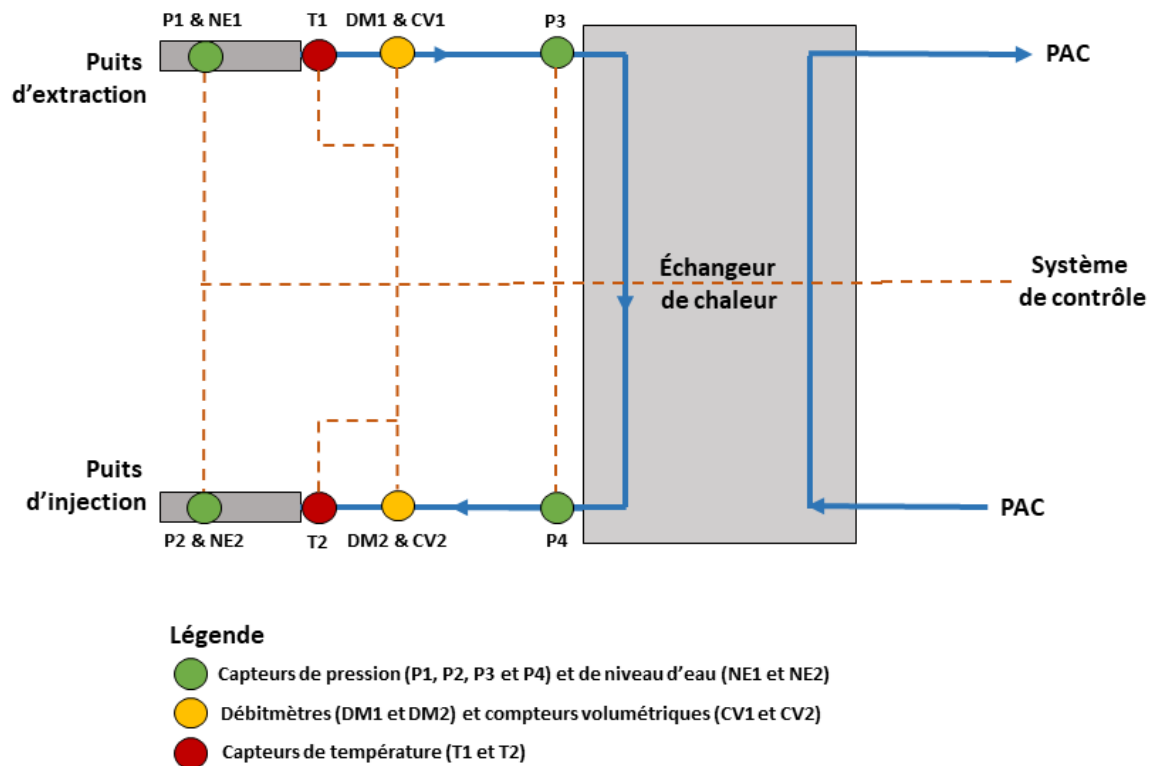


Figure 3.5: Schéma simplifié d'un doublet géothermique indiquant le positionnement des différents capteurs mentionnés par Burté (2018) afin d'assurer un suivi des paramètres hydrodynamiques (adaptée de Gjengedal et al., 2020).

3.3.1.2 Les paramètres chimiques et physico-chimiques

Un échantillonnage périodique de l'eau pompée et dans des puits d'observation permet d'évaluer la stabilité des paramètres chimiques de l'eau souterraine afin d'anticiper un déséquilibre favorisant les processus de colmatage (Burté, 2018). Il est suggéré par Burté (2018) et Possemiers et al. (2014) de réaliser un échantillonnage d'eau souterraine minimalement deux fois par année. Il est important de mentionner que la fréquence d'échantillonnage peut varier d'un cas à l'autre puisqu'elle dépend des conditions physico-chimiques, chimiques et biologiques initiales de l'aquifère. Il est intéressant de mentionner que l'installation de robinets sur les conduites du système géothermique peut être envisagée lors de la conception afin de faciliter le suivi de la composition de l'eau souterraine. Selon Burté (2018), les éléments à prendre en considération lors des échantillonnages sont :

- Les éléments majeurs
- L'oxygène dissous
- Les sulfures totaux
- Le pH
- Le potentiel de redox (Eh)
- La température
- La conductivité
- La teneur en Fe et Mn total et dissous

3.3.2 L'entretien des puits géothermiques

L'entretien des puits du système géothermique peut être effectué à l'aide des méthodes généralement utilisées pour l'entretien des puits de pompage conventionnels. Les professionnels peuvent ainsi recourir, entre autres, aux méthodes de développement par surpompage ou par jet à l'air comprimé. La fréquence d'entretien va varier selon les conditions hydrogéologiques et chimiques du site. Elle peut donc être établie grâce à l'instauration d'un système de surveillance tel que mentionné dans la section précédente.

De manière générale au Québec, les systèmes géothermiques ne nécessitent aucun adjuvant chimique lors du processus d'extraction et d'entretien. Toutefois, pour les cas d'exception, l'ajout de produits dans l'eau souterraine est encadré par la loi afin d'éviter la détérioration de la ressource. Ainsi, un ajout de produit chimique devra être déclaré dans la demande d'autorisation et si accepté, il pourrait requérir une surveillance supplémentaire.

4. Conclusions

Les PAC géothermique présentent plusieurs avantages autant sur le plan technique, écologique, économique que social. La ressource géothermique figure parmi les grandes sources d'énergie renouvelable connues jusqu'à ce jour, soit la biomasse, l'énergie solaire, éolienne et hydraulique, contribuant toutes à la réduction d'émission de gaz à effet de serre. La popularité des PAC géothermique prend donc de l'expansion depuis les dernières décennies sur le territoire québécois. Il semble y avoir toutefois un manque de connaissances quant à la nature des impacts potentiels sur les installations voisines, sur l'environnement et son écosystème lors de l'opération à long terme de tels systèmes

(Hähnlein, 2013). Il s'avère que contrairement aux puits de pompage utilisés pour la consommation d'eau (ex. : irrigation, eau potable, procédés) les prélèvements d'eau à des fins géothermiques ont peu d'impact sur la quantité d'eau souterraine disponible, car celle-ci est réinjectée dans l'aquifère. Cependant, la conception de systèmes géothermiques à boucle ouverte (doublet géothermique, PCP) doit considérer les effets qu'engendre une éventuelle altération thermique de l'aquifère. Ce rapport permet, dans un premier temps, de brosser un portrait de l'ensemble des impacts potentiels associés à l'exploitation des PAC géothermique soumis aux réglementations encadrant le prélèvement d'eau souterraine. Les connaissances scientifiques et techniques permettent finalement de cibler les éléments spécifiques à considérer lors de la réalisation d'une étude hydrogéologique, exigée lors d'une demande d'autorisation ministérielle pour un prélèvement d'eau à des fins géothermiques.

Il n'est pas recommandé de définir des réglementations qui reposent exclusivement sur des critères absolus puisque les conditions hydrogéologiques et géologiques peuvent différer localement. Cela signifie que les seuils adoptés par la réglementation devraient être flexibles et auraient donc la possibilité d'être ajustés en fonction des suivis réalisés, entre autres, sur les conditions thermiques, chimiques, physico-chimiques et biologiques des aquifères exploités par les systèmes géothermiques (Hähnlein, 2013). Ainsi, afin d'acquérir davantage de connaissances sur leurs effets en plus de favoriser le développement d'outils d'analyse adaptés, les études hydrogéologiques devraient comprendre l'élaboration d'un programme de suivi et d'entretien pour les prélèvements d'eau à des fins géothermiques.

Finalement, l'interaction entre systèmes géothermiques peut avoir pour effet d'amplifier la propagation d'un panache thermique dans l'aquifère selon les conditions hydrogéologiques et géologiques du secteur. Puisque les effets potentiels engendrés par cette altération thermique sont peu documentés dans la littérature lors d'une exploitation à long terme, un recensement des localisations des installations géothermiques comprises sur le territoire québécois permettrait aux concepteurs de mieux anticiper le potentiel d'interaction entre les installations actuelles et futures. L'amélioration de la disponibilité des données de compilation et de localisation des installations géothermiques permettrait une meilleure évaluation des interactions entre les systèmes ainsi qu'une meilleure évaluation de leurs effets potentiels sur l'environnement et les usagers de la ressource.

5. Remerciements

Le support du Conseil de recherche en sciences naturelles et génie via le programme de Soutien à l'avancement de la recherche sur les changements climatiques au Canada a offert le financement nécessaire pour compléter ce rapport avec la collaboration du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. La contribution de Monsieur Philippe Pasquier, professeur à l'École Polytechnique de Montréal, qui a révisé ce rapport et offert des commentaires pour améliorer son contenu est également soulignée.

6. Références bibliographiques

- Abesser, C. 2007. Open-Loop Ground Source Heat Pumps and the Groundwater Systems: A Literature Review of Current Applications, Regulations and Problems. OR/10/045. British Geological Survey Open report. <http://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/11706>
- Alvarado, E. J. 2020. Geothermal Energy of Active Mines in Northern Regions: The Éléonore Mine Case-Study. Mémoire. Québec, Maîtrise en science de la Terre, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, 162 p. <http://espace.inrs.ca/id/eprint/10409>
- Aquanty. n.d. HydroGeoSphere - Integrated Hydrologic Models. Consulté le 19 juillet 2021. <https://www.aquanty.com/hydrogeosphere>
- Avdonin, N. A. 1964. Some Formulas for Calculating the Temperature Field of a Stratum Subject to Thermal Injection. *Neft'i Gaz* 7 (3): 37–43.
- Bonte, M. 2013. Impacts of Shallow Geothermal Energy on Groundwater Quality: A Hydrochemical and Geomicrobial Study of the Effects of Ground Source Heat Pumps and Aquifer Thermal Energy Storage. Amsterdam : Vrije Universiteit, 178 p.
- Burté, L., C. A. Cravotta, L. Bethencourt, J. Farasin, M. Pédro, A. Dufresne, M.-F. Gérard, C. Baranger, T. Le Borgne et L. Aquilina. 2019. Kinetic Study on Clogging of a Geothermal Pumping Well Triggered by Mixing-Induced Biogeochemical Reactions. *Environmental Science & Technology* 53 (10): 5848–57. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b00453>
- Burté, L., J. Raymond, O. Atteia, O. Bour, C. Baranger et F. Sabatier. 2018. Étude des risques de colmatage et optimisation des processus de traitement des doublets géothermiques superficiels. Rennes: Université Bretagne Loire, 233 p.
- CCÉG (Coalition canadienne de l'énergie géothermique). 2012. État de l'industrie Canadienne de La Géothermie 2011 - Analyse Du Marché et Enquête de l'industrie. 41.
- Cerclet, L., Courcelles, B. et Pasquier., P. 2020. Impact of Standing Column Well Operation on Carbonate Scaling. *Water* 12 (8): 2222. <https://doi.org/10.3390/w12082222>
- Chapuis, R. P. 2007. Guide Des Essais de Pompage et Leurs Interprétations. *Gouvernement Du Québec*, no. chapitre 1-4: 57.
- Chen, C.-S. et D. L. Reddell. 1983. Temperature Distribution around a Well during Thermal Injection and a Graphical Technique for Evaluating Aquifer Thermal Properties. *Water Resources Research* 19 (2): 351–63. <https://doi.org/10.1029/WR019i002p00351>
- Comeau, F.-A. et J. Raymond. 2018. Revue de la littérature sur les règlements et les normes relatifs aux systèmes de pompes à chaleur géothermique face à la protection des prélèvements d'eau. Institut national de la recherche scientifique - Centre Eau Terre Environnement. <https://bit.ly/3FiRrJ3>
- COMSOL. n.d. COMSOL: Multiphysics Software for Optimizing Designs. Consulté le 19 juillet 2021. <https://bit.ly/3snE3Qo>
- Croteau, J. É. 2011. Évaluation des paramètres influençant les températures d'opération des puits à colonne permanente. Thèse de maîtrise. École Polytechnique de Montréal. <https://publications.polymtl.ca/700/>

- Daikin Applied. 2021. Water Source Heat Pumps | Geothermal Heat Pumps. Daikin Applied. Consulté en juillet 2021. <https://bit.ly/3ErIz2N>
- Farabi-Asl, H. 2017. Development and Evaluation of Semi-Open Loop Ground Source Heat Pump Systems. Thèse de doctorat, Graduate School of Engineering and Resource Science- Akita University. <https://bit.ly/3J6aZTl>
- Farabi-Asl, H., H. Fujii et H. Kosukegawa. 2018. Cooling Tests, Numerical Modeling and Economic Analysis of Semi-Open Loop Ground Source Heat Pump System. *Geothermics* 71 (January): 34–45. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2017.08.005>
- Gehlin, S. E.A. et B. Nordell. 2003. Determining Undisturbed Ground Temperature for Thermal Response Test. *ASHRAE Transactions* 109: 151–56.
- Gjengedal, S., R. K. Ramstad, B. O. Hilmo et B. S. Frengstad. 2020. Fouling and Clogging Surveillance in Open Loop GSHP Systems: A Systematic Procedure for Fouling and Clogging Detection in the Whole Groundwater Circuit. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 79 (1): 69–82. <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01556-5>
- Gringarten, A. C. et J. P. Sauty. 1975. A Theoretical Study of Heat Extraction from Aquifers with Uniform Regional Flow. *Journal of Geophysical Research* 80 (35): 4956–62. <https://doi.org/10.1029/JB080i035p04956>
- Guimerà, J., F. Ortuño, E. Ruiz, A. Delos et A. Pérez-Paricio. 2007. Influence of Ground-Source Heat Pumps on Groundwater. *Conference Proceeding, European Geothermal Congress, Unterhaching, Germany, 30 May-1 June 2007*, , 8.
- Güven, O., J. G. Melville et F. J. Molz. 1983. An Analysis of the Effect of Surface Heat Exchange on the Thermal Behavior of an Idealized Aquifer Thermal Energy Storage System. *Water Resources Research* 19 (3): 860–64. <https://doi.org/10.1029/WR019i003p00860>
- Haehnlein, S., P. Bayer et P. Blum. 2010. International Legal Status of the Use of Shallow Geothermal Energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (9): 2611–25. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.069>
- Hähnlein, S. 2013. Sustainability and Policy for the Thermal Use of Shallow Geothermal Energy. *Energy Policy*, 12. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.04.040>
- Halkos, G. E. et E.-C. Gkampoura. 2020. Reviewing Usage, Potentials, and Limitations of Renewable Energy Sources. *Energies* 13 (11): 2906. <https://doi.org/10.3390/en13112906>
- Karytsas, S.C. et I.P. Chaldezios. 2017. Review of the Greek Legislative Framework for Ground Source Heat Pumps (GSHPs) and Suggestions for Its Improvement. *Procedia Environmental Sciences* 38: 704–12. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.152>
- Langelier, W. F. 1936. The Analytical Control of Anti-Corrosion Water Treatment. *American Water Works Association* 28 (10): 1500–1521. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1936.tb13785.x>
- Larson, T. E. et R. V. Skold. 1958. Laboratory Studies Relating Mineral Quality of Water To Corrosion of Steel and Cast Iron. *Corrosion* 14 (6): 43–46. <https://doi.org/10.5006/0010-9312-14.6.43>

- Lauwerier, H. A. 1955. The Transport of Heat in an Oil Layer Caused by the Injection of Hot Fluid. *Applied Scientific Research* 5 (2–3): 145–50. <https://doi.org/10.1007/BF03184614>
- Lund, J. W. et A. N. Toth. 2021. Direct Utilization of Geothermal Energy 2020 Worldwide Review. *Geothermics* 90 (February): 101915. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101915>
- Malofeev, G. E. 1960. Calculation of the Temperature Distribution in a Formation When Pumping Hot Fluid into a Well. *Neft I Gaz* 3 (7): 59–64.
- MELCC, (Ministère de l'Environnement et de Lutte contre les changements climatiques). 2011. Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales - Cahier 3 - échantillonnage des eaux souterraines. *Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec*, 76.
- MELCC, (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques). 2021a. Guide d'échantillonnage à Des Fins d'analyse Environnementale. <https://bit.ly/3mljBMh>
- . 2021b. La Gestion Des Prélèvements d'eau. <https://bit.ly/3mgL7dJ>
- . 2021c. Règlement Sur Le Prélèvement Des Eaux et Leur Protection. <https://bit.ly/3EbpQbn>
- . 2021d. Règlement Sur l'encadrement d'activités En Fonction de Leur Impact Sur l'environnement (REAFIE). <https://bit.ly/3H1iSYg>
- Mike Powered by DHI. n.d. FEFLOW. Consulté le 19 juillet 2021. <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/feflow>
- MODFLOW and Related Programs. n.d. Consulté le 19 juillet 2021. <https://on.doi.gov/32oKK9F>
- MTESS, (Ministère du Travail, de l'Emploi et de la Solidarité sociale). 2020. Règlement sur les activités dans des milieux humides, hydriques et sensibles. <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/ShowDoc/cr/Q-2,%20r.%200.1%20/>
- Ngansop Ngopjop, E. P. 2020. Évaluation Du Potentiel de Climatisation Des Bâtiments Par Aquifères. Montréal, Québec: Canmet Énergie et Institut national de la recherche scientifique.
- OpenGeoSys. 2020. OpenGeoSys : Open-Source Multi-Physics. Consulté le 19 juillet 2021. <https://www.opengeosys.org/>
- Orio, C. D, A. Chiasson, C. N. Johnson, Z. Deng, S. J. Rees et J. D. Spitler. 2005. A Survey of Standing Column Well Installations in North America. *ASHRAE Transactions*, 14.
- Pasquier, P., A. Nguyen, F. Eppner, D. Marcotte et P. Baudron. 2016. Standing Column Wells. In *Advances in Ground-Source Heat Pump Systems*, 269–94. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100311-4.00010-8>
- Pophillat, W., G. Attard, P. Bayer, J. Hecht-Méndez et P. Blum. 2020. Analytical Solutions for Predicting Thermal Plumes of Groundwater Heat Pump Systems. *Renewable Energy* 147 (March): 2696–2707. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.148>
- Possemiers, M., M. Huysmans et O. Batelaan. 2014. Influence of Aquifer Thermal Energy Storage on Groundwater Quality: A Review Illustrated by Seven Case Studies from Belgium. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 2 (November): 20–34. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2014.08.001>

- Puckorius, P. R. et J. M. Brooke. 1991. A New Practical Index for Calcium Carbonate Scale Prediction in Cooling Tower Systems. *Corrosion* 47 (4): 280–84. <https://doi.org/10.5006/1.3585256>
- Rafferty, K. 1999. Scaling in Geothermal Heat Pump Systems. *U.S. Department of Energy*, no. DE-FG07-90ID 13040: 63.
- Raymond, J. 2018. Colloquium 2016: Assessment of Subsurface Thermal Conductivity for Geothermal Applications. *Canadian Geotechnical Journal* 55 (9): 1209–29. <https://doi.org/10.1139/cgj-2017-0447>
- Raymond, J., L. Lamarche et M.-A. Blais. 2014. Quality Control Assessment of Vertical Ground Heat Exchangers. *ASHRAE Transactions* 120 (SE-14-014): 1.
- Raymond, J., R. Therrien, L. Gosselin et R. Lefebvre. 2011. A Review of Thermal Response Test Analysis Using Pumping Test Concepts. *Ground Water* 49 (6): 932–45. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2010.00791.x>
- Ryznar, J. W. 1944. A New Index for Determining Amount of Calcium Carbonate Scale Formed by a Water. *American Water Works Association* 36 (4): 472–83. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1944.tb20016.x>
- Schulz, R. 1987. Analytical Model Calculations for Heat Exchange in a Confined Aquifer. *Journal of Geophysics* 61 (1): 12–20. <https://geophysicsjournal.com/article/124>
- Shaw-Yang, Y. et Y. Hund-Der. 2008. An Analytical Solution for Modeling Thermal Energy Transfer in a Confined Aquifer System. *Hydrogeology Journal* 16 (8): 1507–15. <https://doi.org/10.1007/s10040-008-0327-9>
- Somogyi, V., V. Sebestyén et G. Nagy. 2017. Scientific Achievements and Regulation of Shallow Geothermal Systems in Six European Countries – A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 68 (February): 934–52. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.02.014>
- SQGI, (Société québécoise de géothermie industrielle). 2021. Société québécoise de géothermie industrielle. Consulté en juillet 2021. <https://www.sqgi.ca/g%C3%A9othermie>
- Stauffer, F., P. Bayer, P. Blum, N. M. Giraldo et W. Kinzelbach. 2013. Thermal Use of Shallow Groundwater. 0 ed. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b16239>
- Talabouma, T. A. 2013. Test de Réponse Thermique (TRT) Par Câbles Chauffants Dans Un Échangeur de Chaleur Géothermique à Expansion Directe (DX). Mémoire de maîtrise, Montréal: L'école de technologie supérieure - Université du Québec. https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/1238/1/TALABOULMA_Toufik_Amin.pdf
- TOUGH. 2021. TOUGH: Suite of Simulators for Nonisothermal Multiphase Flow and Transport in Fractured Porous Media. Consulté le 19 juillet 2021. <https://tough.lbl.gov/>
- Tsagarakis, K. P., L. Efthymiou, A. Michopoulos, A. Mavragani, A. S. Anđelković, F. Antolini, M. Bacic et al. 2020. A Review of the Legal Framework in Shallow Geothermal Energy in Selected European Countries: Need for Guidelines. *Renewable Energy* 147 (March): 2556–71. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.007>
- USGS, Science for a changing world. 2012. SEAWAT: A Computer Program for Simulation of Three-Dimensional Variable-Density Ground-Water Flow and Transport. Consulté le 19 juillet 2021. <https://on.doi.gov/3eaEF3r>

- Voigt, H. D. et F. Haefner. 1987. Heat Transfer in Aquifers with Finite Caprock Thickness during a Thermal Injection Process. *Water Resources Research* 23 (12): 2286–92. <https://doi.org/10.1029/WR023i012p02286>
- Water Energy Distributers. 2021. Comparison of Methods. *Water Energy Distributers* (blog). consulté en août 2021. <https://northeastgeo.com/comparison-of-methods/>
- Waterloo Hydrogeologic. 2016. Groundwater Modeling Numerical Methods: Which-One Should You Use? *Waterloo Hydrogeologic* (blog). Consulté en août 2021. <https://bit.ly/3snaU7K>
- Wu, Q., S. Xu, W. Zhou et J. LaMoreaux. 2015. Hydrogeology and Design of Groundwater Heat Pump Systems. *Environmental Earth Sciences* 73 (7): 3683–95. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3654-2>