

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

Rapport final

Par

Félix-Antoine Comeau
Jasmin Raymond

Soumis à la Direction de l'eau potable et des eaux souterraines
Ministère du Développement durable, de l'Environnement,
et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC)
14 juin 2018 – Québec

Institut national de la recherche scientifique - Centre Eau Terre Environnement
490 de la Couronne, Québec, Qc, G1K 9A9
Téléphone : 418-654-2652 ou 418-654-2559

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE	5
1. INTRODUCTION	7
1.1 Mise en contexte	7
1.2 Problématique	8
1.3 Objectif.....	9
1.4 Structure du rapport.....	9
1.5 Portée et limitations.....	10
1.6 Références	10
2. L'ÉNERGIE GÉOTHERMIQUE DE FAIBLE TEMPÉRATURE	11
2.1 Définition des systèmes géothermiques	12
2.2 Les systèmes géothermiques au Québec	14
2.3 Références	15
3. CADRE LÉGISLATIF ET RÉGLEMENTAIRE DU QUÉBEC	19
3.1 Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection (RPEP)	19
3.2 Loi sur la qualité de l'environnement (LQE).....	20
3.3 Politique de protection des rives, du littoral et de la plaine inondable (PPRLPI).....	20
4. REVUE DES RÉGLEMENTS DANS D'AUTRES JURIDICTIONS	21
4.1 Province de l'Ontario (Canada)	21
4.2 Province du Manitoba (Canada).....	22
4.3 Province de la Colombie-Britannique (Canada)	22
4.4 État du Massachusetts (États-Unis d'Amérique)	23
4.5 État du Colorado (États-Unis d'Amérique).....	24
4.6 Allemagne	24
4.7 Danemark	25
4.8 France	25
4.9 Italie.....	27
4.10 Royaume-Uni	28
4.11 Suède	28
4.12 Pays-Bas	29
5. REVUE DES NORMES TECHNIQUES.....	31
5.1 Canada.....	31
5.2 États-Unis d'Amérique.....	32
5.3 Allemagne	33

5.4	Italie.....	34
5.5	Royaume-Uni	34
5.6	Suède	35
5.7	Le projet ReGeoCities (Europe).....	36
5.8	Norme internationale.....	37
6.	REVUE DE LA LITTÉRATURE SCIENTIFIQUE	39
6.1	Système de PAC d’aquifère	40
6.2	Système de PAC couplée au sol.....	42
6.3	Système de PAC d’eau de surface	44
7.	SYNTHÈSE.....	45
7.1	Systèmes de PAC d’aquifère.....	46
7.2	Systèmes de PAC couplée au sol	51
7.3	Système de PAC d’eau de surface	55
8.	CONCLUSIONS	59
8.1	Travaux futurs	60
8.2	Références	61
9.	REMERCIEMENTS.....	63

SOMMAIRE

L'utilisation directe de l'énergie géothermique est en pleine expansion dans le monde. Cette croissance est principalement liée à l'augmentation de l'utilisation des pompes à chaleur (PAC) géothermique, reconnues comme une technologie pouvant être déployée dans tout type d'environnement géologique au bénéfice des utilisateurs qui réalisent des économies d'énergie. Cependant, les considérations en lien avec les méthodes de conception des différents systèmes géothermiques et aux règlements les encadrant n'ont pas évolué à la même vitesse. L'interaction de ces systèmes entre eux et avec l'eau souterraine demeure une préoccupation importante pour les législateurs.

C'est dans ce contexte que la Direction de l'eau potable et des eaux souterraines du Ministère du Développement durable, de l'Environnement, et de la Lutte contre les Changements climatiques du Québec (MDDELCC) désire connaître l'état des connaissances scientifiques et les différents cadres législatifs en lien avec les systèmes géothermiques et la protection de l'environnement. En effet, le *Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection* (RPEP), entré en vigueur en 2014, contient des exigences concernant la conception et l'aménagement d'un système géothermique qui doivent maintenant être évaluées en fonction du récent développement de l'industrie géothermique au Québec sur la base de l'évolution des connaissances scientifiques et techniques.

Pour ce faire, les principaux processus par lesquels les systèmes de pompes à chaleur géothermique peuvent avoir un effet sur l'environnement, les eaux souterraines et les eaux de surface ont été identifiés. Concrètement, une revue de l'encadrement appliqué par d'autres juridictions (trois provinces canadiennes, deux états américains et sept pays européens), des normes techniques (une canadienne, trois américaines, onze européennes et une internationale) de l'industrie et la littérature scientifique récente depuis 2010 (23 articles) a été réalisée.

Une synthèse des règlements, normes et articles scientifiques a été effectuée. Les résultats sont présentés selon trois thèmes distincts, soit l'intégrité des puits, les distances minimales à respecter et les seuils de température, pour les trois grands types de systèmes géothermiques qui sont les PAC d'aquifère, les PAC couplées au sol, ainsi que les PAC d'eau de surface. À cette fin, l'applicabilité des constats dans le contexte climatique, hydrogéologique et géothermique de basse température du Québec habité est expliquée et l'encadrement dans les autres juridictions est mis en perspective par rapport à celui du Québec. L'intégrité des puits géothermiques apparaît comme un aspect important à encadrer pour minimiser l'impact des systèmes géothermiques sur les ressources en eau souterraine.

1. INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte

En raison des problèmes environnementaux associés aux combustibles fossiles, les énergies renouvelables de plus en plus utilisées mènent vers une transition énergétique à laquelle s'intéressent les décideurs politiques. Les énergies renouvelables peuvent être utilisées à différentes fins, plus particulièrement pour le chauffage et la production d'électricité. Différents types d'énergie renouvelable existent, dont les plus utilisées actuellement sont l'hydroélectricité, l'énergie éolienne et l'énergie solaire.

La géothermie est une autre source d'énergie renouvelable qui est produite à partir de la chaleur emmagasinée dans la croûte terrestre provenant du centre de la Terre, dont la température atteint 6 000 °C. Sous la surface du sol, la température augmente avec la profondeur selon un gradient géothermique qui varie de 10 à 40 °C/km au Canada (Grasby et al., 2011). Ce phénomène a un impact sur le type de technologie utilisée pour exploiter cette énergie : avec ou sans pompes à chaleur (PAC) pour les ressources géothermiques superficielles ou profondes, respectivement.

À plus d'un kilomètre sous la surface du sol, la température du roc peut atteindre plus de 100 °C à certains endroits, appelés « points chauds », reliés à des zones de volcanisme. Des puits ayant jusqu'à 5 km de profondeur sont utilisés pour capter l'eau souterraine afin de produire de la chaleur à haute température, soit pour chauffer des bâtiments sans l'utilisation de PAC, soit pour générer de l'électricité. Cette technologie, appelée géothermie profonde, est actuellement implantée dans des pays où l'activité volcanique est à l'origine de réservoirs de haute température comme aux États-Unis, aux Philippines, en Indonésie et en Islande.

Des puits d'une centaine de mètres de profondeur équipés d'échangeurs de chaleur peuvent également être utilisés pour chauffer et climatiser des bâtiments en se servant de la chaleur relativement constante de l'eau souterraine et du sol tout au long de l'année. Ce type de système exploite les ressources géothermiques superficielles que l'on appelle « de basse température ». Une PAC géothermique est nécessaire à l'opération de ces systèmes. Plus de 75 000 de ces systèmes géothermiques sont installés au Canada (CCÉG, 2012).

L'utilisation directe de l'énergie géothermique est en pleine expansion dans le monde. En effet, selon les données recueillies à la fin de l'année 2014, la puissance géothermique installée a augmenté de 46,2 % par rapport à 2010 (Figure 1). Cette croissance est principalement liée à l'augmentation de l'utilisation des PAC géothermique, reconnues comme une technologie pouvant être déployée dans tout type d'environnement géologique au bénéfice des utilisateurs qui réalisent des économies d'énergie.

Cependant, les considérations liées aux méthodes de conception des différents systèmes géothermiques et aux règlements les encadrant n'ont pas évolué à la même vitesse. De plus, l'augmentation attendue du nombre d'installations de systèmes géothermiques dans le futur renforce davantage la nécessité d'un cadre réglementaire concerté. Ceci est crucial, car les systèmes géothermiques superficiels, une fois installés, peuvent être exploités pendant des décennies. Ainsi, l'interaction de ces systèmes entre eux et avec l'eau souterraine demeure une préoccupation majeure pour les législateurs (Dehkordi et Schincariol, 2014). De plus, les réglementations existantes dans différents pays ou états sont hétérogènes. La base scientifique, technologique ou pratique sous-jacente n'est pas toujours apparente et des motifs empiriques semblent parfois avoir influencé les décisions. C'est ainsi que par principe de précaution, il serait important de se conformer à des normes de durabilité bien définies afin de minimiser les impacts environnementaux qui pourraient y être associés. Une réglementation claire pourrait garantir une utilisation de

l'énergie géothermique respectueuse de l'environnement, en particulier en ce qui concerne la protection des ressources en eau souterraine et de surface.

Finalement, les acteurs, tendances et technologies actuelles et futures sont susceptibles de faire évoluer le domaine de la géothermie au Québec et mèneront vers la probabilité d'occurrence de nouvelles problématiques environnementales. Une connaissance de cette situation permettra au législateur de comprendre l'évolution du marché en cours. D'un point de vue commercial, de nouvelles structures opérationnelles apparaissent au Québec qui visent ouvertement à promouvoir l'installation de systèmes géothermiques en milieu urbain. D'un point de vue technique, une tendance future probable, est le couplage des systèmes ouverts et fermés conçus pour augmenter la production et la stabilité thermique à long terme des systèmes à boucle fermée. Par ailleurs, le potentiel des puits à colonne permanente (PCP) en milieu urbain est également intéressant et pourrait changer les conditions du marché et la fréquence d'installation de ces systèmes dits « à boucle ouverte ». Pour des installations en milieu rural, le risque que le propriétaire d'un puits d'approvisionnement en eau potable décide d'utiliser son infrastructure comme un puits à colonne permanente (comme c'est fréquemment le cas en Nouvelle-Angleterre), au risque de détériorer la qualité de son eau, doit être pris en compte.

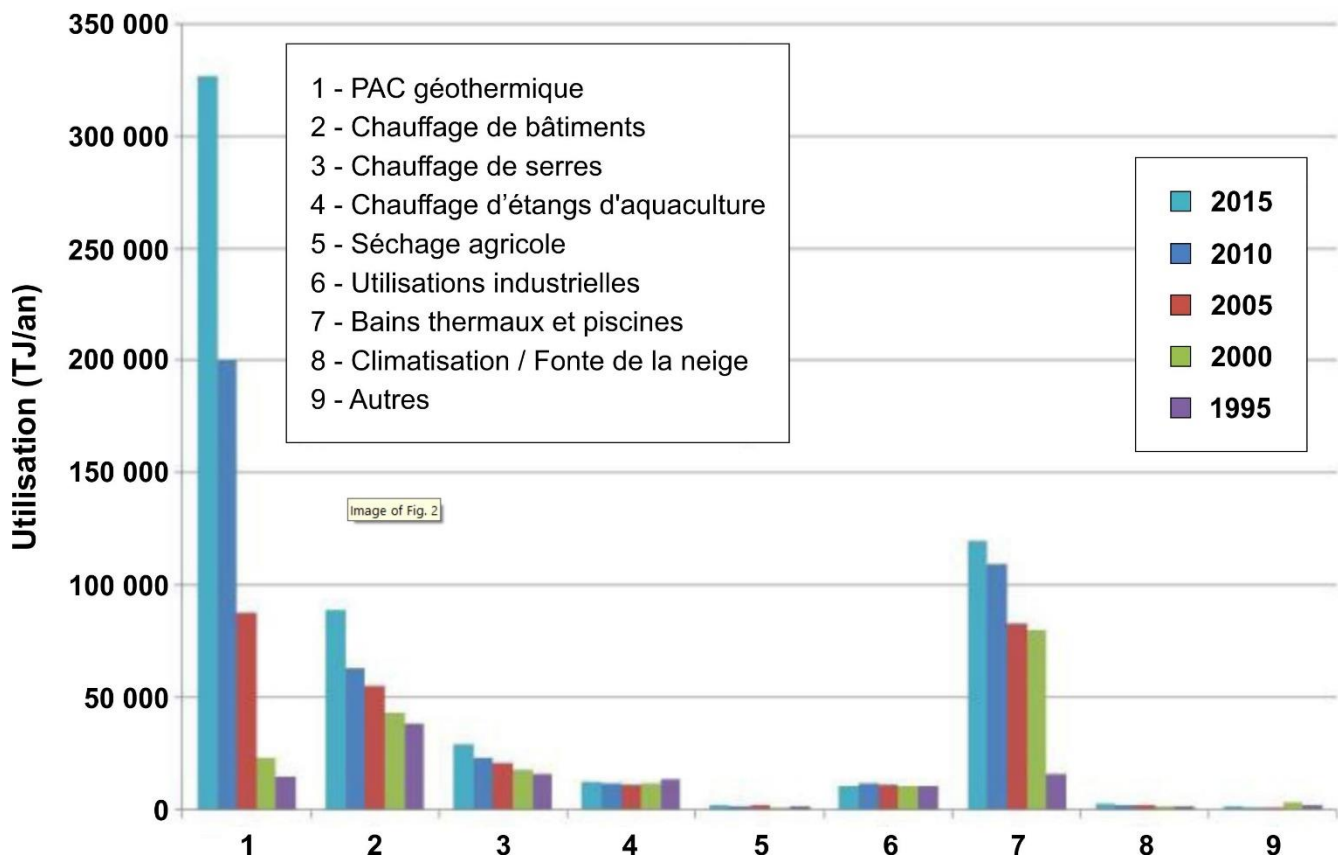


Figure 1. Comparaison de l'utilisation directe de l'énergie géothermique dans le monde entier en TJ/an pour les années 1995, 2000, 2005, 2010 et 2015 (adapté de Lund et Boyd, 2015).

1.2 Problématique

Le chapitre IV du *Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection (RPEP)*, entré en vigueur le 14 août 2014, contient des exigences concernant la conception et l'aménagement d'un système géother-

mique qui doivent maintenant être évaluées en fonction du récent développement de l'industrie géothermique au Québec sur la base de l'évolution des connaissances scientifiques et techniques applicables en cette matière.

Afin de compléter l'évaluation des normes du RPEP, la Direction de l'eau potable et des eaux souterraines du Ministère du Développement durable, de l'Environnement, et de la Lutte contre les Changements climatiques (MDDELCC) désire connaître l'état des connaissances scientifiques et les différents cadres législatifs en lien avec les systèmes géothermiques et la protection de l'environnement. Concrètement, cela consiste à établir une revue :

- 1) de l'encadrement appliqué par d'autres juridictions, soit dans d'autres provinces canadiennes ou états américains et dans d'autres pays;
- 2) des normes de l'industrie et;
- 3) de la littérature scientifique récente, notamment les revues scientifiques avec comité de lecture.

1.3 Objectif

Plus spécifiquement, l'objectif de la revue de littérature effectuée est de décrire et de discuter des sujets suivants :

- 1) Les principaux processus par lesquels les systèmes de PAC géothermique peuvent avoir un effet sur l'environnement, les eaux souterraines et les eaux de surface, par exemple la modification du régime thermique du sous-sol, l'infiltration de l'eau de surface le long des parois du forage ou le risque de contamination par les fluides caloporteurs en cas de bris.
- 2) Les exigences réglementaires et les pratiques d'aménagement des systèmes de PAC d'aquifère (qui prélèvent de l'eau souterraine), de PAC d'eau de surface et des PAC couplées au sol (à boucle fermée) pouvant avoir un effet sur les processus mentionnés en 1).

De plus, l'applicabilité des constats dans le contexte climatique, hydrogéologique et géothermique de basse température du Québec habité est expliquée et l'encadrement dans les autres juridictions est mis en perspective par rapport à celui du Québec.

1.4 Structure du rapport

Une revue des législations de trois provinces canadiennes (Ontario, Manitoba et Colombie-Britannique), de deux États américains (Massachusetts et Colorado), ainsi que de sept pays européens (Allemagne, Danemark, France, Italie, Pays-Bas, Royaume-Uni et Suède) a été réalisée.

De plus, une compilation des normes techniques réalisée par différentes organisations et juridictions est présentée. Également, une revue de la littérature scientifique concernant les aspects légaux et environnementaux liés à l'utilisation des différents systèmes géothermiques a été réalisée.

Les références ont été placées à la fin de chaque chapitre et des commentaires en italique accompagnent les références afin de résumer brièvement leur contenu.

Finalement, une synthèse des règlements, normes et articles scientifiques a été réalisée et est présentée selon thèmes suivants, pour les différents types de systèmes géothermiques (PAC d'aquifère, PAC couplée au sol, ainsi que PAC d'eau de surface) :

- Intégrité du puits
- Distances minimales

- Seuils de température

1.5 Portée et limitations

La comparaison des différentes législations ne peut être faite directement, car le cadre légal diffère d'une juridiction à l'autre. Cette comparaison a donc certaines limitations, pour les raisons suivantes :

- ces législations sont énoncées à l'intérieur de lois, de règlements, de guides de bonnes pratiques ou de normes techniques. Le caractère obligatoire ou non varie d'une juridiction à l'autre;
- les sujets réglementés au chapitre IV du RPEP ne sont pas nécessairement rassemblés dans un même règlement dans les autres juridictions. Bien que des efforts raisonnables aient été déployés, il n'a pas été possible dans le cas de toutes les législations de retracer chacune des normes concernant les thèmes traités dans le chapitre IV du RPEP, lorsqu'elles ne se trouvent pas dans un même règlement ou une même loi;
- la complexité de l'énoncé réglementaire, par exemple les interactions avec d'autres règlements ou lois, rend parfois difficiles une pleine compréhension et la portée des législations étudiées;
- les législations sont présentées dans la langue officielle de la juridiction, ce qui engendre une complexité supplémentaire lors de l'étude de certains pays européens (p. ex. Allemagne, Danemark, Italie, Pays-Bas et Suède).

Afin de produire un rapport synthétique, un jugement professionnel a été exercé pour l'élaboration de cette revue, ainsi que pour la synthèse qui en découle. De plus, il y a peu d'articles scientifiques récents portant sur l'installation, l'entretien et le démantèlement des puits géothermiques. Ainsi, les références consultées en ce sens sont principalement techniques, c'est-à-dire soit des normes ou des guides de bonnes pratiques.

1.6 Références

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 p. http://www.geo-exchange.ca/fr/UserAttachments/article82_Final%20Stats%20Report%202011%20-%20February%206,%202012_F.pdf

- *Fait état du marché de l'industrie canadienne des systèmes résidentiels de PAC géothermique pour les années 2008, 2009 et 2010, et ce pour chacune des provinces canadiennes.*

Dehkordi, S.E. et Schincariol, R.A., 2014. Guidelines and the design approach for vertical geothermal heat pump systems: current status and perspective. *Revue canadienne de géotechnique* 51(6): 647-662. <https://doi.org/10.1139/cgj-2012-0205>

- *Vise à améliorer la situation actuelle en matière de réglementation et de conception au Canada en la plaçant dans une perspective internationale afin de sensibiliser davantage les autorités canadiennes et les professionnels associés.*

Lund, J.W. et Boyd, T.L., 2016. Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. *Geothermics* 60: 66-93. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.11.004>

- *Présente une revue des applications mondiales de l'utilisation directe de l'énergie géothermique.*

2. L'ÉNERGIE GÉOTHERMIQUE DE FAIBLE TEMPÉRATURE

Dans le contexte québécois, les systèmes géothermiques superficiels dits de basse température opèrent à une température du sous-sol généralement inférieure à 12 °C et sont utilisés pour le chauffage et la climatisation d'infrastructures diverses. Ainsi, la plage de température d'opération relativement basse permet à de tels systèmes d'être utilisés dans le monde entier. Ces systèmes s'appuient sur le principe d'inertie thermique puisque la température du sous-sol demeure presque constante en profondeur tout au long de l'année. Les fluctuations de la température du sous-sol diminuent avec la profondeur (Banks 2012) en raison de la forte inertie thermique du sol, du décalage entre les variations de température à la surface et du sous-sol (Florides et Kalogirou, 2007), ainsi que du flux de chaleur terrestre. Les variations saisonnières de la température diminuent drastiquement en dessous d'une profondeur d'environ 10 m selon Anderson (2005) et Ouzzane et al. (2015), que l'on appelle alors « *température du sol non perturbée* ». Cette dernière varie d'une région à l'autre, car elle dépend des propriétés thermiques du sous-sol, variant de 8 m pour les environnements légers (masse volumique faible) et secs à 20 m pour ceux denses (masse volumique élevée) et humides (Popiel et al., 2001). La température du sous-sol au-dessus de cette profondeur est également affectée par la couverture de neige, de végétation au sol ou le développement urbain (Zhang 2005; Ferguson et Woodbury 2007) et les conditions météorologiques (Florides et Kalogirou 2007; Badache et al., 2016). Comme en été (ou en hiver) la température du sous-sol est, respectivement, inférieure (ou supérieure) à la température de l'air, la chaleur du sous-sol peut être utilisée pour refroidir (ou chauffer) les bâtiments. Le cycle thermodynamique de la PAC géothermique est mis à profit afin de transférer la chaleur entre le sous-sol et le bâtiment (Figure 2). Une source d'énergie, généralement de l'électricité, est nécessaire pour la mise en fonction du compresseur, qui active le cycle de la PAC. Il en résulte des économies d'énergie de l'ordre de 60 à 70 % en mode chauffage et de 30 à 40 % en mode climatisation comparativement aux autres alternatives énergétiques.

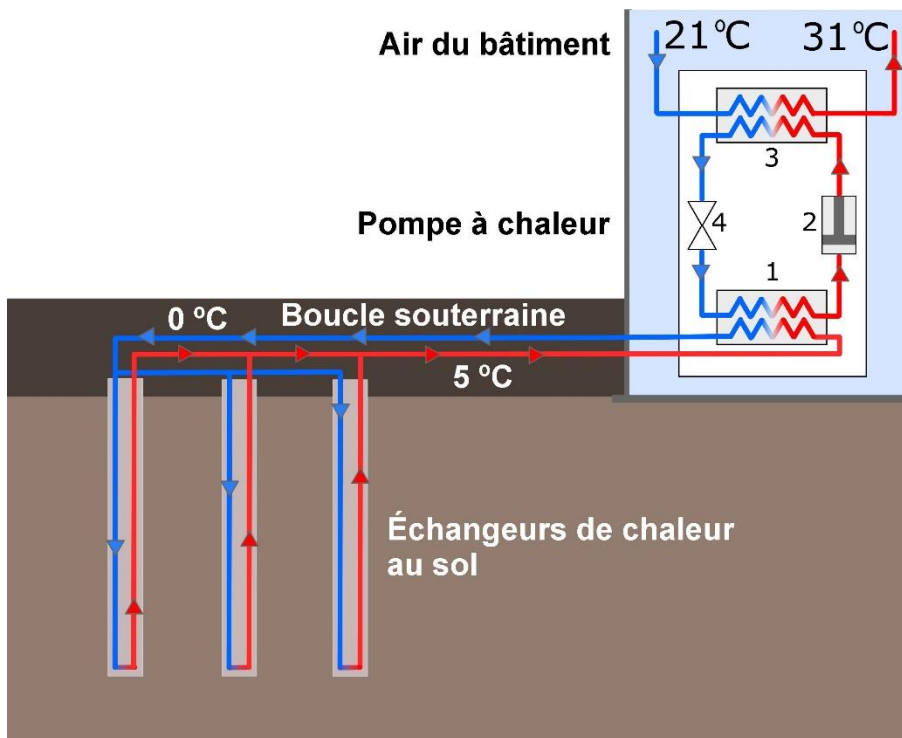


Figure 2. Cycle thermodynamique d'une PAC géothermique couplée au sol utilisé pour transférer la chaleur entre le sous-sol et un bâtiment (tiré de Raymond, 2016). L'énergie thermique est extraite du sous-sol en faisant circuler un fluide caloporteur à une température inférieure à celle du sous-sol. La

chaleur est ensuite transférée du fluide caloporteur provenant de la boucle souterraine à un réfrigérant par le biais d'un échangeur de chaleur (1), où le réfrigérant initialement à basse pression, donc sous forme liquide, commence à s'évaporer, suite à la hausse de température. Ce processus cause alors une augmentation de la pression du réfrigérant qui est amplifiée au niveau du compresseur (2), ce qui nécessite toutefois un apport en énergie pour son activation. Le réfrigérant, maintenant sous forme de vapeur à haute pression, transfère à son tour son énergie thermique à la boucle d'air du bâtiment par le biais d'un second échangeur de chaleur (3). Finalement, la pression du réfrigérant diminue au niveau du détendeur (4) 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.

2.1 Définition des systèmes géothermiques

La Terre et les eaux souterraines peuvent être des sources de chaleur durant l'hiver et de climatisation durant l'été. On peut ainsi tirer profit de la température du sol au moyen d'une PAC géothermique et d'un échangeur de chaleur au sol. Celui-ci peut être de type « boucle ouverte » ou « boucle fermée ». Les Figures 3 et 4 présentent une classification des différents types de PAC géothermique selon trois grandes familles, soit : 1) PAC d'aquifère; 2) PAC d'eau de surface; et 3) PAC couplée au sol.

Dans le cas d'un système avec échangeurs de chaleur dit « à boucle ouverte », l'eau souterraine (pour une PAC d'aquifère ou en anglais, *groundwater heat pump* GWHP) ou l'eau de surface (pour une PAC d'eau de surface) est directement pompée pour être acheminée vers un intermédiaire, soit un échangeur de chaleur à plaques (Figures 2 et 3) lié au système de PAC géothermique. Les puits à colonne permanente (PCP ou en anglais, *standing column wells*) sont un autre type de PAC d'aquifère (Figure 4) qui offrent une configuration intermédiaire permettant de capter et d'injecter l'eau souterraine dans le même puits qui est aménagé avec des tuyaux concentriques, mais dans lequel l'eau est en contact direct avec les formations aquifères.

Les systèmes de PAC d'eau de surface peuvent, quant à eux, être conçus avec une boucle ouverte qui puise directement l'eau de surface ou avec une boucle fermée constituée de tuyaux en forme de serpentín ou d'échangeurs à plaques immergées dans un bassin d'eau de surface (Figures 3 et 4).

Un réseau de tuyaux enfouis de façon horizontale dans des tranchées ou encore verticaux dans des forages constitue les échangeurs de chaleur au sol dit « à boucle fermée » (PAC couplée au sol ou en anglais, *ground source heat pump* GSHP), dans lesquels circule un fluide caloporteur. Des conceptions alternatives sont possibles comme l'utilisation de forages inclinés pour aménager les échangeurs de chaleur ou encore l'enfoncement de tuyaux à angle dans des dépôts meubles, bien que ces systèmes soient généralement catégorisés comme des systèmes verticaux puisque des foreuses sont nécessaires à l'aménagement. Le fluide caloporteur est typiquement constitué d'un mélange d'eau et d'antigel, lorsqu'il s'agit d'une boucle fermée secondaire, alors qu'il peut occasionnellement être un réfrigérant pour les systèmes géothermiques à expansion directe (Figure 4). Le pieu géothermique est une boucle fermée verticale secondaire qui est installée à même les forages effectués pour les pieux de soutènement d'un immeuble. Au Québec, le liquide caloporteur des échangeurs de chaleur à boucle fermée secondaire (PAC couplée au sol) est généralement constitué d'un mélange d'eau et d'antigel puisque ça température peut passer sous 0 °C lorsque le système est opéré en mode chauffage. À moins de fuites, ce liquide n'est jamais mis en contact avec l'environnement et demeure à l'intérieur des tuyaux des échangeurs de chaleur tout au long de son processus. À l'opposée, les systèmes de PAC d'aquifère, qui sont de type « boucle ouverte », utilisent directement l'eau souterraine des aquifères afin d'extraire et d'injecter la chaleur et ainsi requiert des puits de captage et d'injection d'eau souterraine (Figure 3). Selon la réglementation du Québec, l'eau

souterraine utilisée pour des fins de chauffage ou de climatisation doit être retournée dans son aquifère d'origine. Toutefois, dans d'autres juridictions, l'eau souterraine peut être retournée vers un cours d'eau de surface.

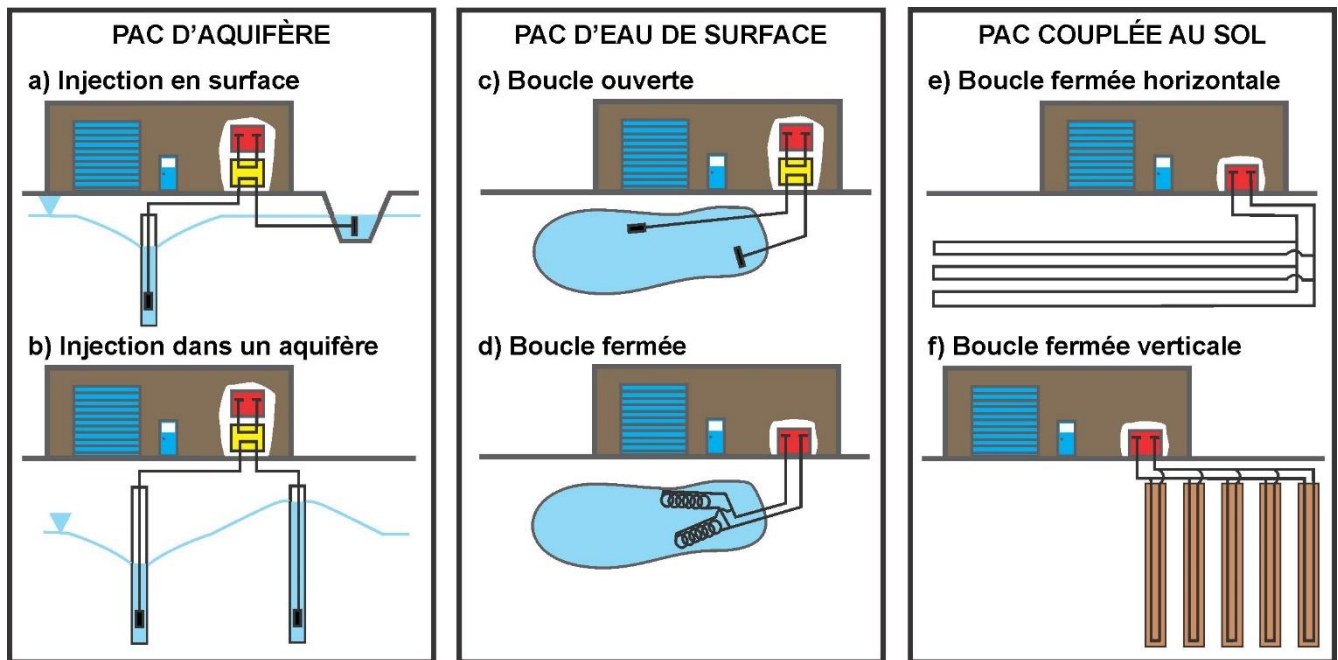


Figure 3. Types de configurations de système de PAC géothermique : d'aquifère, où l'eau souterraine est a) rejetée en surface ou b) réinjectée dans le sous-sol; d'eau de surface, en utilisant c) l'eau de surface directement ou d) des échangeurs de chaleur en boucle fermée; puis couplée au sol à l'aide d'échangeurs de chaleur e) horizontaux ou f) verticaux. Les unités de PAC et les échangeurs de chaleur à plaques intermédiaires situés dans les bâtiments sont schématisés par des rectangles rouges et jaunes, respectivement.

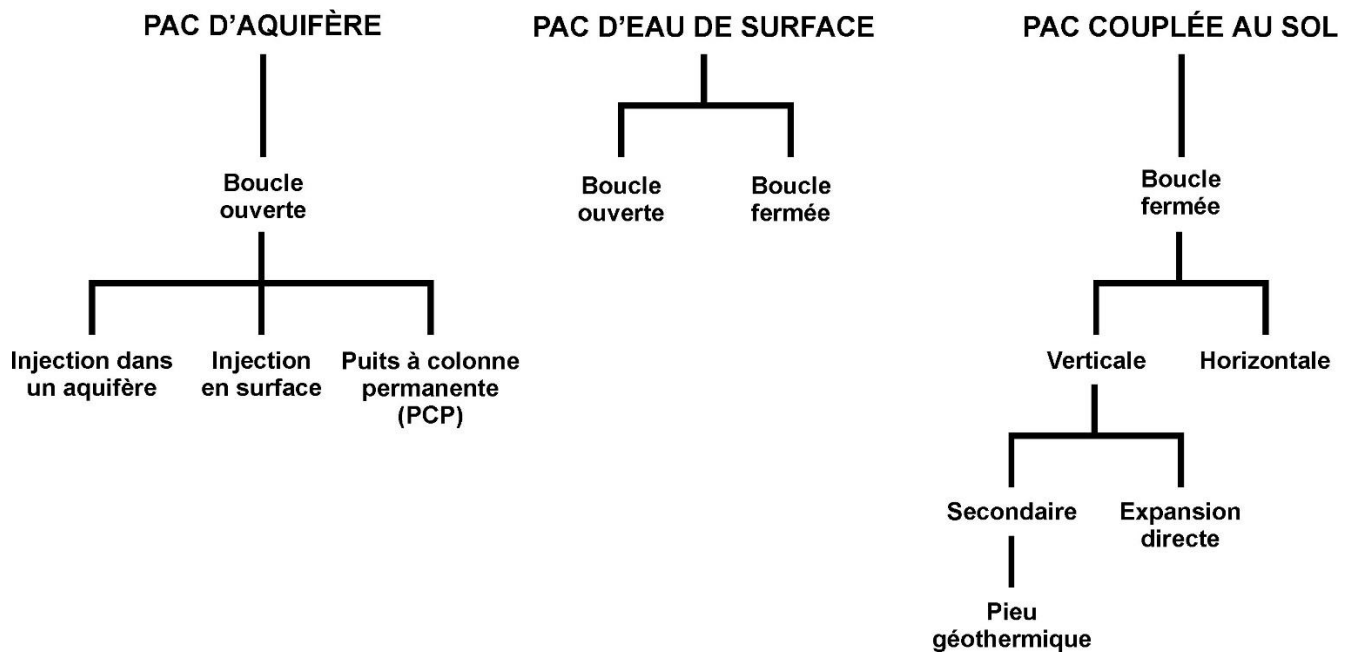


Figure 4. Classification des systèmes de PAC géothermique.

2.2 Les systèmes géothermiques au Québec

Au Québec, seules des statistiques sont disponibles sur les systèmes géothermiques résidentiels (CCÉG, 2012). Les PAC couplées au sol sont de loin les plus répandues, avec plus de 90 % des systèmes résidentiels installés. Les systèmes de PAC d'aquifère ne représentent que 7% du marché, tandis que pour les systèmes de PAC d'eau de surface, c'est moins de 3%. Il n'y a pas de statistiques disponibles pour les systèmes à expansion directe, mais ceux-ci demeurent marginaux. Même si aucune statistique n'est disponible pour les systèmes géothermiques des bâtiments commerciaux, institutionnels et industriels, notre connaissance du marché laisse croire que la distribution serait semblable avec les systèmes verticaux de PAC couplée au sol loin au premier rang.

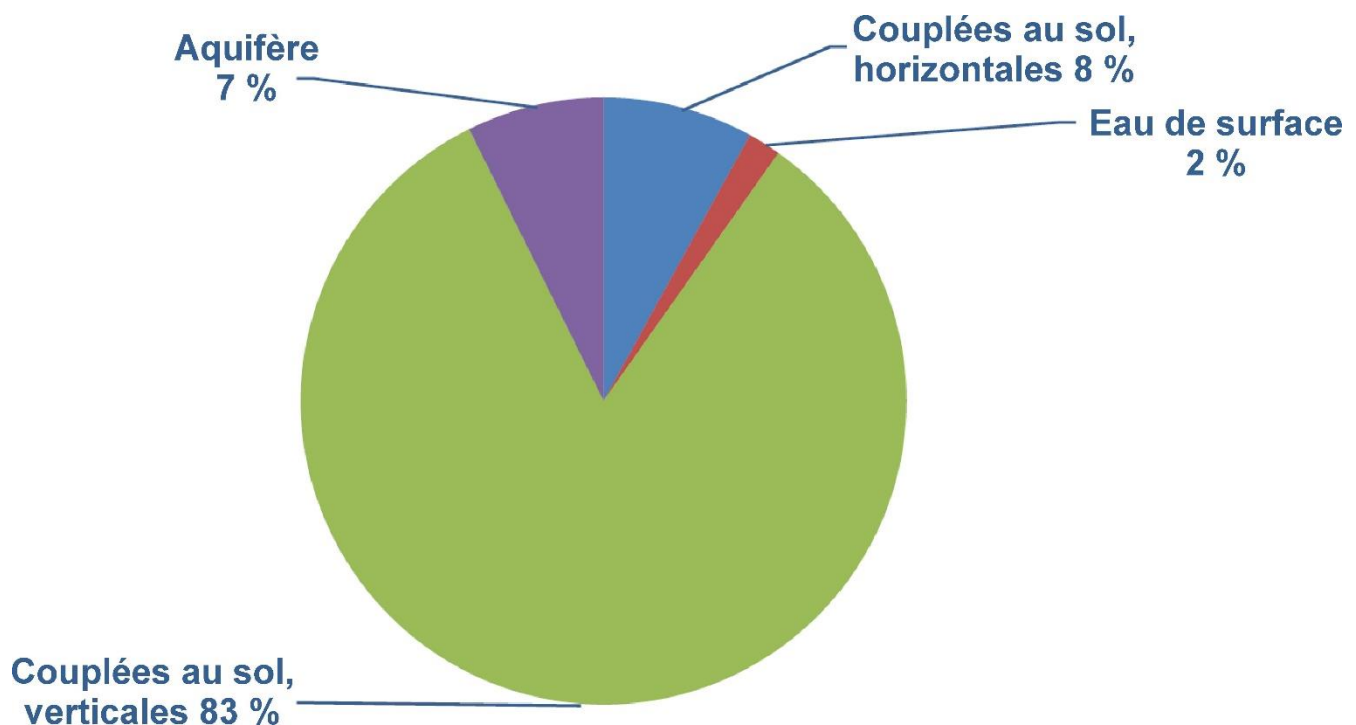


Figure 4. Répartition des types de PAC géothermique utilisés pour les systèmes résidentiels au Québec en 2010 (adapté de CCÉG, 2012).

2.3 Références

Ahmadi, M.H., Ahmadi, M.A., Sadaghiani, M.S., Ghazvini, M., Shahriar, S., Alhuyi Nazari, M. 2017. Ground source heat pump carbon emissions and ground-source heat pump systems for heating and cooling of buildings: A review. *Environmental Progress & Sustainable Energy* <https://doi.org/10.1002/ep.12802>

- *Introduit l'efficacité énergétique et la norme de fonctionnement des systèmes de PAC géothermique.*
- *Contient une description détaillée des différents types de systèmes de PAC géothermique et de leurs avancées.*

Anderson, M.P., 2005. Heat as a ground water tracer. *Ground Water* 43(6): 951-968. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2005.00052.x>

- *Synthèse critique de l'ensemble des travaux en hydrogéologie concernant les traceurs des eaux souterraines.*
- *Montre que les données sur la température de l'eau souterraine et les outils d'analyse associés sont actuellement sous-utilisés et n'ont pas encore atteint leur plein potentiel.*

Badache, M., Eslami-Nwjad, P., Ouzzane, M., Aidon, Z., Lamarche, L., 2016. A new modeling approach for improved ground temperature profile determination. *Renewable Energy* 85:436-44. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.06.020>

- *Développe un modèle amélioré pour la prédiction du profil de température du sous-sol dans lequel l'équation du bilan énergétique à la surface du sol est complétée par une corrélation empirique pour le calcul annuel de la température moyenne à la surface du sol.*

- *Modèle validé avec des données mesurées sur trois sites situés : au Québec (Canada) ainsi qu'au Colorado et au Texas (États-Unis d'Amérique).*

Banks, D., 2012. An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling. Wiley-Blackwell Publishing, Ltd., Oxford, UK. 2nd Edition, 526 p. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118447512>

- *Fournit aux ingénieurs, géologues, architectes, planificateurs et régulateurs les compétences fondamentales nécessaires pour évaluer la capacité du sous-sol à stocker, fournir et recevoir de la chaleur et à mettre en œuvre les systèmes de PAC géothermique pour exploiter cette capacité de chauffage et de refroidissement.*
- *Orienté les explications vers la compréhension de la source de chaleur et de refroidissement du sous-sol en considérant les aspects géologiques, plutôt que seulement les aspects de construction.*
- *Explique la science derrière la thermogéologie et offre des conseils pratiques sur les différentes options de conception.*

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 p. http://www.geo-exchange.ca/fr/UserAttachments/article82_Final%20Stats%20Report%202011%20-%20February%206,%202012_F.pdf

- *Fait état du marché de l'industrie canadienne des systèmes résidentiels de PAC géothermique pour les années 2008, 2009 et 2010, et ce pour chacune des provinces canadiennes.*

Ferguson, G. et Woodbury, A.D. 2007. The Urban Heat Island in the Subsurface. Geophysical Research Letters 34: L23713. <https://doi.org/10.1029/2007GL032324>

- *Examine les températures du sous-sol dans un environnement urbain et rural afin d'aider à caractériser la nature de cette variabilité.*
- *Indique que les températures du sous-sol sont liées à l'utilisation même du sous-sol et soutient que l'effet d'îlot de chaleur urbain présente une variabilité spatiale importante et complexe.*
- *Montre que la relation entre les processus souterrains et de surface ne peut pas être facilement déterminée, ce qui indique que des études antérieures reposant sur un tel lien pourraient nécessiter un examen plus approfondi.*

Florides, G. et Kalogirou, S.S., 2007. Ground heat exchangers-A review of systems, models and applications. Renewable Energy 32(15): 2461-2478. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.12.014>

- *Présente les modèles actuels qui donnent des détails sur la variation de température du sous-sol autour des systèmes de PAC géothermique à l'aide de systèmes de surveillance mis en place pour tester divers prototypes de construction.*

Ouzzane, M. Eslami-Nejad, P., Badache, M., Aidoun, Z., 2015. New correlations for the prediction of the undisturbed ground temperature. Geothermics 53: 379-384. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.08.001>

- *En utilisant des données mesurées obtenues à partir de données de tests de réponse thermique couvrant un large éventail de climats, deux corrélations différentes de la température du sol non perturbée, globale et simplifiée ont été développées.*

Popiel, C., Wojtkowiak, J. et Biernacka, B., 2001. Measurements of temperature distribution in ground. Experimental Thermal and Fluid Science 25(5): 301-309. [https://doi.org/10.1016/S0894-1777\(01\)00078-4](https://doi.org/10.1016/S0894-1777(01)00078-4)

- *Étudie les distributions de température dans le sous-sol pour calculer les pertes thermiques des bâtiments au sol, pour concevoir les équipements de stockage d'énergie thermique et les échangeurs de chaleur, et pour analyser les processus de biodégradation des substances organiques et les processus de nitrification.*

Raymond, J., 2018. Colloquium 2016: Assessment of the subsurface thermal conductivity for geothermal applications. Canadian Geotechnical Journal. <https://doi.org/10.1139/cgj-2017-0447>

- *Présente les méthodes de caractérisation du sous-sol dans le contexte de la conception de systèmes de PAC géothermique qui ont beaucoup évolué depuis le concept original des tests de réponse thermique proposé dans les années 1980 avec différentes techniques inspirées du secteur des sciences de la Terre.*

Raymond, J., Therrien, R. et Gosselin L., 2010. Low-temperature geothermal energy in mining environments. CIM Journal 1(2): 140-149. <https://store.cim.org/fr/low-temperature-geothermal-energy-in-mining-environments>

- *Des calculs de conception, effectués pour les mines Mouska et Doyon en Abitibi, sont présentés afin d'illustrer comment installer avantageusement de tels systèmes dans l'environnement minier.*

Zhang, T., 2005. Influence of the seasonal snow cover on the ground thermal regime: an overview. Reviews of Geophysics, 43(4): 1-23. <https://doi.org/10.1029/2004RG000157>

- *Étudie l'influence et l'impact de l'enneigement saisonnier sur la température du sous-sol, les processus de gel et de dégel, ainsi que le pergélisol sur les échanges de carbone entre l'atmosphère et le sous-sol et sur le cycle hydrologique dans les régions froides.*

3. CADRE LÉGISLATIF ET RÉGLEMENTAIRE DU QUÉBEC

Au Québec, l'installation des systèmes géothermiques est encadrée par le *Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection* (RPEP) et les systèmes d'échange de chaleur déposés en eau de surface par la *Politique de protection des rives, du littoral et de la plaine inondable* (PPRLPI).

3.1 Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection (RPEP)

Ce règlement vise à mettre en œuvre un nouveau régime d'autorisation des prélèvements d'eau et à renforcer la protection des sources d'eau potable du Québec. Le RPEP permet et encadre les systèmes géothermiques à boucle ouverte qui prélèvent de l'eau souterraine (PAC d'aquifère), ainsi que les systèmes de géothermie à énergie du sol ou à boucle fermée qui ne prélèvent pas d'eau (PAC couplée au sol), c'est-à-dire ceux dont la boucle est disposée dans le sol au moyen de tranchées ou dans des forages et dans laquelle un fluide caloporteur y circule.

<http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/prelevements/reglement-prelevement-protection/index.htm>

Le Chapitre IV du RPEP contient trois articles concernant l'aménagement des systèmes géothermiques et leur mise en exploitation :

- L'article 28, qui touche les systèmes de PAC d'aquifère, nommé « *système de géothermie qui prélève de l'eau* »;
- L'article 29, qui se consacre aux systèmes de PAC couplée au sol, nommé « *système de géothermie à énergie du sol* »;
- L'article 30, qui énumère les éléments devant figurer dans le rapport de fin de travaux d'aménagement du système de PAC couplée au sol.

L'article 28 stipule notamment que le système à boucle ouverte (PAC d'aquifère) doit être approvisionné exclusivement en eau souterraine, ce qui interdit les systèmes prélevant de l'eau de surface (PAC d'eau de surface) à partir d'un cours d'eau ou d'un plan d'eau. Les systèmes qui prévalent de l'eau de surface ne peuvent pas porter le qualificatif de « GÉO » thermiques dans le sens étymologique du terme, c'est-à-dire un système d'échange de chaleur qui provient de la Terre. L'eau souterraine captée doit être retournée dans son aquifère d'origine. Cela restreint l'utilisation des PCP, dont la conception prévoit une décharge occasionnelle de l'eau utilisée par un système de trop-plein ou saignée (en anglais, *bleeding*). Ainsi, des travaux ou forages supplémentaires sont nécessaires afin de construire un puits d'injection ou une fosse de réalimentation afin de retourner l'eau à l'aquifère d'origine, malgré le faible volume d'eau impliqué. Ceci mène donc à des exigences coûteuses qui freinent le déploiement des systèmes de PCP.

L'article 29 émet l'interdiction d'utiliser de l'éthylène glycol, de l'acétate de potassium et du méthanol comme fluide caloporteur dans le cas d'un nouveau système de PAC couplée au sol. Les travaux relatifs à l'aménagement du système doivent être réalisés de manière à prévenir la contamination des eaux ou la détérioration du milieu. L'article stipule également que la finition du sol pour les systèmes implantés à plus de 5 m de profondeur doit empêcher le ruissellement d'eau vers les composantes du système, comme pour un puits d'approvisionnement en eau.

De plus, le chapitre III du RPEP établit le cadre pour l'installation de systèmes de prélèvement d'eau et l'article 17 fait état des distances minimales qui doivent être respectées :

- l'installation doit être située à une distance de 15 m ou plus d'un système étanche de traitement des eaux usées;

- l'installation doit être située à une distance de 30 m ou plus d'un système non étanche de traitement des eaux usées ou, si le puits est scellé conformément à l'article 19, à une distance de 15 m ou plus d'un tel système;
- l'installation doit être située à une distance de 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.

Q-2, r. 35.2 - Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection

Article 17

Date d'entrée en vigueur : 2015-03-02

<http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/showversion/cr/Q-2,%20r.%2035.2?code=se:17&pointInTime=20180323#20180323>

L'application de ces dispositions est confiée aux municipalités (art. 105, RPEP).

3.2 Loi sur la qualité de l'environnement (LQE)

Selon les articles 22 et 31.75 de la LQE, tout prélèvement d'eau incluant les travaux et ouvrages que nécessite un tel prélèvement dont le débit maximum est supérieur à 75 000 litres par jour n'est pas permis, à moins d'obtenir préalablement une autorisation du ministre.

<http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/lqe/autorisations/index.htm>

3.3 Politique de protection des rives, du littoral et de la plaine inondable (PPRLPI)

Les systèmes de PAC géothermique d'eau de surface à boucle ouverte (qui s'approvisionnent en eau de surface) ou fermée (sans prélèvement d'eau), ne sont pas réglementés dans le RPEP, mais sont encadrés par la PPRLPI via la réglementation municipale. En effet, la PPRLPI énonce un cadre et des normes minimales de protection devant être insérés dans les schémas d'aménagement et de développement des municipalités régionales de comté (MRC), puis intégrés, par conformité, dans les règlements d'urbanisme de chacune des municipalités du Québec.

<http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/ShowDoc/cr/Q-2,%20r.%2035/>

4. REVUE DES RÈGLEMENTS DANS D'AUTRES JURIDICTIONS

4.1 Province de l'Ontario (Canada)

Les règlements concernant la conception, la construction et la conformité environnementale des puits géothermiques se retrouvent dans trois publications différentes pour cette province.

Ground Source Heat Pumps Regulation

Ontario Regulation 98/12

Mise à jour : 18/05/2012

<https://www.ontario.ca/laws/regulation/120098>

- Sous la Loi sur la protection de l'environnement (en anglais, *Environmental Protection Act*), qui a été revu le 08/03/2018. <https://www.ontario.ca/laws/statute/90e19>;
- La conception du système géothermique doit être approuvée par un ingénieur ou un géoscientifique membre d'un ordre professionnel;
- Des mesures doivent être prévues pour prévenir ou réduire la probabilité de migration de gaz naturel contenu dans le sous-sol, sous forme de recommandations au sein des *Oil, Gas and Salt Resources of Ontario - Provincial Operating Standards*. Celles-ci consistent entre autre à définir un plan identifiant l'équipement et les procédures à utiliser pour surveiller la présence et la migration de gaz naturel, ainsi que les mesures à prendre pour prévenir ou réduire la probabilité de migration de gaz naturel, par le trou de forage ou autrement, pendant la construction, l'altération, l'extension ou le remplacement d'une PAC géothermique couplée au sol;
- Le méthanol ne peut être utilisé comme fluide caloporteur, à moins que le système ait été installé avant le 1^{er} juin 1998. Toutefois, si ce système doit être modifié ou remplacé, il doit utiliser un autre type de fluide caloporteur.
- Une approbation environnementale est requise pour tout système géothermique vertical qui mesure plus de 5 mètres de profondeur à partir de la surface.
- Ce règlement spécifie que la conception du système doit considérer et suivre les normes et directives des documents suivants :
 - *Oil, Gas and Salt Resources Act* <https://www.ontario.ca/laws/statute/90p12>
 - *Ontario Regulation 245/97 (Exploration, Drilling and Production)* <https://www.ontario.ca/laws/regulation/970245>
 - *Oil, Gas and Salt Resources of Ontario, Provincial Operating Standards* <https://www.ontario.ca/document/oil-gas-and-salt-resources-ontario-provincial-operating-standards>
 - *Environmental Guidelines for Earth Energy Heat Pumps and Underground Thermal Energy Storage (UTES) Systems* du document CAN/CSA-C448.1-02 (*Design and Installation of Earth Energy Systems*), publié en 2009 par la *Canadian Standards Association*. Il est toutefois à noter que plusieurs mises à jour de ce document ont été réalisées et que la date la plus récente est 2016, mais la loi de l'Ontario cite cette ancienne version. <http://shop.csa.ca/en/canada/energy-efficiency/ansicsa-c448-series-16/invt/27014712016>
 - *Water Supply Wells - Requirements and Best Management Practices*, paru en 2009 et révisé en 2015. <https://www.ontario.ca/document/water-supply-wells-requirements-and-best-practices>

Installing vertical closed loop ground source heat pumps

Règles que les foreurs et les entrepreneurs doivent suivre lors de la construction, la modification, le remplacement ou l'extension d'un système de PAC géothermique couplée au sol vertical.

<https://www.ontario.ca/page/installing-vertical-closed-loop-ground-source-heat-pumps>

Instructions for completing an environmental compliance approval for vertical closed loop ground

Ce document énonce les exigences minimales du Ministère de l'Environnement et de l'Action en matière de changement climatique de l'Ontario relatives aux demandes d'approbation de la conformité environnementale (en anglais, *environmental compliance approval* ou ECA) relatives à la construction, à la modification, à l'extension ou au remplacement des systèmes géothermiques à boucle fermée verticale, telles que définies par le règlement Reg. 98/12 en vertu de la Loi sur la protection de l'environnement.

<https://www.ontario.ca/page/instructions-completing-environmental-compliance-approval-vertical-closed-loop-ground>

4.2 Province du Manitoba (Canada)

Les activités liées aux systèmes géothermiques réalisées sur le territoire de cette province sont régies par cette loi :

The Groundwater and Water Well Act

C.C.S.M. c. G110

Mise à jour: 27/03/2018

<http://web2.gov.mb.ca/laws/statutes/ccsm/g110e.php>

- Considère un puits géothermique (boucle ouverte ou fermée) au même titre que tout autre puits ayant le but d'extraire de l'eau souterraine, qu'un puits géotechnique ou qu'un puits d'injection. Les puits géothermiques sont donc régis de la même manière.

4.3 Province de la Colombie-Britannique (Canada)

Cette province réglemente différemment les puits géothermiques à haute (> 80°C) et basse température (PAC).

Geothermal Resources Act

[RSBC 1996] CHAPTER 171

Mise à jour: 14/03/2018

http://www.bclaws.ca/EPLibraries/bclaws_new/document/ID/freeside/00_96171_01

- Celui-ci réglemente les ressources géothermiques lorsque l'eau souterraine est extraite à une température supérieure à 80°C à la surface afin de générer de l'électricité à partir de la vapeur issue de l'eau chaude.
- Les systèmes de PAC ne sont donc pas régis par cette loi.
- Il contient deux règlements :
 - *Geothermal Operations Regulation*
B.C. Reg. 79/2017
Mise à jour: 20/03/2018
http://www.bclaws.ca/civix/document/id/complete/statreg/79_2017
 - *Geothermal Resources General Regulation*
B.C. Reg. 39/2017
Mise à jour: 20/03/2018
http://www.bclaws.ca/civix/document/id/complete/statreg/39_2017

Groundwater Protection Regulation

B.C. Reg. 152/2016

Mise à jour : 10/06/2016

http://www.bclaws.ca/civix/document/id/complete/statreg/39_2016

- Ce document s'assure à ce que les activités liées aux puits de plus de 5 m de profondeur, notamment celles liées aux systèmes de PAC d'aquifère (*water supply wells* et *injection wells*) et aux PAC couplées au sol (*closed-loop geoexchange wells*), et aux eaux souterraines en général soient réalisées dans le respect de l'environnement.
- Il régleme les normes minimales pour la construction, l'entretien, la fermeture et la désaffectation des puits. Les systèmes horizontaux sont donc exemptés de ce règlement.
- Il désigne les types de personnes qualifiées certifiées pour forer des puits, installer des pompes et effectuer des opérations connexes.
- Il contient des figures explicatives et des tableaux synthèses pour les puits de captage d'eau souterraine.

4.4 État du Massachusetts (États-Unis d'Amérique)

Les règlements liés à la géothermie sont parsemés dans cinq documents de cet état.

Guidelines for Ground Source Heat Pump Wells

Mise à jour : 12/2013

<http://www.mass.gov/eea/docs/dep/water/laws/a-thru-h/gshpguid.pdf>

- Ce document présente les lignes directrices pour l'installation de systèmes de PAC géothermique.
- Il spécifie que l'installation et l'exploitation de ces systèmes nécessitent le respect des exigences administrées par les programmes suivants du *Massachusetts Department of Environmental Protection* (MassDEP) et du *Bureau of Resource Protection* (BRP) :
 - Underground Injection Control
 - Groundwater Discharge Permit
 - Well Driller Certification
 - Water Management Act

Underground Injection Control

310 CMR 27.00

Mise à jour : 23/09/2016

<https://www.mass.gov/regulations/310-CMR-2700-underground-injection-control>

- Ce document régit l'injection souterraine de tout fluide, afin de prévenir toute situation susceptible de contaminer les eaux souterraines.

Ground Water Discharge Permit

314 CMR 5

Mise à jour : 02/12/2016

<https://www.mass.gov/lists/groundwater-discharge-permitting-regulations-policies-guidance>

- Ce document régit les rejets d'eaux souterraines, que ce soit dans un aquifère ou en surface, afin de protéger l'utilisation potentielle des eaux souterraines comme source d'eau potable, ainsi que la protection des eaux de surface conformément aux *Massachusetts Surface Water Quality Standards* (314 CMR 4.00).

Certification of Well Drillers and Filing of Well Completion Reports
310 CMR 46.00

Mise à jour : 16/04/2010

<https://www.mass.gov/regulations/310-CMR-4600-certification-of-well-drillers-and-filing-of-well-completion-reports>

- Ce document établit le processus et les qualifications pour la certification des foreurs et leurs responsabilités.

Massachusetts Water Resources Management
310 CMR 36.00

Mise à jour: 07/11/2014

<https://www.mass.gov/regulations/310-CMR-3600-massachusetts-water-resources-management-program>

- Ce document régit la gestion durable des ressources en eau, afin d'équilibrer les besoins des ressources et assurer leur pérennité.

4.5 État du Colorado (États-Unis d'Amérique)

Dans l'état du Colorado, les règlements visant à permettre le développement des ressources géothermiques sont regroupés au sein des :

Geothermal Well Rules

2 CCR 402-10

Publié : 30/09/2004

<http://water.state.co.us/DWRIPub/Documents/geothermalrules.pdf>

- Ce document fournit des normes minimales pour la construction et l'exploitation des différents systèmes géothermiques. Le propriétaire, l'exploitant et le constructeur sont responsables de connaître les lois, règlements et codes fédéraux, provinciaux et locaux, lorsqu'ils sont applicables et de s'y conformer.
- Il attribue le pouvoir aux ingénieurs de l'état (en anglais, *State Engineer*) de surveiller et d'observer l'utilisation des ressources géothermiques et d'exiger l'installation de dispositifs de mesure, s'ils le jugent nécessaire.
- Il classe les systèmes géothermiques en deux catégories : 1) ceux qui ont une profondeur totale ne dépassant pas 2 500 pieds (762 m) ou qui rencontrent des fluides géothermiques ayant une température ne dépassant pas 212 °F (100 °C); et 2) les autres.

4.6 Allemagne

La réglementation allemande régissant les systèmes géothermiques repose principalement sur les normes techniques « *VDI 4640 Blatt 1 à 5* », qui ne sont en fait que des recommandations et ne sont donc pas juridiquement contraignantes. Les seuls lois et règlements applicables aux systèmes géothermiques se retrouvent au sein de la loi qui régit les ressources en eau, et ces systèmes géothermiques y sont indifférenciés :

Wasserhaushaltsgesetz
[Loi sur les ressources en eau]
BGBl. I 2009 S. 2585
31/07/2009
<https://dejure.org/BGBl/2009/BGBl. I S. 2585>

4.7 Danemark

Deux décrets couvrent l'utilisation de l'énergie souterraine au Danemark, que ce soit pour une boucle fermée ou ouverte.

Bekendtgørelse om jordvarmeanlæg
[Décret sur les systèmes géothermiques]
BEK nr 1019 [Département danois des affaires civiles]
Mise à jour : 25/10/2009
<https://www.retsinformation.dk/forms/R0710.aspx?id=127761>

Bekendtgørelse om varmeindvindingsanlæg og grundvandskøleanlæg
[Décret sur les systèmes de récupération de chaleur et les systèmes de refroidissement des eaux souterraines]
BEK nr 1206 [Département danois des affaires civiles]
Mise à jour : 24/11/2006
<https://www.retsinformation.dk/Forms/R0710.aspx?id=12964>

- Un processus d'autorisation est en place pour les systèmes de PAC géothermique et des limites de distance et de température sont imposées; les conseils municipaux peuvent rendre les exigences encore plus strictes et la violation des exigences peut entraîner une peine d'emprisonnement pouvant aller jusqu'à deux ans.
- Les limitations imposées sur la surveillance des exigences des boucles ouvertes sont plus strictes. En particulier, une étude incluant de la modélisation est nécessaire afin de démontrer que la température de l'eau souterraine n'augmentera pas de plus de 0,5 °C au sein des systèmes d'alimentation en eau et de refroidissement existants.
- Le volume de fluide de l'échangeur de chaleur, ainsi que les températures d'entrée et de sortie doivent également être surveillés, enregistrés et signalés au niveau municipal.

4.8 France

L'utilisation des ressources géothermiques en France est encadrée par ce décret :

Décret n° 2015-15 du 8 janvier 2015 modifiant le décret n° 78-498 du 28 mars 1978 modifié relatif aux titres de recherches et d'exploitation de géothermie, le décret n° 2006-649 du 2 juin 2006 modifié relatif aux travaux miniers, aux travaux de stockage souterrain et à la police des mines et des stockages souterrains, l'annexe de l'article R. 122-2 et l'article R. 414-27 du code de l'environnement
Émis : 10 janvier 2015
<https://www.legifrance.gouv.fr/eli/decret/2015/1/8/EINL1412373D/jo/texte>

- Ce décret définit la réglementation des activités de géothermie dites « de minime importance ».
- Ce décret modifie :

- le décret n° 78-498 du 28 mars 1978 relatif aux titres de recherches et d'exploitation de géothermie <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=LEGITEXT000006062883&dateTexte=20091120>;
- le décret n° 2006-649 du 2 juin 2006 relatif aux travaux miniers, aux travaux de stockage souterrain, et à la police des mines et des stockages souterrains <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT00000609345>;
- l'annexe de l'article R. 122-2 <https://www.legifrance.gouv.fr/affichCodeArticle.do?cidTexte=LEGITEXT000006074220&idArticle=LEGIARTI000006834948&dateTexte=29990101&categorieLien=cid>;
- l'article R. 414-27 du code de l'environnement <https://www.legifrance.gouv.fr/affichCodeArticle.do?cidTexte=LEGITEXT000006074220&idArticle=LEGIARTI000024481986&dateTexte=29990101&categorieLien=cid>;

Les projets de minime importance correspondent aux systèmes suivant :

- PAC couplée au sol ayant :
 - une profondeur d'installation supérieure à 10 m et jusqu'à 200 m
 - une puissance soutirée du sous-sol inférieure à 500 kW
 - une localisation en zone verte ou orange sur les cartes des zones d'aléas du sous-sol
- PAC d'aquifère, ayant, en plus des critères précédents,
 - une température de l'eau puisée en sous-sol inférieure à 25 °C
 - un prélèvement et une réinjection dans le même aquifère
 - aucun volume prélevé pour un usage autre (arrosage, consommation, agriculture, industrie...)
 - un débit pompé inférieur à 80m³/h.

Si le système géothermique ne répond pas à toutes ces conditions, une des juridictions suivantes doit être contactée pour connaître la marche à suivre :

- la direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL);
- ou en outre-mer, la direction de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DEAL);
- ou en Île-de-France, la direction régionale et interdépartementale de l'environnement et de l'énergie (DRIEE).

Pour savoir si un projet géothermique répond aux critères de « minime importance », et pour connaître la zone réglementaire sur laquelle les ouvrages seront forés, une simulation de projet peut être réalisée en ligne via l'« *espace cartographique* » <http://www.geothermie-perspectives.fr/cartographie?mapid=40> :

- Ce site web permet de visualiser les données utiles pour la géothermie de toute zone géographique, sous forme de couches cartographiques ou cartes, désormais regroupées dans un seul catalogue de données. Il permet également de :
 - identifier les zones éligibles pour les projets de minime importance (PAC d'aquifère ou couplée au sol);
 - caractériser la ressource du sous-sol (existantes ou pas, favorables ou pas);
 - consulter également d'autres données (exemples d'opérations exemplaires, acteurs publics et professionnels, données de la banque du sous-sol (BSS), données du Bureau des ressources énergétiques du sous-sol (BEPH)).

4.9 Italie

Les règlements de ce pays concernant la géothermie se retrouvent dans quatre documents.

Legge n.896

[Loi n.896]

1986

http://www.distrettoenergiarinnovabili.it/der/s/geoterma-news/atti-bandi-delibere-e-documenti/copy2_of_normativa/normativa-nazionale/Legge_896_1986.pdf

- Ce document définit les types de géothermie et leur utilisation. L'énergie géothermique est considérée comme étant de faible température lorsqu'elle est inférieure à 90 °C.
- Article 1 - Champ d'application de la loi et des compétences
c.6 - Les utilisations de l'eau chaude géothermique disponible à des profondeurs inférieures à 400 m avec une puissance thermique totale ne dépassant pas 2 000 kW thermiques sont considérées comme de petites utilisations locales.

Decreto Legislativo n.152

[Décret législatif n ° 152]

03/04/2006

http://www.bosettiegatti.eu/info/norme/statali/2006_0152.htm

- Ce document présente la réglementation environnementale qui intervient sur la gestion des ressources en eaux souterraines et sur l'environnement dans son ensemble.

Legge Regionale n. 26

[Droit régional n. 26]

2003

<http://normelombardia.consiglio.regione.lombardia.it/NormeLombardia/Accessibile/main.aspx?id-doc=lr002003121200026&view=showdoc>

- Ce document aborde la gestion des déchets, de l'énergie, de l'utilisation du sous-sol et des ressources en eau.
Article 43 - Transfert à la Province de Milan de diverses fonctions, y compris la fonction administrative pour le forage des puits, la recherche d'eaux souterraines, le prélèvement d'eau, petites dérivations d'eau et l'exercice de toute autre fonction administrative, y compris l'activité de sanction.

Regolamento Regionale n. 2

[Réglementation régionale n. 2]

24/03/2006

<http://normelombardia.consiglio.regione.lombardia.it/NormeLombardia/Accessibile/main.aspx?view=showdoc&iddoc=rr002006032400002>

- Ce document définit de manière univoque les eaux souterraines et leur utilisation;
- Il fournit des règles de procédure à la fois pour l'utilisation des eaux souterraines au sens traditionnel et pour l'exploitation de la ressource géothermique.
- Article 2 - Définitions:
Aux fins du présent règlement, l'eau chaude géothermique est définie comme l'eau souterraine visée à l'article 1, paragraphe 6, de la loi 896/1986 dont l'utilisation géothermique est régie par la même loi.

- Articles 22, 5 et 32: Ils régissent la procédure administrative pour le forage des puits pour l'installation et la gestion des « sondes » géothermiques. En Europe, le terme « *sonde géothermique* » est souvent utilisé pour désigner un échangeur de chaleur au sol.

4.10 Royaume-Uni

La réglementation britannique régissant les systèmes géothermiques de faible profondeur repose sur des normes techniques, qui ne sont en fait que des recommandations et ne sont donc pas juridiquement contraignantes. Les seuls lois et règlements applicables aux systèmes géothermiques se retrouvent au sein de la loi qui régit les ressources profondes :

Deep geothermal energy regulation

Publié : 01/08/2014

<https://www.gov.uk/guidance/deep-geothermal-energy-regulation#conventional-geothermal>

- Ce document présente les directives pour se conformer aux règlements d'autorisation environnementale afin d'extraire l'énergie géothermique profonde.

4.11 Suède

Ce pays répartit les règlements et spécifications liés à la géothermie dans trois documents.

Förordning om miljöfarlig verksamhet och hälsoskydd

[Réglementation sur les activités dangereuses pour l'environnement et la protection de la santé]

1998:899

Mise à jour : 25/01/2018

<http://www.notisum.se/rnp/sls/lag/19980899.htm>

- Ce document concerne les activités présentant des risques pour l'environnement et la santé publique.
- Il précise qu'afin d'installer un système de PAC géothermique, un permis est requis et le rapport de forage doit être envoyé à la Commission géologique de Suède (*Sveriges Geologiska Undersökning* ou SGU).

Miljöprövningsförordning

[Règlement sur l'environnement]

2013:251

Émis : 08/05/2013

http://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/miljoprovningforordning-2013251_sfs-2013-251

- Ce document spécifie que les systèmes géothermiques nécessitent un permis spécial si la capacité est supérieure à 1 MW.

Miljöbalk

[Code l'environnement]

1998:808

Émis : 11/06/1998

https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/miljobalk-1998808_sfs-1998-808

- Les dispositions de ce code visent à promouvoir le développement durable.

- Il spécifie que lorsque l'eau souterraine doit être prélevée (à l'exception de l'apport de chaleur pour une propriété à deux logements), un permis d'exploitation d'eau est requis.

4.12 Pays-Bas

Aucun règlement sur la conception ou la construction de systèmes géothermiques n'existe présentement dans ce pays. Toutefois, une application web de système d'information géographique (SIG) a été créée afin de faciliter l'utilisation des différents systèmes géothermiques sur le territoire, ainsi que d'informer sur les restrictions légales possibles à un endroit donné :

WKO Tool Nederland

www.wkotool.nl

5. REVUE DES NORMES TECHNIQUES

Dans le secteur des systèmes géothermiques, des normes et codes sont produits par différentes entités dans un pays donné ou même à l'international. Ces normes demeurent facultatives, mais peuvent toutefois devenir exécutoires lorsqu'elles sont visées par des règlements en faisant partie intégrante de juridictions. Ces normes peuvent être classées de différentes façons :

- Normes techniques pour l'efficacité, la sécurité, la longévité, etc. Ces normes s'appliquent principalement à la PAC elle-même, en tant que composante du système;
- Normes techniques pour l'aménagement visant une performance minimale des systèmes et la protection de l'environnement, comme pour la construction du forage, l'installation des échangeurs de chaleur, etc.;
- Certification des compétences et de la qualité du travail pour les installateurs et les foreurs.

Les sous-sections suivantes présentent quelques organismes de normalisation, nationaux ainsi qu'un pour tout l'Europe et un autre international, ainsi que des guides de bonnes pratiques réalisés par les instances gouvernementales de certains pays.

5.1 Canada

5.1.1 Canadian Standards Association (CSA)

La *Canadian Standards Association (CSA)* est un organisme de normalisation à but non lucratif qui a notamment élaboré des normes pour les systèmes géothermiques, dont la norme C448.

La dernière version de la norme CSA C448 parue en 2016 est une norme binationale, rédigée de concert avec des acteurs des industries canadiennes et états-uniennes. Elle est basée sur la norme rédigée en 2013 « *Design and installation of earth energy systems* » par un comité essentiellement canadien et a complètement été revue. La version de 2016 contient trois sections générales qui s'appliquent à tout type de PAC géothermique, aux systèmes des bâtiments commerciaux et institutionnels et aux systèmes des bâtiments résidentiels. Les clauses applicables aux systèmes résidentiels sont généralement précises alors que les clauses applicables aux systèmes commerciaux, bien que détaillées, laissent un certain degré de liberté aux concepteurs, généralement un professionnel reconnu comme un ingénieur ou un géologue, qui doit être responsable de la conception qu'il propose à son client. Des sections détaillent les clauses concernant :

- les échangeurs de chaleur au sol à boucle fermée installés de façon verticale dans les forages;
- les échangeurs de chaleur à boucle fermée installés de façon horizontale dans des tranchées;
- les systèmes en interaction avec les plans d'eau de surface qu'ils soient à boucle ouverte ou fermée;
- les systèmes prélevant de l'eau souterraine, les systèmes avec PCP, etc.;
- les systèmes à expansion directe dont le réfrigérant circule dans les échangeurs de chaleur.

Ici, il est important de comprendre que la rédaction de la norme CSA C448 a impliqué la consultation d'un comité d'experts, issus pour la plupart de professionnels de l'industrie. Les clauses sont souvent empiriques et basées sur la pratique, plutôt que les observations scientifiques, et sont parfois influencées par le point de vue des experts qui diffère d'une entreprise à l'autre et d'une région à l'autre.

Faits intéressants, la protection des eaux souterraines est un aspect abordé dans la norme CSA C448. Par exemple, il est recommandé à la clause 6 du chapitre sur les systèmes commerciaux et institutionnels de recourir à l'expertise d'un ingénieur ou un géologue pour effectuer une étude du site d'implantation d'un

système, notamment pour consulter les registres sur les eaux souterraines afin d'identifier la présence potentielle d'aquifères. Lors de l'évaluation du site, il est également demandé d'inventorier les puits de captage d'eau souterraine, les installations septiques ou toutes autres infrastructures liées à l'eau potable ou au traitement de l'eau qui pourraient se trouver sur le site d'aménagement d'un système géothermique. La clause 5.5 du chapitre sur les échangeurs de chaleur verticaux à boucle fermée concerne le remblayage des forages. Il est stipulé que tous les forages doivent être remplis d'un coulis pompé du bas du forage vers le haut. Le coulis devrait avoir une conductivité hydraulique inférieure à 1×10^{-7} cm/s pour minimiser l'infiltration d'eau. Cependant, la clause 6.3.2.1 stipule que la procédure de remplissage des forages peut être modifiée tant que la protection des eaux souterraines n'est pas compromise. Cette clause donne au professionnel qualifié plus de latitude afin d'opter pour une conception alternative, par exemple le remblayage des forages avec du sable de silice et un bouchon de bentonite en surface. Cette méthode d'aménagement offre une meilleure performance des échangeurs de chaleur, mais est à envisager uniquement lorsque le professionnel juge qu'il ne présente pas de risque pour la protection des eaux souterraines.

La clause 4.4 décrit des distances minimales à respecter pour l'installation des composantes souterraines des PAC géothermique. Cette clause s'applique autant aux échangeurs de chaleur des PAC couplés au sol, des puits de captage d'eau des PAC d'aquifère et des puits des systèmes de PCP. La clause stipule qu'il faut installer ces composantes liées aux forages géothermiques à au moins 15 m de tout puits de captage d'eau souterraine, 15 m d'une fausse septique, 30 m d'un champ d'épuration et 30 m d'une source d'eau souterraine (*spring*).

La norme CSA C448 contient aussi une annexe (A.1) qui décrit les principales préoccupations environnementales associées aux PAC géothermique. Il s'agit des possibles fuites d'antigel, de la perturbation de la température du sol et de l'infiltration de l'eau de surface dans les aquifères via les forages des échangeurs de chaleur qui pourraient être mal scellés en surface.

Toutes ces clauses sont des recommandations et les praticiens n'ont pas d'obligations légales de les appliquer. Les organismes subventionnaires font parfois référence à de telles normes et demandent un suivi avant d'accorder les subventions. Par exemple, au Québec, le programme Rénoclimat de Transition énergétique Québec offre une subvention pour l'installation des systèmes géothermiques résidentiels. La subvention est offerte lorsque le système est certifié par la Coalition canadienne de l'énergie géothermique qui demande de suivre les recommandations énoncées dans cette norme.

CSA (Canadian Standards Association), 2016. C448 SERIES-16 - Design and installation of ground source heat pump systems for commercial and residential buildings. 206 p.

<http://shop.csa.ca/en/canada/energy-efficiency/ansicsa-c448-series-16/invt/27014712016>

5.2 États-Unis d'Amérique

National Ground Water Association (NGWA)

La NGWA est une communauté américaine de professionnels des eaux souterraines qui travaillent ensemble pour faire progresser les connaissances sur les eaux souterraines grâce à l'éducation et à la sensibilisation, la coopération et l'échange d'informations et la promotion de meilleures pratiques professionnelles. En 2001, elle a publié la 3e édition d'un standard sur les systèmes de PAC couplée au sol : *Guidelines for the Construction of Loop Wells for Vertical Closed Loop Ground Source Heat Pump Systems*

Geothermal Heat Pump Manual – A Design and Installation Guide for New York City
Ville de New York
2013

<http://www.nyc.gov/html/ddc/downloads/pdf/GeothermalHeatPumpManual.pdf>

- Ce document fournit une revue complète des systèmes de PAC géothermique et présente les défis potentiels qui peuvent survenir tout au long de la conception et de la construction de ces systèmes.
- Il fournit aux professionnels les outils nécessaires pour comprendre la géologie de la ville de New York et comment cette information peut être utilisée pour intégrer les systèmes de PAC géothermique dans un projet durable.

Geothermal Systems and their Application in New York City
Ville de New York
2015

http://www.nyc.gov/html/planyc/downloads/pdf/publications/2015_Geothermal.pdf

- Ce document est un outil pour aider à déterminer si les systèmes de PAC géothermique constituent une solution viable pour répondre aux besoins énergétiques d'un bâtiment.
- Il permet de montrer que la mise en œuvre réussie de la technologie géothermique dépend de plusieurs facteurs, dont la plupart sont spécifiques au site, et d'en tenir compte.

5.3 Allemagne

Pour les aspects techniques, l'association des ingénieurs allemands (en allemand, *Verein Deutscher Ingenieure*) a publié une série de guides de bonnes pratiques sur l'utilisation de l'énergie thermique du sous-sol (en allemand, *Thermische Nutzung des Untergrundes*) :

VDI 4640 Blatt 1 - Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte
2011

https://www.vdi.de/nc/richtlinie/vdi_4640_blatt_1-thermische_nutzung_des_untergrundes_grundlagen_genehmigungen_umweltaspekte/

- Ce guide présente les principes fondamentaux, approbations et aspects environnementaux de l'usage thermique du sous-sol

VDI 4640 Blatt 2 - Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen
2015

https://www.vdi.de/nc/richtlinie/entwurf_vdi_4640_blatt_2-thermische_nutzung_des_untergrundes_erdgekoppelte_waermepumpenanlagen/

- Ce guide présente des normes de conception et de construction pour les systèmes de PAC d'aquifère

VDI 4640 Blatt 3 - Unterirdische Thermische Energiespeicher
2001

https://www.vdi.de/nc/richtlinie/vdi_4640_blatt_3-thermische_nutzung_des_untergrundes_unterirdische_thermische_energiespeicher/

- Ce guide présente des normes de conception et de construction pour le stockage souterrain de l'énergie thermique

VDI 4640 Blatt 4 - Direkte Nutzungen
2004

https://www.vdi.de/nc/richtlinie/vdi_4640_blatt_4-thermische_nutzung_des_untergrun-des_direkte_nutzungen/

- Ce guide présente des normes de conception et de construction pour l'utilisation directe de la chaleur géothermique.

VDI 4640 Blatt 5 - Thermal Response Test
2016

https://www.vdi.de/nc/richtlinie/entwurf_vdi_4640_blatt_5-thermische_nutzung_des_unter-grunds_thermal_response_test/

- Ce guide présente comment réaliser différents tests de réponse thermique pour connaître l'efficacité des systèmes.

5.4 Italie

Il existe une série de lignes directrices (UNI11466-68: 2012) qui fournissent des orientations pour la conception et l'exploitation efficace et durable des systèmes géothermiques, ainsi que leur maintenance, incluant des sujets tels que leur conception et leurs impacts environnementaux.

Italian regulative framework
Regeocities
2013

http://regeocities.eu/wp-content/uploads/2012/12/Italian-National-report_February-2013.pdf

Linee guida per il rilascio del parere di compatibilita' delle utilizzazioni idriche ad uso di scambio termico con il bilancio idrogeologico
[Lignes directrices pour la question de l'opinion de compatibilité des utilisations de l'eau pour l'utilisation de l'échange de chaleur avec l'équilibre hydrogéologique]
2015

http://www.adbve.it/Documenti/pareriCT/rapporto%20CT%20geotermia_allegato%20parere%20pompe%20calore.pdf

5.5 Royaume-Uni

5.5.1 Ground Source Heat Pump Association (GSHPA)

La GSHPA encourage la croissance et le développement de l'industrie de l'énergie souterraine au Royaume-Uni en publiant, entre autres, des guides de bonnes pratiques d'installation de systèmes géothermiques.

<https://www.gshp.org.uk/>

Quatre de ces guides sont :

Good practice guide for ground source heating and cooling, publié pour la première fois en 2011 par l'*Environment Agency*, mais mis à jour en 2017 sous la bannière de la GSHPA pour fournir de l'information et des conseils aux utilisateurs, consultants et entrepreneurs potentiels de tous types de systèmes de PAC géothermiques.

https://www.gshp.org.uk/GSHPA_GSHC.html

Vertical Borehole Standard, dont la 2e version a été publiée en 2017 et qui traite des systèmes de PAC couplée au sol verticale, notamment de leur conception, installation et matériaux à utiliser.

https://www.gshp.org.uk/GSHPA_Vertical_Borehole_Standard.html

Shallow Ground Source Standard, qui couvre les systèmes de PAC couplée au sol horizontale, en particulier il traite de leur conception, de leur installation et des matériaux à utiliser.

https://www.gshp.org.uk/GSHPA_Shallow_Ground_Source_Standard.html

CP2: Surface Water Source Heat Pumps Code of Practice, publication conjointe datant de 2016 de la *Chartered Institution of Building Services Engineers (CIBSE)*, la *Heat Pump Association (HPA)* et la *GSHPA*. Ce travail a aussi été supporté par le *UK Department for Energy and Climate Change (DECC)*. Ce guide de bonnes pratiques a été produit afin d'élever les normes lors de l'extraction d'eau souterraine et pour stimuler l'adoption de la technologie des systèmes de PAC d'eau de surface.

<https://www.cibse.org/Knowledge/knowledge-items/detail?id=a0q200000090NmPAAU>

5.6 Suède

Depuis 2010, la ville de Stockholm a mis en place sur son site web un service en ligne de demande de permis de forage pour l'installation d'une pompe à chaleur géothermique. Le service est ouvert pour les échangeurs de chaleur au sol destinés aux systèmes résidentiels et pour les pompes à chaleur de moins de 20 kW, et ce, uniquement pour le ou les propriétaires du terrain où serait situé le système. Si le demandeur ne répond pas à ces critères, il doit faire une demande en contactant la ville de Stockholm et ne peut pas utiliser ce service.

Afin d'obtenir un permis de forage, la ville de Stockholm exige que :

- le foreur soit certifié selon le schéma de certification suédois;
- le forage et l'installation soient conformes au guide "Normbrunn-07" (voir le lien dessous), un guide suédois sur les règles de l'art;
- le demandeur ait présenté sa demande sur www.ledningskollen.se, un site web qui localise les câbles électriques, de télécommunication et de communication.

La ville de Stockholm enverra alors des avis et demandes d'information :

- le cas échéant, aux voisins qui peuvent être affectés par l'installation. Conformément à la loi nationale, ces derniers ont le droit d'exprimer leur opinion.
- à la Compagnie des eaux, la compagnie de gaz, au réseau de chauffage et à la société de télécommunication.

Lors de la demande en ligne, le demandeur sera invité à placer son puits sur une carte interactive, puis à remplir la demande avec les détails nécessaires de l'installation.

Normbrunn-7

Att borra brunn för energi och vatten – en vägledning

[Guide de bonnes pratiques du forage pour l'eau et l'énergie]

2008

<http://resource.sgu.se/produkter/broschyror/normbrunn-07.pdf>

5.7 Le projet ReGeoCities (Europe)

Le projet ReGeoCities est dédié à l'atteinte des objectifs fixés dans les plans d'action nationaux en faveur des énergies renouvelables (*National Renewable Energy Action Plans* ou NREAP) pour 2020, dans lesquels certains pays européens ont fixé des objectifs ambitieux en matière de géothermie de faible température. Ce projet vise donc à promouvoir l'aménagement de puits géothermiques peu profonds et à établir les barrières administratives et réglementaires au niveau local et régional.

Les objectifs du projet sont de :

- surmonter les obstacles concernant la réglementation et les procédures administratives liés à l'exploitation des ressources géothermiques peu profondes.
- transférer les meilleures pratiques issues des régions les plus matures vers les régions actuellement moins avancées.
- réaliser des documents de recommandations pour développer un cadre préliminaire normatif commun.
- solliciter l'engagement de certaines administrations locales pour la mise en œuvre des résultats du projet.
- développer un programme de formation axé sur les groupes cibles (personnel administratif des villes et des régions).
- développer le concept ville intelligente (en anglais, *smart cities*) intégrant les systèmes géothermiques.

Les trois principaux guides proposés dans le cadre de ce projet sont les suivants :

D2.2: Cadre administratif et réglementaire de l'énergie géothermique superficielle en Europe

Septembre 2013

<http://regeocities.eu/wp-content/uploads/2012/12/D2.2-FR.pdf>

D3.1: Best Practice Analysis Report

Europe

Décembre 2013

<http://regeocities.eu/wp-content/uploads/2014/06/D3-1-Best-Practice-Analysis-Report.pdf>

- Ce guide examine et catégorise les bonnes pratiques identifiées dans les régions parvenues à maturité en vue de fournir un contexte pour l'élaboration de recommandations pour les cadres réglementaires.

D3.4: Recommendation guidelines for a common European regulatory framework

Europe

Juin 2015

<http://regeocities.eu/wp-content/uploads/2012/12/Regulation-Recommendations-FINAL.pdf>

- Dans ce guide, les cadres législatifs et réglementaires de dix pays de l'Union européenne ont été passés en revue, soulignant les meilleures pratiques qui ont soutenu le développement de ce marché dans les régions matures telles que la Suède, l'Allemagne, la France et le Danemark.
- Les recommandations proposent un processus administratif simple, centralisé et en ligne, qui différencie les exigences requises pour autoriser soit des petits systèmes résidentiels, soit des systèmes commerciaux ou institutionnels plus imposants. Un processus plus complexe est recommandé pour des systèmes plus importants, incluant l'évaluation des risques, l'évaluation de l'impact environnemental, le permis d'autorisation et le suivi du système.

5.8 Norme internationale

5.8.1 International Ground Source Heat Pump Association (IGSHPA)

La IGSHPA est une organisation internationale à but non lucratif dirigée par ses membres, qui a été créée en 1987 dans le but de faire progresser la technologie des PAC géothermiques, autant au niveau local qu'étatique, national ou international. L'IGSHPA, dont le siège est situé sur le campus de l'Oklahoma State University à Stillwater, en Oklahoma, utilise des installations modernes pour la formation et la recherche sur l'installation de systèmes géothermiques de basse température. Ayant accès aux avancées les plus récentes de l'industrie de la géothermie, l'IGSHPA fait le pont entre les dernières technologies disponibles et les personnes qui bénéficient de ces développements.

En 2017, l'IGSHPA a publié un guide de bonnes pratiques, qui énumère les normes de l'industrie pour protéger l'environnement et les ressources naturelles ainsi que pour assurer la performance thermique des composantes critiques d'un système de PAC couplée au sol: *Closed-Loop/Geothermal Heat Pump Systems Design and Installation Standards*. Ces normes peuvent devenir la référence auprès des professionnels des pays qui n'ont pas leurs propres réglementations sur les systèmes géothermiques ou lorsqu'elles sont recommandées par les organismes subventionnaires.

<https://igshpa.org/standards>

6. REVUE DE LA LITTÉRATURE SCIENTIFIQUE

L'objectif de cette section est de passer en revue la littérature scientifique récente, c'est-à-dire de 2010 à aujourd'hui, concernant les systèmes de PAC géothermique et les réglementations et/ou directives techniques existantes dans plusieurs pays en lien avec l'environnement.

Les impacts environnementaux sont principalement liés à l'augmentation ou la baisse de la température de l'eau souterraine lors de l'exploitation des systèmes géothermiques, qui influence ses propriétés chimiques (Arning et al., 2006), biologiques (Briemann et al., 2011, Hall et al., 2008) et physiques (Bonte et al., 2011b). Haehnlein et al. (2013) brossent un portrait des processus biologiques et physiques possiblement en cause, de leurs effets ainsi que leur impact potentiel sur les systèmes de PAC géothermique d'aquifère et sur l'eau souterraine elle-même (Tableau 1). En effet, il existe plusieurs processus chimiques et biologiques qui favorisent le colmatage des puits et qui peuvent donc entraîner une diminution significative de la capacité de production et compromettre la durabilité technique du système géothermique. Le colmatage est donc un effet important pour les systèmes géothermiques ouverts. En revanche, une activité microbiologique accrue ne montre qu'une faible augmentation de la corrosion des composants du système. Le Tableau 2 donne un aperçu général de la façon dont les systèmes de PAC géothermique d'aquifère et couplées au sol peuvent affecter l'aquifère à l'intérieur d'une zone appelée « zone affectée par la température » (ZAT, en anglais *temperature affected areas* ou TAA).

Tableau 1. Processus pouvant affecter la composition des eaux souterraines, leurs effets, conséquences et impacts potentiels sur l'environnement et les systèmes de PAC géothermique d'aquifère (adapté de Haehnlein et al., 2013). L'importance de l'impact est : (++) élevé, (+) modéré, (-) faible, (- -) très faible.

Processus	Effets	Conséquences	Impact potentiel	Importance
Augmentation de température	Activité microbiologique accrue	Précipitation minérale	Colmatage du puits	++
			Présence de biofilms	+
		Encrassement biologique		-
	Augmentation de la solubilité minérale (par ex. : fer, manganèse)	Production de limon		-
		Explosion de masse (croissance rapide d'algues et de bactéries)	Colmatage du puits	--
		Sédimentation d'ocre de fer		++
Diminution de la température	Augmentation de la solubilité du CO ₂	Augmentation de la charge en carbonate	Corrosion	-
			Colmatage du puits	++
Croissance d'algues	Réduction du pH en éliminant le CO ₂	Précipitation minérale	Colmatage du puits	++
Liquéfaction des argiles (sollifluxion)	Augmentation du nombre de forages		Changements dans le régime de flux	-
	Accumulation de matériel		Colmatage du puits	-

Tableau 2. Conséquences et influences sur les systèmes de PAC géothermique d'aquifère et couplées au sol à l'intérieur de la ZAT (adapté de Haehnlein et al., 2013). L'importance de l'impact est : (+ +) élevé, (+) modéré, (-) faible, (- -) très faible. ^a pour les systèmes individuels; ^b pour les systèmes multiples.

Conséquences	Aquifère		Couplée au sol	
	Système	ZAT	Système	ZAT
Croissance d'algues	+	+	-	+
Apparition d'anomalies de température	-	+	-	+
Changements dans la communauté bactérienne et faunique		+		?
Changements dans l'activité microbiologique	+	+	-	+
Perte d'intégrité du coulis (<i>debonding</i>)	-	-	+	-
Augmentation de la solubilité du gaz	-	++	-	+
Perforation des couches hydrologiques imperméables	+	-	+	-
Rétroaction (<i>feedback</i>) hydrologique		+		-
Influence sur l'écosystème de surface	-	+	-	++
Solifluxion	-	+	-	-
Rétroaction (<i>feedback</i>) thermique		+		- ^a / + ^b

6.1 Système de PAC d'aquifère

Les articles présentés dans cette section portent exclusivement sur les PAC d'aquifère et principalement sur les systèmes verticaux à boucle ouverte et fermée, ainsi que les réglementations européennes qui y sont liées, puisque la littérature y est plus abondante.

Arning, E., Kölling, M., Panteleit, B., Reichling, J., Schulz, H.D., 2006. Effect of near surface thermal extraction on geochemical processes in aquifer. *Grundwasser* 11: 27-39.

<https://doi.org/10.1007/s00767-006-0116-0>

- *Démontre que l'utilisation géothermique des aquifères près de la surface conduit à des changements de température affectant l'équilibre géochimique des minéraux, pouvant ainsi générer la précipitation et la dissolution de minéraux.*

Bonte, M., Stuyfzand, P.J., Berg, G.A. v.d., Hijnen, W.A.M., 2011a. Effects of aquifer thermal energy storage on groundwater quality and the consequences for drinking water production: a case study from the Netherlands. *Water Science & Technology*, 63 : pp. 1922-1931.

<https://doi.org/10.2166/wst.2011.189>

- *Présente des données acquises à partir d'un système de stockage d'énergie thermique au sein d'un aquifère (en anglais, aquifer thermal energy storage ou ATEs) afin d'évaluer la relation entre la mise en fonction du système et la production d'eau potable.*

Bonte, M., Stuyfzand, P.J., Hulsmann, A., Van Beelen, P., 2011b. Underground thermal energy storage: environmental risks and policy developments in the Netherlands and European Union. *Ecology and Society* 16(1): 22. <http://www.ecologyandsociety.org/vol16/iss1/art22/>

- *Aperçu des risques que le stockage souterrain de l'énergie thermique (en anglais, Underground Thermal Energy Storage ou UTEs) peut imposer à l'eau souterraine, aux systèmes d'approvisionnement en eau potable et à l'environnement souterrain en général. Les politiques existantes et les accords de licence aux Pays-Bas y sont décrites, ainsi que la capacité du cadre politique et*

légal néerlandais actuel et futur afin de minimiser ou d'atténuer les risques sur les ressources en eaux souterraines.

Briellmann, Lueders, K.T., Schreglmann, K., Ferraro, F., Avramov, M., Hammerl, V., Blum, P., Bayer, P., Griebler, C., 2011. Shallow geothermal energy usage and its potential impacts on groundwater ecosystems. *Grundwasser*, 16: 77-91. <https://doi.org/10.1007/s00767-011-0166-9>

- *Émet des recommandations pour la conception, l'autorisation, la construction et l'exploitation d'installations géothermiques peu profondes d'une manière écologiquement durable.*

Dehkordi, S.E. et Schincariol, R.A., 2014. Guidelines and the design approach for vertical geothermal heat pump systems: current status and perspective. *Revue canadienne de géotechnique* 51(6): 647-662. <https://doi.org/10.1139/cgj-2012-0205>.

- *Vise à améliorer la situation actuelle en matière de réglementation et de conception au Canada en la plaçant dans une perspective internationale afin de sensibiliser davantage les autorités canadiennes et les professionnels associés. Il propose des lignes directrices pour la conception de PAC d'aquifères.*

Goodman, R., Pasquali, R., Jones, G., Reay, D., Earls, G., Jaudin, F., Fouillac, C., Sanner, B., Dumas, P., Boissavy, C., Kepinska, B., Bujakowski, W., Klima, K., Heekeren, T.H.V.v., Bussman, W., Rueter, H., Schramadei, R., 2009. Geothermal Regulation Framework. *GeoThermal Regulation for Heat (GTR-H)*, p. 24. http://www.geoelec.eu/wp-content/uploads/2012/11/GTRH_final_Framework_Nov09.pdf

- *Présente les conclusions du projet GeoThermalRegulation - Heat (GTR-H), qui a examiné et établit les obstacles réglementaires et les lacunes dans le secteur géothermique à travers un processus de discussion et de consultation avec les principaux acteurs cibles et parties prenantes au niveau national en Hongrie, en Irlande, en Irlande du Nord ainsi qu'en Pologne. Une revue des meilleures pratiques dans les cadres réglementaires géothermiques en France, en Allemagne et aux Pays-Bas avait également été effectuée afin de fournir l'apport nécessaire pour concevoir un cadre possible pour la mise en œuvre des réglementations géothermiques.*

Haehnlein, S., Bayer, P., Blum, P., 2010. International legal status of the use of shallow geothermal energy. *Renew. Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14(9): 2611-2625. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.069>

- *Fournit un aperçu de la législation concernant les PAC géothermique dans 60 pays. Leurs résultats montrent une grande diversité pour les distances minimales requises entre les systèmes et les seuils de variations de température de l'eau souterraine considérés acceptables. Cette publication met en évidence le fait que les pays européens sont parmi les pays les plus réglementés dans ce domaine. Malgré tout, les valeurs limites statiques semblent manquer de support scientifique.*

Hähnlein, S., Bayer, P., Ferguson, G., Blum, P., 2013. Sustainability and policy for the thermal use of shallow geothermal energy. *Energy Policy* 59: 914-925. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.04.040>

- *Fournit un aperçu complet des conséquences des systèmes géothermiques sur les aquifères peu profonds et démontre qu'il y a encore un manque de connaissances sur les performances de ces systèmes à long terme.*

- Majuri, P., 2016. Ground source heat pumps and environmental policy - the Finnish practitioner's point of view. *Journal of Cleaner Production* 139 : 740–749. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.017>
- *Regard pratique sur le développement de l'industrie des PAC géothermique en Finlande et sur les politiques et réglementations nationales concernant l'industrie.*
- Rizzi, F., Frey, M., Iraldo, F., 2011. Towards an integrated design of voluntary approaches and standardization processes: An analysis of issues and trends in the Italian regulation on ground coupled heat pumps. *Energy Conversion and Management* 52(10): 3120-3131. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2011.04.006>
- *Discute des projets potentiels italiens visant à rendre plus accessibles les exigences obligatoires et volontaires en utilisant des techniques basées sur un outil de stratégie d'entreprise permettant de déterminer les options offertes dans le domaine des PAC géothermique couplées au sol et en examinant les opinions des leaders sectoriels.*
- Somogyi, V., Sebestyén, V. et Nagy, G., 2017. Scientific achievements and regulation of shallow geothermal systems in six European countries - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 68: 934-952. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.02.014>
- *Revue de la littérature scientifique récente sur les PAC géothermique et les réglementations et/ou directives techniques existantes dans six pays européens (l'Italie, l'Allemagne, l'Espagne, le Royaume-Uni, la France et la Suède), où l'accent est mis sur les effets environnementaux causés par les systèmes verticaux à boucle ouverte et fermée.*

6.2 Système de PAC couplée au sol

Cette section présente les publications dédiées aux PAC couplées au sol et leurs impacts potentiels sur la qualité des eaux souterraines, notamment les risques liés à l'utilisation de différents fluides caloporteurs.

- Bucci, A., Prevot, A.B., Buoso, S., (...), Malandrino, M., Maurino, V., 2018. Impacts of borehole heat exchangers (BHEs) on groundwater quality: the role of heat-carrier fluid and borehole grouting. *Environmental Earth Sciences* 77:175. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7375-9>
- *Analyse le rôle de deux caractéristiques techniques des échangeurs de chaleur dans les trous de forage de boucle fermée sur la qualité des eaux souterraines : l'utilisation du propylène glycol et d'autres additifs dans les fluides caloporteurs, ainsi que le coulis de remplissage.*
 - *Étudie l'utilisation 1) du propylène glycol et d'autres additifs dans les fluides caloporteurs et 2) du coulis de remplissage et leurs impacts sur la performance des échangeurs de chaleur dans les trous de forage de boucle fermée, ainsi que sur la qualité des eaux souterraines.*
- Dehkordi, S.E. et Schincariol, R.A., 2014. Guidelines and the design approach for vertical geothermal heat pump systems: current status and perspective. *Revue canadienne de géotechnique* 51(6): 647-662. <https://doi.org/10.1139/cgj-2012-0205>.
- *Présente des lignes directrices visant à améliorer la situation actuelle en matière de réglementation et de conception au Canada en la plaçant dans une perspective internationale afin de sensibiliser davantage les autorités canadiennes et les professionnels associés.*

- Heinonen, E.W., Wildin, M.W., Beall, A.N., Tapscott, R.E. 1997. Assessment of antifreeze solutions for ground-source heat pump systems. ASHRAE Transactions 103(2): 747-756. <https://www.osti.gov/biblio/349994>
- *Article du US Department of Energy évaluant les risques liés à l'utilisation de six différents fluides caloporteurs (méthanol, éthanol, acétate de potassium aqueux, propylène glycol, acétate de calcium et de magnésium aqueux, et urée aqueuse) comme antigels pour les systèmes de PAC géothermique.*
- Heinonen, E.W., Wildin, M.W., Beall, A.N., Tapscott, R.E. 1998. Anti-freeze fluid environmental and health evaluation - an update. In Proceedings of the Second Stockton International Geothermal Conference, 16-17 March 1998. 11 p. https://talon.stockton.edu/eyos/energy_studies/content/docs/proceedings/HEINO.PDF
- *Compte-rendu de conférence présentant des données préliminaires concernant les risques liés à l'environnement et la santé que pourraient causer les fluides caloporteurs utilisés ou proposés comme solutions antigels dans les systèmes de PAC géothermique.*
- Kim, Y.-S., Do, T.M., Kim, M.-J., Kim, B.-J., Kim, H.-K., 2018. Utilization of by-product in controlled low-strength material for geothermal systems: Engineering performances, environmental impact, and cost analysis. Journal of Cleaner Production 172: 909-920. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.260>
- *Évalue la faisabilité d'utiliser un matériau de remplissage composé de sous-produits comme coulis pour les systèmes géothermiques.*
- Klotzbücher, T., Kappler, A., Straub, K.L., Haderlein, S.B., 2007. Biodegradability and groundwater pollutant potential of organic anti-freeze liquids used in borehole heat exchangers. Geothermics 36: 348-361. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2007.03.005>
- *Évalue le potentiel de contamination des eaux souterraines par les différents antigels organiques (éthylène glycol, propylène glycol et bêtaïne) utilisés dans les PAC géothermique, en se fondant sur une analyse théorique de leur biodégradabilité et des résultats expérimentaux réalisés en laboratoire sur différents types de sols perméables.*
- Majuri, P., 2018. Technologies and environmental impacts of ground heat exchangers in Finland. Geothermics 73: 124-132. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2017.08.010>
- *Examine les types et les pratiques de construction des PAC géothermique couplées au sol, et la gamme de problèmes rencontrés par les praticiens finlandais, donc dans un climat froid et un substrat rocheux cristallin.*
- Oriol, L. 2010. Ground source heat pumps: development prospect in France. Degree Project. Department of Land and Water Resources, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden
- *Rapport suédois présentant le potentiel de développement de pompes à chaleur géothermiques en France.*
- Schmidt, K.R., Körner, B., Sacher, F., Conrad, R., Hollert, H., Tiehm, A., 2016. Biodegradability and ecotoxicity of commercially available geothermal heat transfer fluids. Grundwasser 21: 59-67. <https://doi.org/10.1007/s00767-015-0311-y>
- *Évalue la biodégradabilité et l'écotoxicité des fluides de transfert de chaleur disponibles dans le commerce et utilisés dans les échangeurs de chaleur géothermique basé sur leur composition.*

Zhu, K., Fang, L., Diao, N., Fang, Z., 2017. Potential underground environmental risk caused by GSHP systems. *Procedia Engineering* 205: 1477-1483. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.371>

- *Tour d’horizon des risques environnementaux souterrains causés par les systèmes géothermiques à boucle fermée en se basant sur des études sur le terrain et principalement sur des mesures de température.*

6.3 Système de PAC d’eau de surface

Seulement deux publications ont été trouvées dans la littérature sur des systèmes de PAC d’eau de surface.

Spitler, J.D. et Mitchell M.S., 2016. Surface water heat pump systems. *Advances in Ground-Source Heat Pump Systems*, Chapitre 8 : 225–246. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100311-4.00008-X>

- *Ce chapitre de livre résume l’état des connaissances dans la conception et la performance des systèmes de PAC d’eau de surface.*

Wang, M. et Yu, Y., 2013. Analysis of water heat pollution of thermal discharge in surface water source heat pump system. *Applied Mechanics and Materials* 368-370(1): 364-368. <https://www.scientific.net/AMM.368-370.364>

- *Cette étude résume les causes et les risques reliés à la pollution thermique des systèmes de PAC d’eau de surface et examine ses caractéristiques afin de proposer des mesures préventives pour résoudre le problème.*
- *L’étude conclut que le rejet des systèmes de PAC d’eau de surface dans les cours d’eau peuvent modifier localement la température de l’eau, et que cette de pollution thermique peut atteindre différents degrés selon le type de cours d’eau (lac, rivière, océan).*

7. SYNTHÈSE

Dans de nombreux pays, l'installation de PAC d'aquifère relève des réglementations relatives aux puits d'approvisionnement en eau, tandis que les systèmes de PAC couplée au sol ne sont pas réglementés, car ils n'extraient pas d'eau du sous-sol. La vue d'ensemble des cadres juridiques présentés dans les rapports nationaux montre que seuls quelques pays incluent les systèmes horizontaux dans leurs règlements. Par exemple, en France, où cette technologie des capteurs horizontaux représente une part importante du marché pour les particuliers, elle n'est ni réglementée ni enregistrée (RegeoCities, 2013).

L'absence de procédures régulatrices ou de recommandations de bonnes pratiques pour les systèmes géothermiques pourrait être un problème en ce qui concerne le développement futur du secteur de la géothermie de basse température (contraintes d'espace, conflits d'usage, défauts de conception et impacts environnementaux). Par ailleurs, les réglementations qui diffèrent d'une région à l'autre rendent difficile leur prise en compte pour les constructeurs et autres professionnels. Selon les pays, même les autorités locales peuvent être impliquées dans les procédures en matière de systèmes géothermiques. Ainsi, une forte implication locale semble nécessaire dans les zones densément peuplées (p. ex. Stockholm, en Suède).

Une conclusion importante qui ressort de cette revue de littérature scientifique et sa confrontation avec la législation des différents pays est que les réglementations ne tirent pas parti des recherches ou du moins qu'il y a un retard dans leur mise en œuvre. Il est bien connu que les changements de température de l'eau souterraine peuvent influencer ses propriétés physiques, ses réactions chimiques, sa microbiologie et l'interaction de ces facteurs entre eux. Ceci est important, particulièrement dans les régions où l'eau souterraine sert de source d'approvisionnement en eau potable. En outre, les aquifères représentent des milieux qui ne se renouvellent pas rapidement et qui, une fois affectés par des activités anthropiques, peuvent difficilement revenir à leur état initial. Par conséquent, les effets à long terme des systèmes de PAC géothermique doivent être soigneusement pris en compte afin de trouver un équilibre dans une région donnée entre l'utilisation de l'eau souterraine pour l'approvisionnement en eau potable, l'utilisation de l'eau souterraine par les PAC et/ou l'installation de systèmes de PAC. Haehnlein et al. (2010) résumant les critères pour une utilisation thermique durable des eaux souterraines et ces derniers sont présentés au Tableau 3. Ces critères sont repris dans les sections 7.1 à 7.3 pour les différents systèmes de PAC géothermique et les normes et exigences existantes y sont présentées.

Tableau 3. Critères qui devraient être pris en compte dans les législations pour assurer une utilisation durable de la chaleur géothermique des eaux souterraines (inspiré de Haehnlein et al., 2010) avec les objectifs visés.

Critère	Objectif
Intégrité du puits géothermique	Prolonger la vie du système Protéger les eaux souterraines en tant que ressource d'eau potable Éviter les fuites de matériaux dangereux (par exemple fluide caloporteur, fluide de forage, contaminants secondaires tels que l'huile des véhicules et de foreuses, etc.) Éviter les changements dans l'écologie des eaux souterraines Éviter les liens hydrauliques entre les différents systèmes aquifères
Distances minimales	Éviter les changements de température Éviter les interactions avec d'autres systèmes géothermiques peu profonds Éviter toute influence sur d'autres systèmes techniques (puits d'eau potable, conduites d'eau, terrain avoisinant)
Seuils de température à ne pas dépasser dans l'aquifère	Éviter les changements dans l'écologie des eaux souterraines Protéger les eaux souterraines Prolonger la vie du système

7.1 Systèmes de PAC d'aquifère

Les PAC d'aquifère impliquent l'extraction d'eau souterraine et ont potentiellement des implications environnementales plus importantes que des systèmes de PAC couplées au sol, nécessitent généralement des évaluations hydrogéologiques plus approfondies et font, de ce fait, intervenir davantage de dispositions réglementaires. Ce type de système constitue toutefois moins de 10 % des systèmes installés au Québec dans le secteur résidentiel (CCÉG, 2012).

7.1.1 Intégrité du puits

Exigences au Québec

L'article 28 du chapitre IV du RPEP stipule qu'un système de géothermie qui prélève de l'eau doit être aménagé conformément aux conditions suivantes :

- 1) le système doit être approvisionné exclusivement en eaux souterraines;
- 2) le système doit retourner l'eau dans l'aquifère d'origine sans que l'eau ne soit entrée en contact avec des substances susceptibles d'en modifier sa qualité.
- 3) l'installation de prélèvement d'eau et l'installation du système de rejet doivent respecter les normes applicables à une installation de prélèvement d'eau souterraine prévues aux articles 12 à 26, avec les adaptations nécessaires.

Exigences dans les autres juridictions

Lorsque des guides de bonnes pratiques ou des règlements existants sont en place pour la conception, le forage et/ou l'essai des puits d'eau souterraine, ils doivent s'appliquer à la réalisation de tout forage géothermique et les règlements locaux doivent y faire référence.

Recommandations de la communauté scientifique ou normes techniques

Les techniques de forage et de construction des puits pour la protection des eaux souterraines sont couvertes par la norme technique C448 de la CSA « *Design and installation of ground source*

heat pump systems for commercial and residential buildings », ainsi que le guide de bonnes pratiques de l'IGSHPA « *Closed-Loop/Geothermal Heat Pump Systems Design and Installation Standards* ». Ces deux normes techniques demeurent les références dans le domaine et sont en constante évolution, publiant une nouvelle édition environ aux cinq à dix ans.

Constats

Une construction adéquate des forages géothermiques pour les systèmes de PAC d'aquifère est essentielle pour limiter les impacts environnementaux et assurer un fonctionnement adéquat des systèmes. Les exigences de conception, de méthode et de construction des forages devraient être axées sur les concepts clés suivants :

- protection des masses d'eau souterraine et maintien d'un seuil critique de température;
- la prévention de la contamination croisée de l'aquifère avec d'autres unités géologiques;
- la protection des prélèvements d'eau souterraine lorsque ceux-ci sont destinés à l'alimentation en eau publique ou privée.

Lors de la réalisation des forages, des mesures doivent être prévues pour prévenir ou réduire la probabilité de migration de gaz naturellement contenu dans le sous-sol, telles que le recommandent les *Oil, Gas and Salt Resources of Ontario - Provincial Operating Standards*. Les données sur les occurrences de migration de gaz devraient être consultées afin d'identifier les zones à risques, soit les unités géologiques riches en matière organique. Au Québec, ces unités sont le Groupe de Trenton, le Shale d'Utica ainsi que le Groupe de Lorraine.

7.1.2 Distances minimales

Exigences au Québec

Le chapitre III du RPEP établit le cadre pour l'installation de systèmes de prélèvement d'eau et l'article 17 fait état des distances minimales qui doivent être respectées :

- l'installation doit être située à une distance de 15 m ou plus d'un système étanche de traitement des eaux usées;
- l'installation doit être située à une distance de 30 m ou plus d'un système non étanche de traitement des eaux usées ou, si le puits est scellé conformément à l'article 19, à une distance de 15 m ou plus d'un tel système;
- l'installation doit être située à une distance de 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.

Q-2, r. 35.2 - Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection

Article 17

Date d'entrée en vigueur : 2015-03-02

<http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/showversion/cr/Q-2,%20r.%2035.2?code=se:17&pointInTime=20180323#20180323>

Exigences dans les autres juridictions

Dans la plupart des pays, il n'y a toujours pas de réglementation en ce qui a trait aux distances entre deux systèmes géothermiques (Tableau 4). Pour le moment, ces systèmes sont donc majoritairement confondus avec les autres systèmes de prélèvement d'eau souterraine.

En ce qui a trait aux distances minimales avec d'autres types d'installations, la norme CSA C448 suggère ceci :

- 15 m d'un puits d'eau potable;
- 15 m d'une fosse septique et 30 m d'un champ d'épuration;
- 30 m d'une source (ou résurgence, en anglais, *spring*).

Ces distances sont semblables à celles émises dans le RPEP pour un puits de prélèvement d'eau potable.

Tableau 4. Résumé des distances minimales entre deux systèmes géothermiques, selon les juridictions étudiées.

	Distances minimales (m) entre deux systèmes géothermiques	Explications
Danemark		
PAC d'aquifère	-	
PAC couplée au sol	20	
Italie		
PAC d'aquifère	-	
PAC couplée au sol	-	
Pays-Bas		
PAC d'aquifère	-	L'évaluation des effets qui accompagne chaque demande de permis doit prouver qu'il n'y a pas d'effets négatifs sur les systèmes environnants.
PAC couplée au sol	5 - 10	

Recommandations de la communauté scientifique ou normes techniques

La communauté scientifique étudie plutôt les changements de température du sol causée par les systèmes géothermiques qui dépendent, entre autres, des propriétés thermiques du sous-sol variant d'une région à l'autre. Donc, comme les distances minimales devraient être adaptées selon la géologie d'une région, il est proposé de seulement encadrer la variation de la température du sous-sol lorsque la distance entre deux systèmes géothermiques est en cause. Les distances entre les puits d'un système de PAC et d'autres ouvrages souterrains, comme les puits de captage d'eau souterraine et les fosses septiques, peuvent quant à elles être réglementés face au transport des contaminants dans l'eau souterraine.

Constats

Pour les PAC d'aquifère de taille résidentielle, les conditions hydrogéologiques régissent la productivité d'un aquifère et des réglementations pour les prélèvements d'eau domestique et à petite échelle peuvent être abordées et s'inspirer de la réglementation existante sur le captage des eaux souterraines provenant des approvisionnements en eau domestique. Pour les systèmes plus importants, une évaluation des risques et/ou une étude d'impact sur l'environnement peuvent permettre de démontrer les impacts opérationnels potentiels à long terme des systèmes sur l'environ-

nement récepteur. Selon les caractéristiques locales du sous-sol, des distances minimales de sécurité pour l'emplacement de forage pour les systèmes résidentiels sont généralement considérées, selon la présence des éléments suivants à proximité :

- approvisionnement en eau public
- approvisionnement en eau privé
- autre source souterraine ou autre système géothermique
- bâtiment et toute infrastructure construite.

Par ailleurs, les distances séparatrices incluses dans le RPEP pour l'installation de systèmes de prélèvement d'eau semblent être conformes aux exigences des autres juridictions et normes techniques comme CSA C448 pour les systèmes de PAC d'aquifère.

7.1.3 Seuils de température

Exigences au Québec

Rien dans la loi du Québec ne fait mention d'exigences en ce qui a trait aux changements de température du sous-sol causés par des systèmes de PAC géothermique d'aquifère, ou pour tout autre type d'échangeur de chaleur au sol.

Exigences dans les autres juridictions

Pour prévenir les changements préjudiciables en ce qui a trait aux caractéristiques des eaux souterraines, des réglementations sont incorporées au niveau national de certains pays tels que les Pays-Bas, le Danemark et l'Allemagne. Dans la plupart des pays, il n'y a toujours pas de réglementation. Les quelques réglementations existantes comprennent généralement des valeurs seuils pour la température de réinjection des eaux souterraines. Les températures minimales et maximales absolues des eaux souterraines les plus couramment utilisées pour l'approvisionnement d'un système de PAC assurant le chauffage et le refroidissement sont respectivement de 5 °C et 25 °C (Tableau 5). Ces valeurs seuils pour les températures des eaux souterraines sont généralement définies pour minimiser les impacts sur les écosystèmes. Parfois, les réglementations nationales, telles que celles d'Allemagne, peuvent contenir des incohérences et, fréquemment, les réglementations ne sont en fait que des recommandations et ne sont donc pas juridiquement contraignantes.

Tableau 5. Résumé des températures minimums et maximums permises pour la réinjection d'eau souterraine ou du fluide caloporteur pour différents systèmes géothermiques, selon les juridictions étudiées.

	Température (°C) de l'eau de réinjection		Variation de température de l'eau de réinjection (°C)	Explications
	Min.	Max		
Danemark				
PAC d'aquifère	2	20 - 25	–	La température de l'eau de réinjection ne doit pas dépasser 25 °C, tandis que la moyenne mensuelle ne doit pas dépasser 20 °C
PAC couplée au sol	2	–	–	
France				
PAC d'aquifère	–	–	11	
PAC couplée au sol	–	–	–	
Italie				
PAC d'aquifère	–	–	–	
PAC couplée au sol	–	–	3 - 5	Seulement dans la région de Lombardi
Pays-Bas				
PAC d'aquifère	5	25	–	Au-dessous de 25 °C, aucun signe de changement de la qualité de l'eau (chimique et microbiologique) n'a été observé jusqu'à maintenant
PAC couplée au sol	–	–	–	

Recommandations de la communauté scientifique ou normes techniques

Un seuil de température pour les systèmes de petite taille devrait être défini selon Somogyi et al. (2017). Le concepteur devrait garantir que les puits voisins répertoriés ne seront pas affectés, c'est-à-dire que la baisse de température au niveau des puits voisins sera inférieure à 0,5 °C. Ainsi, la surveillance (*monitoring*) de ces puits devrait donc être mise en œuvre afin de pouvoir appliquer ce paramètre.

Des changements dans la composition de la communauté bactérienne et dans sa diversité augmentent avec la hausse des températures, mais aucun impact significatif sur son abondance ou sa prolifération n'a été documenté. Pour les PAC d'aquifère, une température maximale de l'eau de réinjection de 20-25 °C semble acceptable, ainsi qu'une différence maximale de ± 5 °C entre l'eau souterraine extraite et réinjectée.

Constats

Typiquement au Québec, le bilan des charges au sol lors de l'utilisation de systèmes de PAC géothermique, pour les bâtiments résidentiels et les bâtiments commerciaux de petite taille, mène plus fréquemment à un abaissement des températures du sous-sol et non à une augmentation des températures. En effet, la période de chauffage est plus grande que celle de climatisation, ce qui globalement, entraîne plus d'extraction de chaleur au sous-sol que d'injection. Les effets de hausse de température sont ainsi moins importants au Québec.

Néanmoins, une modélisation détaillée du mode de chauffage et/ou de refroidissement pour les systèmes de grande taille ou puissance afin d'évaluer les changements hydrologiques, chimiques,

thermiques et microbiologiques, ainsi que les impacts sur les autres utilisateurs du sous-sol pourrait s'avérer judicieuse. En effet, les règles générales et les directives qui s'appliquent dans le cas de systèmes résidentiels sont inadéquates pour les systèmes de grande puissance.

Les facteurs qui déterminent l'impact d'un système de PAC d'aquifère sont la géologie, l'hydrogéologie de l'aquifère ainsi que les propriétés hydrauliques, les conditions chimiques et microbiologiques. Des cartes de la vulnérabilité des aquifères, de l'environnement récepteur et des utilisateurs environnants, y compris ceux dans lesquels l'approvisionnement public en eau ou d'autres utilisateurs sensibles pourraient restreindre le déploiement de PAC d'aquifère, seraient utiles pour mieux évaluer l'impact environnemental. Selon la revue de littérature réalisée, les critères les plus adéquats à considérer pour encadrer les PAC d'aquifère sont :

- des changements de température acceptables;
- des quantités maximales d'extraction d'énergie/chaleur totale des systèmes géothermiques en place.

7.2 Systèmes de PAC couplée au sol

7.2.1 Intégrité du puits

L'espace entre la paroi du trou de forage et l'échangeur de chaleur, c'est-à-dire l'annulus, est habituellement rempli d'un matériel tel qu'un coulis géothermique fait de bentonite. Celui-ci réduit l'efficacité thermique de l'échangeur de chaleur, mais protège l'eau souterraine contre l'introduction d'eau de surface pouvant potentiellement être contaminée et l'échange d'eau souterraine entre les différentes couches aquifères. Du sable est généralement ajouté au coulis pour augmenter son efficacité thermique, mais la quantité ne doit pas être trop élevée, sinon le sable pourrait favoriser l'infiltration d'eau. Un exemple est le cas de *Staufen im Breisgau* en Allemagne où un remplissage inadéquat autour des échangeurs de chaleur a exposé une unité géologique riche en sulfates d'anhydrite à de l'eau, causant un gonflement du sol et des dommages à plus de 250 maisons (Oriol, 2010). Il est toutefois à noter qu'un tel problème n'est pas susceptible de se produire au Québec puisque ce type de formations géologiques y est absent, sauf aux Îles-de-la-Madeleine.

Un fluide caloporteur, généralement un mélange eau-antigel, est utilisé pour extraire la chaleur souterraine et la transporter dans le système géothermique. Un antigel est évalué en fonction de facteurs tels que ses propriétés thermiques, sa viscosité, sa toxicité, sa biodégradabilité (aérobie et anaérobie), sa demande biologique en oxygène, sa corrosivité et son inflammabilité (Heinonen et al., 1997; 1998).

Exigences au Québec

Conformément à l'article 29 du RPEP, un système de PAC géothermique couplée au sol doit être aménagé conformément aux conditions suivantes :

- 1) le système ne doit pas être situé sur un littoral, sur une rive ou dans une plaine inondable dont la récurrence de débordement est de 20 ans, ni dans une plaine inondable d'un lac ou d'un cours d'eau identifiée sans que ne soient distinguées les récurrences de débordement de 20 ans et de 100 ans;
- 2) les composants situés sous la surface du sol doivent être constitués de matériaux neufs lors de l'implantation du système;
- 3) le système ne peut permettre l'utilisation de l'éthylène glycol, de l'acétate de potassium et de méthanol comme fluide caloporteur pour son fonctionnement;

- 4) les travaux relatifs à l'aménagement du système doivent être réalisés de manière à prévenir la contamination des eaux ou la détérioration du milieu;
- 5) lorsque le système est implanté à plus de 5 m de profondeur dans le sol, la finition du sol en surface au-dessus des composantes souterraines et sur une distance de 1 m autour du système doit empêcher la présence d'eau stagnante et prévenir le ruissellement d'eau en direction de ces composantes;
- 6) si le système est aménagé dans une plaine inondable dont la récurrence de débordement est de 100 ans, il doit être conçu pour résister à une crue de récurrence de débordement de 100 ans et les travaux doivent être réalisés sous la surface du sol;
- 7) l'étanchéité des composantes du système doit être évaluée avant la mise en exploitation du système.

Exigences dans les autres juridictions

En Amérique du Nord et dans la majeure partie de l'Europe, l'annulus est habituellement rempli d'un coulis géothermique fait de bentonite, de sable et d'eau. C'est ce que recommandent la plupart des normes, bien qu'il n'y a pas de règlements contraignants à ce niveau. Sous certaines conditions géologiques, telles qu'observées en Suède, aucun matériel de remblayage n'est requis et les trous de forage demeurent alors naturellement remplis d'eau souterraine, ce qui a pour but d'améliorer l'efficacité thermique du système géothermique et de prolonger la durée de vie du forage (Dehkordi et Schincariol, 2014). En effet, des mouvements de convection naturelle se produisent dans l'eau qui remplit l'annulus lorsque la chaleur est injectée ce qui améliore la performance des échangeurs de chaleur. Le non-remplissage de l'annulus a également d'autres avantages à long terme. Il est économiquement avantageux en rendant le trou de forage réutilisable au-delà de la durée de vie normale de la boucle de tuyaux. Cependant, cela est seulement possible avec une très faible épaisseur de sédiments non consolidés au-dessus du socle rocheux.

Une conception intermédiaire consiste à remplir l'annulus de sable de silice et d'y ajouté un bouchon fait de matériaux scellant comme de la bentonite près de la surface. Le sable de silice a une conductivité thermique plus élevée que la bentonite et assure donc une meilleure performance du système qu'avec un coulis de bentonite, alors que le bouchon de matériaux scellant empêche l'infiltration d'eau de surface dans le forage. Ce type d'aménagement est parfois utilisé en Amérique du Nord et au Québec. Cependant, les concepteurs de ce genre de systèmes géothermiques doivent prendre les précautions nécessaires pour ne pas mettre en danger les ressources en eau souterraine. De plus, il arrive parfois qu'il soit techniquement impossible de remplir un forage de coulis géothermique, par exemple en présence d'un écoulement d'eau souterraine avec un gradient hydraulique élevé, car les fines particules de coulis peuvent être entraînées dans l'aquifère lors du remplissage des forages. Du gravier est alors utilisé pour remplir le forage, mais il faut toujours s'assurer de colmater l'ouvrage avec un bouchon près de la surface.

Recommandations de la communauté scientifique ou normes techniques

Lorsque des guides de bonnes pratiques ou des règlements existants sont en place pour la conception, le forage et/ou l'essai des puits d'eau souterraine, ils doivent s'appliquer à la réalisation de tout forage géothermique et les règlements locaux doivent y faire référence.

Constats

Les PAC couplées au sol sont de loin les systèmes géothermiques les plus répandus au Québec, constituant plus de 90 % des systèmes installés dans le secteur résidentiel (CCÉG, 2012). Toute-

fois, la réglementation québécoise demeure modeste à l'heure actuelle. Un aménagement approprié des forages géothermiques pour les PAC couplées au sol est essentiel pour limiter les impacts environnementaux et assurer un fonctionnement adéquat des systèmes. Les éléments techniques à considérer afin de contrôler le risque encouru par l'installation de ce type de système sont les suivants :

- protection des aquifères, entre autres via la détermination d'un seuil critique de température;
- prévention d'une contamination de l'aquifère avec une potentielle fuite du fluide caloporteur.

Des exigences spécifiques pour les essais de pression pour vérifier l'intégrité du puits peuvent assurer que les mesures nécessaires à la prévention des fuites du fluide caloporteur sont mises en œuvre. D'ailleurs, la norme CSA-C448 stipule que des essais de pression doivent être effectués à plusieurs étapes du processus d'insertion d'une PAC couplée au sol dans le cas d'un système commercial.

Des recommandations sur le type de fluide caloporteur et les pourcentages admissibles des différents composés entrant dans sa composition, ainsi que toute autre exigence pouvant être applicable dans les zones sensibles ou protégées, devraient être formulées. En effet, les fluides caloporteurs contiennent des bactéricides posant un risque environnemental en cas de fuite et il est souvent difficile de connaître le type et la concentration de ces agents.

Les mesures de détection des fuites pour les PAC couplées au sol, y compris les alarmes de perte de pression, ainsi que des recommandations sur l'installation des mécanismes d'arrêt pourraient être considérées.

Les risques d'infiltration d'eau de surface le long des parois des puits ou forages apparaissent préoccupants, compte tenu du nombre de PAC couplées au sol installées. Il serait avantageux de mieux encadrer le remplissage des forages par des exigences de conception spécifiques. L'information colligée dans les *Projets d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines* (PACES) pourrait servir de guide afin de déterminer des méthodes adéquates de remplissage des forages pour les différents contextes géologiques du Québec afin d'assurer la protection des eaux souterraines. L'installation de matériaux scellant à l'intérieur de l'annulus ou autour du coffrage d'acier lorsque celui-ci est conservé, et ce jusqu'à 1 m sous le contact du roc et des dépôts meubles permettrait de réduire les risques d'infiltration d'eau de surface dans les aquifères.

Lors de la réalisation des forages, des mesures doivent être prévues pour prévenir ou réduire la probabilité de migration de gaz naturellement contenu dans le sous-sol, telles que les recommandations du *Oil, Gas and Salt Resources of Ontario - Provincial Operating Standards*. Les données sur les occurrences de migration de gaz devraient être consultées afin d'identifier les zones à risques, soit les unités géologiques riches en matière organique. Au Québec, c'est unités consistent au Groupe de Trenton, au Shale d'Utica ainsi qu'au Groupe de Lorraine.

7.2.2 Distances minimales

Exigences au Québec

Rien dans la loi du Québec ne fait mention d'exigences en ce qui a trait aux distances minimales entre deux systèmes de PAC géothermique couplée au sol, pour tout autre type d'échangeur de chaleur au sol ou pour les autres ouvrages souterrains de captage ou de traitement d'eau.

Exigences dans les autres juridictions

Voir tableau 4 de la section 7.1.2.

Recommandations de la communauté scientifique ou normes techniques

Ce qui a été écrit à la section 7.1.2 s'applique également ici. La norme CSA C448 recommande les mêmes distances pour les forages des PAC d'aquifère que couplées au sol face aux puits de captage d'eau souterraine et aux installations septiques.

Constats

Les connaissances sur les conditions géologiques et hydrogéologiques locales peuvent être utilisées pour formuler des recommandations sur la distance de séparation appropriée entre les PAC couplées au sol voisines pour les applications résidentielles de faible puissance, étant donné que celles-ci peuvent avoir un impact limité sur le fonctionnement à long terme. Ces distances de séparation peuvent varier en fonction des contextes géologiques et hydrogéologiques et pourraient être déterminées à partir des informations existantes (par exemple celles acquises durant les PACES) pour les conditions locales. Les rapports nationaux complétés dans le cadre du projet ReGeoCities et le cas de la ville de Stockholm (Suède) représentent des exemples de la façon dont des normes sur les distances peuvent être mises en place.

Pour les systèmes d'une plus grande puissance, une évaluation des risques et/ou une étude d'impact sur l'environnement peuvent démontrer les impacts opérationnels potentiels à long terme des systèmes entre eux et sur l'environnement récepteur.

Comme pour les systèmes de PAC géothermique d'aquifère, les caractéristiques locales du sous-sol devraient permettre de définir des recommandations concernant les distances minimales de sécurité pour l'emplacement des trous de forage pour les systèmes domestiques à petite échelle à partir de la présence des éléments suivants à proximité :

- approvisionnement en eau public
- approvisionnement en eau privé
- autre source souterraine ou autre système géothermique
- bâtiment et toute infrastructure construite

Les distances séparatrices incluses dans le RPEP pour l'installation de systèmes de prélèvement d'eau pourraient être les mêmes que pour les forages des systèmes de PAC couplée au sol, telles que le recommande la norme CSA C448.

7.2.3 *Seuils de température*

Exigences au Québec

Rien dans la loi du Québec ne fait mention d'exigences en ce qui a trait aux changements de température du sous-sol causés par des systèmes de PAC géothermique couplée au sol, ou pour tout autre type de puits.

Exigences dans les autres juridictions

Voir tableau 5 de la section 7.1.3.

Recommandations de la communauté scientifique ou des normes techniques

Ce qui a été écrit à la section 7.1.3 s'applique également ici.

Constats

Les constats sont semblables à ceux émis pour les systèmes de PAC d'aquifère quant aux changements de température acceptable au niveau du sol (voir section 7.1.3). Toutefois, la façon d'encadrer ou de faire le suivi des changements de température ne peut être la même puisqu'il n'a pas de prélèvement et d'injection d'eau souterraine pour les systèmes de PAC couplée au sol. La modélisation de la température des échangeurs de chaleur des systèmes de grande puissance pourrait être exigée pour s'assurer de maintenir des changements de température acceptables au niveau du sous-sol au-delà des échangeurs de chaleur. Une solution moins coûteuse pourrait consister à installer un piézomètre de surveillance à l'intérieur des puits.

7.3 Système de PAC d'eau de surface

7.3.1 *Intégrité du puits*

Exigences au Québec

Ce type de système n'est pas encadré par le RPEP et le PPRLI ne fait pas mention d'exigences en ce qui a trait à sa construction.

Exigences dans les autres juridictions

Aucune législation ou juridiction analysée dans le cadre de ce travail ne fait mention des PAC d'eau de surface.

Recommandations de la communauté scientifique ou normes techniques

Aucune norme technique n'a pu être revue dans le cadre de cette étude et le peu d'articles scientifiques disponibles à ce sujet ne permet pas d'avoir une opinion éclairée de la part de la communauté scientifique.

Constats

Le peu d'information répertorié concernant les PAC d'eau de surface ne permet pas l'élaboration de constats.

7.3.2 Distances minimales

Exigences au Québec

À la lecture des normes minimales de la PPRLPI, les composantes (p. ex. prise d'eau) d'un système de PAC d'eau de surface en boucle ouverte sont permises sur le littoral et sur la rive des lacs et des cours d'eau. Dans la zone inondable 0-20 an, les composantes autres que la prise d'eau (p. ex. les conduites) doivent se situer en dessous du sol. Elles sont également permises dans la zone inondable 20-100 ans, si immunisées.

Les systèmes de PAC d'eau de surface en boucle fermée ne sont pas permis sur le littoral par la PPRLPI, puisque ce type d'installation ne fait pas partie des constructions, ouvrages ou travaux permis. Ils sont également interdits en zone inondable 0-20 an, car leur réalisation est incompatible avec les mesures de protection applicables au littoral (art. 4.2.1, PPRLPI). Bien qu'ils pourraient être permis dans la zone inondable 20-100 ans, si immunisés, les parties se situant sur le littoral et dans la zone inondable 0-20 an ne peuvent pas être autorisées : ces systèmes ne peuvent donc pas être implantés dans ces milieux. Enfin, un tel système pourrait être analysé en vertu de l'article 22 de la LQE s'il est destiné à servir à des fins municipales, industrielles, commerciales ou publiques.

Exigences dans les autres juridictions

Aucune législation ou juridiction analysée dans le cadre de ce travail ne fait mention des PAC d'eau de surface.

Recommandations de la communauté scientifique ou normes techniques

La norme CSA C448 recommande d'installer les échangeurs de chaleur des PAC d'eau de surface à une distance minimale d'au moins 2 m de toute prise d'eau potable.

Constats

Le peu d'information répertorié concernant les PAC d'eau de surface ne permet pas l'élaboration de constats.

7.3.3 Seuils de température

Exigences au Québec

Rien dans la loi du Québec ne fait mention d'exigences en ce qui a trait aux changements de température du sous-sol causés par des systèmes de PAC d'eau de surface, ou pour tout autre type de systèmes d'ailleurs.

Exigences dans les autres juridictions

Aucune législation ou juridiction analysée dans le cadre de ce travail ne fait mention des PAC d'eau de surface.

Recommandations de la communauté scientifique ou des normes techniques

Aucune norme technique n'a pu être revue dans le cadre de cette étude et le peu d'articles scientifiques disponibles à ce sujet ne permet pas d'émettre l'opinion générale de la communauté scientifique.

Constats

Le peu d'information répertorié concernant les PAC d'eau de surface ne permet pas l'élaboration de constat.

8. CONCLUSIONS

Haehnlein et al. (2013) montre que, malgré le fait que toute implantation d'une réglementation environnementale aspire à conserver le caractère renouvelable et durable d'une ressource, ici géothermique, sa mise en application au départ ne peut prévenir tous les problèmes. Certaines conséquences environnementales liées à l'installation de PAC géothermique sont plutôt difficiles à prévoir. Il est clair que les législations sont en évolution et devraient subir de nombreux changements au cours de prochaines décennies, surtout si le nombre de systèmes géothermiques croît rapidement. En conséquence, un encadrement efficace et bien adapté demande de bien connaître la situation actuelle du marché, les effets associés sur la température du sous-sol, les conséquences environnementales (ex. : risques de fuite du fluide caloporteur, contamination croisée de différents horizons aquifères) et sociales (ex. : conflits possibles si des effets se font sentir sur les maisons et terrains voisins) qui en découlent (Figure 5). C'est en prenant en considération tous ces facteurs qu'une réglementation et des guides de bonnes pratiques bien adaptés au contexte du Québec peuvent être développés et rédigés.

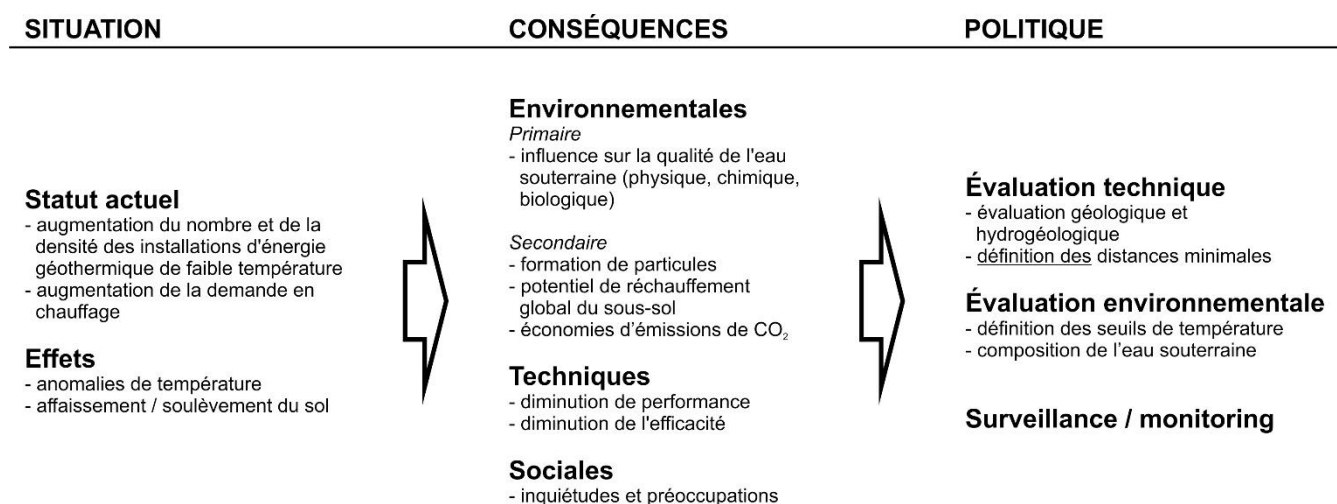


Figure 5. Situation, conséquences et recommandations pour une politique sur l'utilisation durable de l'énergie géothermique superficielle (adapté de Haehnlein et al., 2013).

Au Québec, le marché résidentiel des systèmes de PAC géothermique est relativement bien connu, mais peu de connaissances sont disponibles en ce qui a trait aux bâtiments commerciaux et institutionnels et aucune statistique ne semble disponible. Le portrait de l'utilisation des systèmes géothermiques au Québec est donc très partiel, ce qui rend difficile l'évaluation de l'impact environnemental lié aux systèmes de PAC de grande puissance, soit un segment de marché en croissance.

Certaines conséquences environnementales associées aux systèmes de PAC géothermique ont été répertoriées dans d'autres régions du monde, notamment par le biais d'articles scientifiques. Les impacts environnementaux qui auraient pu survenir suite à l'installation de systèmes géothermiques au Québec sont toutefois peu documentés. Chaque pays, état ou province a sa propre juridiction, pour des raisons principalement politiques, mais aussi à cause des contextes géologiques et hydrogéologiques qui peuvent être propres à des régions et de la disponibilité des ressources en eau. Il serait pertinent de s'inspirer d'autres juridictions pour améliorer celle du Québec, mais les règlements appropriés pour un pays ou une région donnés pourraient ne pas convenir au contexte géologique et hydrogéologique du Québec et au développement actuel de l'énergie géothermique dans la province. Pour mettre en place une protection adéquate de l'environnement face au développement des PAC géothermique au Québec, il faudra d'abord mieux

connaître la situation du marché (p. ex. : commercial et industriel) et les conséquences engendrées sur l'environnement et la population dans différents cas de figure. Jusqu'à maintenant, les informations sur ces deux points semblent insuffisantes pour pouvoir diminuer l'effet des impacts environnementaux. Il faut toutefois spécifier que les principaux problèmes associés aux systèmes de PAC géothermique ont été rapportés au Québec (colmatage des puits, fuites d'antigel, conflit d'usage potentiel ou avéré, etc.), et que la fréquence de ces problèmes est plutôt faible en regard du nombre de systèmes installés. Les conséquences environnementales de ces problèmes semblent minimales face aux conséquences positives d'économie d'énergie et de réduction des émissions de gaz à effet de serre associées au PAC géothermique.

Le forage nécessite généralement au moins le consentement de l'autorité en place parmi toutes les juridictions étudiées, et l'information relative à sa construction demeure assez bien uniformisée au sein des différentes juridictions, notamment au Québec. Les principaux processus par lesquels les systèmes de PAC géothermique peuvent avoir un effet sur l'environnement, les eaux souterraines et les eaux de surface demeurent mal définis et souvent négligés, c'est-à-dire tout ce qui se passe après les activités de forage des puits. Alors que la règle du pouce qui sous-entend « *qu'un système géothermique ne doit pas en déranger ou en influencer un autre* » existe implicitement ou explicitement dans tous les pays considérés dans cette revue de littérature, seule l'Allemagne, par exemple, demande un calcul ou une simulation numérique pour déterminer le rayon d'influence thermique lors de la conception de systèmes dont la puissance est supérieure à 30 kW.

Bien qu'une évaluation de l'impact environnemental de type « *cas par cas* » ne serait pas réaliste, il faudrait tenter de tenir compte des conditions géologiques et hydrogéologiques locales en utilisant des cartes détaillées du potentiel géothermique, comme le soulignent Hähnlein et al. (2013) et Somogyi et al. (2017). Il existe d'ailleurs de bons exemples en ligne (dont le dernier de la liste est québécois) :

- le projet ThermoMap (<http://geoweb2.sbg.ac.at/thermomap/>) pour l'énergie géothermique de faible température en Europe;
- l'outil de dépistage des systèmes géothermiques pour évaluer la viabilité des PAC d'aquifère (> 100 kW) pour le Royaume-Uni (<http://mapapps2.bgs.ac.uk/gshpnational/home.html>);
- les travaux de cartographie en surface du potentiel des PAC géothermique, réalisés en Italie selon la méthode G.POT (Casasso et Sethi 2016; 2017);
- les travaux de cartographie sommaire du potentiel géothermique de basses et hautes températures du bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent (Perozzi et al., 2016; Raymond et al., 2017a; Raymond et al., 2017b).

8.1 Travaux futurs

Au terme de ce rapport, il semble que des travaux additionnels aideraient à mieux connaître le marché de l'énergie géothermique au Québec et son impact sur l'environnement. Il faudrait aussi analyser les données géologiques et hydrogéologies régionales disponibles sur tout le territoire québécois habité, afin d'encadrer plus facilement le déploiement des PAC géothermique et d'assurer une protection des ressources en eau souterraine. Différentes pistes de solutions sont proposées ci-dessous afin d'améliorer la protection de l'environnement face à l'installation de systèmes de PAC géothermique.

- Réaliser une étude de marché pour mieux connaître le domaine de la géothermie au Québec, particulièrement pour les secteurs institutionnel et commercial;

- Sonder et consulter les entreprises impliquées dans le marché de la géothermie au Québec pour connaître leurs attentes face à la protection de l’environnement;
- Tenter d’inventorier et de localiser les systèmes de PAC géothermique sur le territoire du Québec à l’aide de l’information transmise sur les forages géothermiques dans le *Système d’information hydrogéologique* (SIH) du MDDELCC;
- Synthétiser l’information compilée dans les PACES et la mettre en perspective pour énoncer des recommandations face à l’aménagement des forages pour les PAC géothermique, que ce soit d’aquifère ou couplée au sol;
- Développer des modèles numériques simulant l’opération de PAC géothermique dans différents environnements géologiques typiques du Québec pour tenter de quantifier leur impact sur la qualité et la température des ressources en eau souterraine;
- Faire le suivi de systèmes de PAC géothermique opérationnels afin d’évaluer leur impact environnemental à long terme;
- Développer des cartes des zones favorables à l’implémentation des PAC géothermique au Québec, considérant les limitations de nature environnementale;
- Formuler des exigences spécifiques au Québec pour l’aménagement des systèmes de PAC géothermique, par le biais de politiques d’aménagement des systèmes qui favoriseront les bonnes pratiques qui contraindront les aspects critiques liés à l’intégrité des forages.

8.2 Références

- Casasso A. et Sethi R., 2016. G.POT: A quantitative method for the assessment and mapping of the shallow geothermal potential. *Energy* 106: 765-773. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.091>
- *La faisabilité technologique et la viabilité économique des systèmes de PAC géothermique dépendent des propriétés thermiques spécifiques du site et du profil d'utilisation de l'installation.*
 - *Ces paramètres influencent le potentiel géothermique peu profond, défini comme la puissance thermique pouvant être échangée efficacement par un tel système à une certaine profondeur.*
 - *Présente la méthode G.POT pour déterminer le potentiel géothermique des systèmes de PAC.*
 - *Cette méthode a été conçue en utilisant un ensemble complet de simulations analytiques de transfert de chaleur, effectuées en faisant varier (1) les propriétés thermiques du sous-sol, (2) les propriétés thermiques du forage, et (3) les paramètres opérationnels et de conception du système géothermique et du but visé par son utilisation.*
 - *La méthode G.POT est un outil simple et flexible qui peut être mis en œuvre dans un large éventail de scénarios pour cartographier à grande échelle le potentiel géothermique.*
- Casasso A. et Sethi R., 2017. Assessment and mapping of the shallow geothermal potential in the province of Cuneo (Piedmont, NW Italy). *Renewable Energy* 102(B): 306-315. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.10.045>

- *Évaluation et cartographie du potentiel géothermique peu profond selon les informations géologiques, hydrogéologiques et climatiques collectées et traitées pour estimer les propriétés du sous-sol;*
- *Les cartes du potentiel géothermique constituent un outil de planification important pour l'identification des zones les mieux adaptées pour l'installation des différentes technologies (PAC d'aquifère ou couplée au sol).*

Perozzi, L., Raymond, J., Asselin, S., Gloaguen, E., Malo, M., et Bégin, C., 2016. Simulation géostatistique de la conductivité thermique : application à une région de la communauté métropolitaine de Montréal : Rapport final. Rapport de recherche (R1663), INRS, Centre Eau Terre environnement, Québec: 21 p. <http://espace.inrs.ca/3374/>

- *Présente une méthode pour extrapoler la conductivité thermique entre les points de mesure de tests de réponse thermique afin d'étendre les évaluations ponctuelles à l'ensemble d'une zone urbaine.*

Raymond, J., Sirois, C., Nasr, M., et Malo, M., 2017a. Evaluating the geothermal heat pump potential from a thermostratigraphic assessment of rock samples in the St. Lawrence Lowlands, Canada. *Environmental Earth Sciences* 76: 83. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6398-y>

- *Évaluation du potentiel des PAC géothermique par la cartographie de la conductivité thermique des séquences de roches du bassin sédimentaire des Basses-Terres du Saint-Laurent.*
- *La conductivité thermique a été mesurée en laboratoire sur des échantillons de roche recueillis sur des affleurements et utilisée pour compléter les calculs de conception d'un système géothermique avec un seul forage.*
- *Les résultats ont permis de définir des unités thermostratigraphiques pouvant être liées à des environnements de dépôt.*

Raymond, J., Malo, M., Lamarche, L., Perozzi, L., Gloaguen, E., et Bégin, C., 2017b. New methods to spatially extend thermal response test assessments. *International Ground Source Heat Pump Association Technical/Research Conference and Expo, Denver: 256-265.* <http://dx.doi.org/10.22488/okstate.17.000519>

- *Nouvelles méthodes développées pour étendre les évaluations souterraines du site d'installation des systèmes de PAC géothermique et de l'échelle des districts urbains.*
- *Repose sur des profils de température mesurés à l'équilibre dans des échangeurs de chaleur au sol qui sont reproduits avec des simulations numériques pour déduire spatialement le flux de chaleur terrestre et la conductivité thermique souterraine.*
- *Basée sur des simulations géostatistiques pour cartographier la distribution de la conductivité thermique souterraine dans les zones où plusieurs installations de pompes à chaleur géothermiques sont prévues.*

9. REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier Marie-Catherine Talbot-Poulin, ingénieure en hydrogéologie à la Direction de l'eau potable et des eaux souterraines du MDDELCC, Philippe Pasquier, professeur à l'École Polytechnique, ainsi que Christine Rivard, chercheure scientifique chez Ressources naturelles Canada, pour leur lecture critique et leur rôle dans la révision du rapport.