



Titre: Caractérisation hydrogéothermique d'un aquifère fracturé accueillant un système géothermique avec puits à colonne permanente
Title:

Auteur: Stéphanie Robert
Author:

Date: 2022

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Robert, S. (2022). Caractérisation hydrogéothermique d'un aquifère fracturé accueillant un système géothermique avec puits à colonne permanente [Master's thesis, Polytechnique Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/10352/>
Citation:

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/10352/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Philippe Pasquier, & Alain Nguyen
Advisors:

Programme: Génie minéral
Program:

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

**Caractérisation hydrogéothermique d'un aquifère fracturé accueillant un
système géothermique avec puits à colonne permanente**

STÉPHANIE ROBERT

Département des génies civil, géologique et des mines

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*
Génie minéral

Janvier 2022

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

**Caractérisation hydrogéothermique d'un aquifère fracturé accueillant un
système géothermique avec puits à colonne permanente**

présenté par **Stéphanie ROBERT**

en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*
a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Denis MARCOTTE, président

Philippe PASQUIER, membre et directeur de recherche

Alain NGUYEN, membre et codirecteur de recherche

Pooneh MAGHOUL, membre

REMERCIEMENTS

Je tiens d’abord à remercier mon directeur Philippe Pasquier et mon codirecteur Alain Nguyen pour leur support et leur encadrement pendant la réalisation de ma maîtrise.

Je souhaite remercier tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation des travaux de terrain. Alors merci aux stagiaires et aux collègues qui sont venus prêter main-forte pendant les travaux. De plus, merci à Étienne Bélanger pour son assistance technique et les cours de plomberie 101. Merci également à mes collègues de bureau à distance qui m’ont soutenue, un *pomodoro* à la fois !

Je tiens à remercier les Fonds de recherche du Québec Nature et technologies pour la bourse de recherche. De plus, je souhaite remercier tous les partenaires de la *Chaire de recherche en géothermie* pour leur support et leur contribution.

Finalement, je remercie mes proches, ma famille et mes amis, pour leur soutien et leur écoute, eux qui m’ont appuyée et encouragée à compléter ce projet de recherche et ce mémoire.

RÉSUMÉ

Les puits à colonne permanente sont des échangeurs souterrains ouverts sur l'aquifère qui sont particulièrement efficaces et emploient l'eau souterraine comme fluide caloporteur. On compte actuellement un nombre limité de publications étudiant l'impact des conditions hydrostratigraphiques sur la réponse thermique d'un puits ayant impliqué des essais expérimentaux. À ce jour, les travaux disponibles reposent principalement sur la modélisation et impliquent le plus souvent une opération avec saignée. Ce mémoire présente la caractérisation hydrogéothermique d'un site qui a permis l'étude d'un puits à colonne permanente opéré sans saignée dans un aquifère fracturé. Suite à une revue du contexte géologique et hydrogéologique à l'échelle régionale, l'École de la Clé-des-Champs située à Mirabel (Québec) a été sélectionnée pour accueillir un système doté de puits à colonne permanente.

La caractérisation hydrogéothermique de l'aquifère réalisée a impliqué deux forages exploratoires, un essai de réponse thermique, un essai de pompage, des analyses géochimiques de l'eau souterraine et des profils de vélocimétrie en forage. Ceci a permis d'établir un portrait détaillé du site et de confirmer l'important potentiel géothermique pour l'implantation de puits à colonne permanente. En effet, l'essai de réponse thermique a révélé une performance thermique significative, même pour un puits à colonne permanente, alors que ce dernier a été opéré sans saignée. L'approximation de premier ordre de la source linéique infinie n'a pas permis d'obtenir une valeur de conductivité thermique réaliste pour les matériaux géologiques autour du puits. Il en a été déduit que la conduction seule ne pouvait expliquer la réponse thermique obtenue. Pour explorer cette hypothèse, une étude plus avancée a été requise pour comprendre les mécanismes de transfert de chaleur qui sont intervenus pendant l'essai de réponse thermique.

Ainsi, un modèle numérique 3D d'éléments finis couplant le transfert de chaleur et l'écoulement souterrain a été développé sur la base des observations de terrain afin d'interpréter l'essai de réponse thermique. Le modèle a également été développé dans le but d'étudier l'influence du contexte hydrostratigraphique sur la réponse thermique d'un puits à colonne permanente opéré sans saignée. En effet, l'aquifère situé au site de l'École de la Clé-des-Champs est entre autres caractérisé par une zone fracturée et transmissive, observée dans la partie inférieure des forages, et qui correspond à la Formation de Cairnside. Les travaux de modélisation ont permis de noter que dans ces conditions géologiques, l'advection, même sans

saignée, pouvait être le mécanisme de transfert de chaleur dominant. De plus, les travaux ont mis en lumière l'influence des conditions hydrostratigraphiques sur l'interprétation de l'essai de réponse thermique, soit que la valeur moyenne ainsi que le profil de conductivité hydraulique influencent la réponse thermique du puits. Ceci a permis de montrer que la approximation de premier ordre de la ligne source infinie comme méthode d'interprétation ne peut pas toujours être employée pour interpréter les essais de réponse thermique réalisés sur les puits à colonne permanente, même en l'absence de saignée.

Les résultats supportent également le fait qu'une fracture à la base du puits, dans les conditions rencontrées à Mirabel, peut légèrement nuire à la performance thermique du puits. Une évaluation erronée des paramètres hydrogéologiques pourrait mener à une conception inappropriée du système. Une conclusion qui appelle à la prudence et qui encourage la réalisation d'une étude hydrogéologique pour bien définir le contexte hydrostratigraphique afin de considérer son effet lors de l'interprétation des essais de réponse thermique.

ABSTRACT

Standing column wells are particularly efficient ground heat exchangers open to the aquifer and employ groundwater as the heat transfer fluid. There are currently a limited number of publications investigating the impact of hydrostratigraphic conditions on the thermal response of a well that have involved experimental tests. To date, the available work is primarily based on modelling and most often involves bleed. This document presents the hydrogeothermal characterization of a site that allowed the study of a standing column well operated without bleed in a fractured aquifer. Following a review of the geological and hydrogeological context at the regional scale, the Clé-des-Champs School located in Mirabel (Quebec) was selected to host a standing column well system.

The hydrogeothermal characterization of the aquifer involved two exploratory boreholes, a thermal response test, a pumping test, geochemical analyses of the groundwater and velocimetry profiles. This allowed to establish a detailed picture of the site and to confirm the significant geothermal potential to implement standing column wells. Indeed, the thermal response test revealed a significant thermal performance, even for a standing column well operated without bleed. The first-order infinite line source approximation did not yield a realistic thermal conductivity value for the geologic materials around the well. It was deduced that conduction alone could not explain the thermal response obtained. To explore this hypothesis, a more advanced study was required to understand the heat transfer mechanisms that occurred during the thermal response test.

Thus, a 3D numerical finite element model coupling heat transfer and groundwater flow was developed based on the field observations to interpret the thermal response test. The model was also developed to study the influence of the hydrostratigraphic context on the thermal response of a standing column well operated without bleeding. Indeed, the aquifer located at the Clé-des-Champs School site is characterized by a fractured and transmissive zone, observed in the lower part of the boreholes, and which corresponds to the Cairnside Formation. Modelling works has shown that in these geological conditions, advection, could be the dominant heat transfer mechanism, even without bleed. In addition, the work highlighted the influence of hydrostratigraphic conditions on the interpretation of the thermal response test, i.e., the average value as well as the hydraulic conductivity profile influence the thermal response of the well. This showed that the first-order approximation of the infinite source

line cannot always be used to interpret thermal response tests performed on standing column wells.

The results also support the fact that a fracture at the base of the well, under the conditions encountered at Mirabel, may slightly affect the thermal performance of the well. An erroneous assessment of the hydrogeological parameters could lead to an inappropriate design of the system. This conclusion calls for caution and encourages a hydrogeological study to properly define the hydrostratigraphic context in order to consider its effect when interpreting thermal response tests.

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|--|------|
| REMERCIEMENTS | iii |
| RÉSUMÉ | iv |
| ABSTRACT | vi |
| TABLE DES MATIÈRES | viii |
| LISTE DES TABLEAUX | xi |
| LISTE DES FIGURES | xii |
| LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS | xv |
| LISTE DES ANNEXES | xvi |
| CHAPITRE 1 INTRODUCTION | 1 |
| 1.1 Éléments de la problématique | 2 |
| 1.2 Objectifs de recherche | 3 |
| CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE | 4 |
| 2.1 Puits à colonne permanente | 4 |
| 2.2 Impact du contexte hydrostratigraphique sur la réponse thermique | 10 |
| 2.2.1 ERT sur des PCP | 10 |
| 2.2.2 Géothermie en milieu hétérogène | 11 |
| CHAPITRE 3 DÉMARCHE DE L'ENSEMBLE DU TRAVAIL DE RECHERCHE | 14 |
| CHAPITRE 4 CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE RÉGIONAL | 16 |
| 4.1 Site d'étude | 16 |
| 4.2 Contexte géologique régional | 17 |
| 4.2.1 Géologie régionale | 17 |
| 4.3 Contexte hydrogéologique régional | 17 |
| 4.3.1 Études hydrogéologiques régionales | 19 |
| CHAPITRE 5 CARACTÉRISATION HYDROGÉOTHERMIQUE | 24 |
| 5.1 Contexte géologique local | 24 |

| | | |
|---|---|----|
| 5.2 | Contexte hydrogéologique local | 27 |
| 5.2.1 | Niveaux d'eau et gradient hydraulique | 27 |
| 5.2.2 | Essai de pompage | 28 |
| 5.3 | Géothermie | 34 |
| 5.3.1 | Profil de température initial | 34 |
| 5.3.2 | Essai de réponse thermique | 36 |
| 5.4 | Vélocimétrie | 42 |
| CHAPITRE 6 ARTICLE 1 - IMPACT OF LAYERED HETEROGENEITY ON THERMAL RESPONSE TEST INTERPRETATION PERFORMED ON A STAN- DING COLUMN WELL OPERATED WITHOUT BLEED | | 46 |
| 6.1 | Introduction | 47 |
| 6.2 | Field data acquisition and interpretation | 50 |
| 6.2.1 | Local hydrostratigraphy | 50 |
| 6.2.2 | Hydrogeological parameters | 52 |
| 6.2.3 | Thermal parameters | 53 |
| 6.3 | Model development and implementation | 55 |
| 6.3.1 | Modelling strategy | 56 |
| 6.3.2 | Geometry and mesh | 56 |
| 6.3.3 | Boundary conditions | 57 |
| 6.3.4 | Properties | 60 |
| 6.4 | Results and discussion | 61 |
| 6.4.1 | Comparison of experimental and simulated temperatures | 62 |
| 6.4.2 | Advective heat transfer in the absence of bleed | 65 |
| 6.5 | Conclusions | 67 |
| CHAPITRE 7 DISCUSSION GÉNÉRALE | | 70 |
| 7.1 | Analyses des hypothèses | 70 |
| 7.2 | Particularité géothermique | 71 |
| 7.3 | Incertitudes sur les données | 72 |
| CHAPITRE 8 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS. | | 74 |
| 8.1 | Synthèse des travaux | 74 |
| 8.2 | Limitations de l'étude | 76 |
| 8.3 | Améliorations futures | 76 |
| RÉFÉRENCES | | 78 |

| | |
|-------------------|----|
| ANNEXES | 84 |
|-------------------|----|

LISTE DES TABLEAUX

| | | |
|-----|---|----|
| 4.1 | Descriptions lithologiques des unités géologiques | 17 |
| 5.1 | Relevés des niveaux d'eau | 28 |
| 5.2 | Synthèse des paramètres hydrogéologiques obtenus au site de l'École de la Clé-des-Champs | 32 |
| 5.3 | Synthèse des paramètres hydrogéologiques moyens au site de l'École de la Clé-des-Champs | 33 |
| 5.4 | Synthèse des paramètres thermiques acquis au site de l'École de la Clé-des-Champs | 41 |
| 5.5 | Essais vélocimétriques menés dans les PCP du site de l'École de la Clé-des-Champs | 43 |
| 5.6 | Débits de pompage et rabattements aux PCP pendant les essais vélocimétriques | 44 |
| 6.1 | Thermal and hydraulic parameters incorporated in the numerical model for the Base Case. | 60 |
| 6.2 | Comparison of the relative, maximum and mean absolute errors between the simulated and experimental temperatures. | 62 |
| A.1 | Qualité de l'eau souterraine - Évaluation bactériologiques | 85 |
| A.2 | Qualité de l'eau souterraine - Évaluation physico-chimiques | 86 |
| A.3 | Qualité de l'eau souterraine - Évaluation des substances inorganiques | 87 |

LISTE DES FIGURES

| | | |
|-----|---|----|
| 2.1 | Illustration d'un puits à colonne à permanente et d'un puits d'injection. Tirée de Eppner (2016). | 5 |
| 2.2 | Mécanismes de transfert de chaleur impliqués dans la réponse thermique d'un PCP. Adaptée de Rees et al. (2004). | 7 |
| 2.3 | Circulation d'eau entre le PCP et l'aquifère. Adaptée de Yuill et Mikler (1995). | 8 |
| 4.1 | Localisation du site d'étude de l'École de la Clé-des-Champs. | 16 |
| 4.2 | Évaluation de la profondeur du roc à partir des données du SIH. | 18 |
| 4.3 | Évaluation des venues d'eau au droit des forages disponibles dans le SIH. | 18 |
| 4.4 | Élévation de la surface piézométrique de l'aquifère rocheux. Tirée de Richelieu Hydrogéologie Inc. (2020) d'après Savard et al. (2006). | 20 |
| 4.5 | Identification des zones de recharges de l'aquifère rocheux. Tirée de Richelieu Hydrogéologie Inc. (2020) d'après Savard et al. (2006). | 21 |
| 4.6 | Identification des conditions de confinement de la nappe phréatique. Modifiée de Savard et al. (2006). | 22 |
| 4.7 | Répartition du logarithme de la conductivité hydraulique sur le territoire couvert par l'étude régionale. Modifiée de Savard et al. (2006). | 22 |
| 5.1 | Localisation des forages réalisés à l'École de la Clé-des-Champs à Saint-Augustin-de-Mirabel. | 25 |
| 5.2 | Illustration des venues d'eau cumulées en fonction de la profondeur des forages. | 26 |
| 5.3 | Évolution de l'eau pompée pendant le développement du puits PE-20-02. | 27 |
| 5.4 | Évolution de l'élévation du niveau d'eau en fonction du temps. Modifiée d'après Richelieu Hydrogéologie Inc. (2020). | 29 |
| 5.5 | Rabattements en fonction du temps. Modifiée d'après Richelieu Hydrogéologie Inc. (2020). | 30 |
| 5.6 | Rabattements résiduels mesurés pendant la remontée. Modifiée d'après Richelieu Hydrogéologie Inc. (2020). | 31 |
| 5.7 | Analyses des rabattements en fonction de la distance présentées à 3 temps. Modifiée d'après Richelieu Hydrogéologie Inc. (2020). | 32 |
| 5.8 | Signaux de températures enregistrées pendant l'essai de pompage. Modifiée d'après Richelieu Hydrogéologie Inc. (2020). | 34 |
| 5.9 | Profils verticaux de température relevés dans les puits. | 36 |

| | | |
|------|---|----|
| 5.10 | Unité de réponse thermique mobile dans la cour de l'École de la Clé-des-Champs. | 37 |
| 5.11 | Données de températures brutes acquises pendant l'essai de réponse thermique. LWT 1 et 2 correspondent à la température de l'eau sortant de l'unité et EWT 1 et 2 à celle entrant dans l'unité. | 38 |
| 5.12 | Débit enregistré pendant l'essai de réponse thermique. | 39 |
| 5.13 | Comparaison de la puissance de chauffage mesurée et corrigée. | 40 |
| 5.14 | Évaluation de la conductivité thermique via la méthode d'approximation de premier ordre de la SLI. | 41 |
| 5.15 | Localisation des PCP au site de l'École de la Clé-des-Champs. | 42 |
| 5.16 | Profils vélocimétriques réalisés dans les PCP du site de l'École de la Clé-des-Champs. Modifiée d'après Dion (2021). | 45 |
| 6.1 | Simplified representation of water flow along borehole wall for top-pumped SCW in a a) homogeneous aquifer (adapted from Yuill et Mikler (1995)) and b) layered heterogeneous fractured aquifer with a higher permeability in the lower part of the borehole. | 49 |
| 6.2 | Geology observed at borehole PE-20-01 and boreholes locations. The illustration on the left shows the installation at standing column well PE-20-01 equipped with a HDPE reinjection pipe perforated in the lower part. | 51 |
| 6.3 | Drawdown at PE-20-01 and PE-20-02 during the pumping test performed at PE-20-01 at a mean flow rate of 130 L/m. The pumping test lasted 72 hours and was followed by a recovery test of 6.6 hours. | 52 |
| 6.4 | Summary of the experimental data acquired during the thermal response test. The water temperatures at the inlet and outlet of the unit, labeled respectively EWT and LWT are presented on the top graph. The peaks in these two signals before the heating phase (around 18 h) are due to a brief interruption of the circulation pump. | 54 |
| 6.5 | Interpretation of the thermal response test with the first-order approximation of the infinite line source model. The slope of the dashed line is used for the regression analysis and corresponds to an apparent thermal conductivity of approximately 70 W/mK. | 55 |
| 6.6 | Overview of the model geometry (not to scale). The model includes the geology encountered at PE-20-01 and a simplified geometry of PE-20-01. The hydraulic conductivity profile used for the Base Case is shown on the right. | 57 |

| | | |
|------|---|----|
| 6.7 | Thermal and hydraulic boundary conditions applied to the numerical model to generate a transfer function g . When not indicated, a zero flux boundary condition applies. Representation of boundary conditions are inspired from Laroche (2021). The cross-section is parallel to regional groundwater flow illustrated in Fig. 6.2. | 59 |
| 6.8 | Profiles of thermal and hydraulic conductivity of the Base Case and of the three alternative cases (C1 to C3) used in this work (not to scale). Note that Case 1, 2 and 3 are variations from the Base Case. | 61 |
| 6.9 | Comparison of experimental and simulated EWT and LWT for Base Case and alternatives C1, C2 and C3 illustrated in Fig. 6.8. | 63 |
| 6.10 | Visualization of groundwater flow entering (blue) and leaving the SCW PE-20-01 (red) for Base Case (left) and alternative C1 (right). | 65 |
| 6.11 | Hydraulic head and heat fluxes 83 hours after the beginning of the TRT. Left) Hydraulic head and equipotentials on a 2D plane parallel to the regional groundwater flow direction. Arrows indicate the direction of groundwater and their sizes are proportional to the Darcy velocity. Right) Horizontal component of the heat fluxes 15 cm from the south wall of the well. Negative heat flux corresponds to heat transfer towards the SCW while positive flux corresponds to heat transfer towards the aquifer. A balance of the illustrated heat flows was performed. The Base Case is shown on the first row, alternatives C1 to C3 are shown on rows 2 to 4. | 66 |
| 7.1 | Affichage des données expérimentales et de la plage d'incertitudes associée à la lecture du capteur de température. | 72 |
| 7.2 | Comparaison de la tendance des données en fin de période de chauffage pour les cas simulés. | 73 |

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

| | |
|--------|--|
| CSSMI | Centre de services scolaire des Mille-Îles |
| ERT | Essai de réponse thermique |
| MELCC | Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques |
| MERN | Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles |
| PCP | Puits à colonne permanente |
| PI | Puits d'injection |
| RPEP | Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection |
| SIH | Système d'information hydrogéologique |
| SIGEOM | Système d'information minière du Québec |
| SLI | Source linéique infinie |

LISTE DES ANNEXES

| | | |
|----------|---------------------------------|----|
| Annexe A | Analyses géochimiques | 84 |
|----------|---------------------------------|----|

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Au Québec, les besoins en chauffage sont parmi les principales causes des demandes de puissance électrique élevée (Hydro-Québec, 2021a). Répondre aux besoins électriques en période de pointe demeure un enjeu d'importance pour les distributeurs d'électricité. L'énergie géothermique de basse température est une source d'énergie renouvelable qui permet de combler les besoins en chauffage et en climatisation de bâtiments et donc de réduire l'appel de puissance auprès du distributeur d'électricité.

L'implantation des puits géothermiques de type colonne permanente (PCP) au Québec est une solution avantageuse, car ce type de puits est moins dispendieux que les autres types de puits géothermiques. Ils sont également plus efficaces et peuvent être facilement intégrés en milieu urbain (Pasquier et al., 2016). Cela a d'ailleurs été observé dans le nord-est des États-Unis, où le nombre d'installations est en hausse (Orio et al., 2005). De plus, en période de pointe une particularité des PCP, nommée *saignée*, permet d'augmenter temporairement l'efficacité des PCP et donc d'accommoder des besoins thermiques plus importants (Spitler et al., 2002). La saignée consiste à diriger une partie de l'eau pompée dans un autre puits, ce qui induit un rabattement du niveau d'eau dans le PCP et stimule donc un écoulement radial d'eau souterraine vers le PCP. Toutefois, les PCP ne sont pas encore grandement utilisés au Québec.

Il y a peu d'études confirmant la performance des PCP en climat nordique et dans le contexte géologique du Québec. Cela présente un frein à l'utilisation à plus grande échelle des systèmes géothermiques équipés de PCP. La performance de tels systèmes passe par la connaissance hydrogéologique et géothermique du massif rocheux dans lequel il est installé, l'aquifère rocheux étant rarement strictement homogène. Cependant, peu d'études expérimentales ont été réalisées sur des PCP installés dans des aquifères présentant des hétérogénéités en couches. Il en découle que la réponse thermique des PCP dans ce type de milieu n'est pas bien définie. C'est particulièrement vrai pour l'opération du PCP sans saignée. L'influence de conditions hydrostratigraphiques particulières sur l'interprétation des essais expérimentaux est également inconnue. Le présent mémoire rapporte donc les résultats d'un projet de caractérisation hydrogéothermique détaillée d'un aquifère fracturé accueillant des PCP pour des essais ayant été réalisés sans saignée. La caractérisation a été réalisée en amont d'un projet pilote visant à implanter un système géothermique équipé de PCP dans une école primaire située à Mirabel. Le site accueillant le projet se trouve à être le premier site d'étude faisant partie d'un important projet de démonstration du fonctionnement des PCP au Québec.

1.1 Éléments de la problématique

Dans la littérature, des résultats contradictoires sont rapportés quant à l'évaluation de la réponse thermique des puits à colonne permanente en milieu fracturé. La plupart des études disponibles reposent sur des travaux de modélisation dans lesquels l'aquifère est généralement considéré comme un milieu poreux équivalent homogène et cette hypothèse est maintenue lors de la conception des systèmes. Dans certains cas, la présence de fractures est considérée comme ayant un effet négligeable (Deng, 2004) ou comme ayant le potentiel de diminuer la performance des PCP (Ramesh et Spitler, 2012). Alors que dans d'autres études, il est avancé que la présence de fractures peut avoir un effet bénéfique sur la performance d'un PCP (Croteau, 2011; Nguyen et al., 2015). Force est donc d'admettre que le nombre d'études est limité et ne permet pas de conclure sur l'effet des fractures sur la réponse thermique d'un PCP. Or, de récents travaux basés sur des données expérimentales (Beaudry et al., 2019), ont laissé paraître que la présence de fractures, autrement dit, qu'une distribution hétérogène de l'écoulement souterrain peut influencer la performance thermique des PCP. Il y a donc un besoin d'examiner davantage les impacts que la présence de zones fracturées peut avoir sur la réponse thermique d'un puits à colonne permanente.

De plus, il se trouve que les études traitant de l'influence des fractures sur la réponse thermique des puits à colonne permanente font état de cette influence en considérant principalement une opération avec saignée. Toutefois, la saignée n'est pas employée de façon continue dans la majorité des systèmes. Les mécanismes de transfert de chaleur en action lors d'une opération sans saignée d'un PCP dans un milieu hétérogène ont fait l'objet de peu d'études. Ainsi, l'effet des fractures sur la réponse thermique des PCP opérés sans saignée est également peu connu.

De surcroît, pour concevoir un système géothermique doté de PCP, il est souhaitable de connaître les propriétés thermiques et hydrogéologiques du site sur lequel le système doit être implanté. Un projet de démonstration de l'efficacité des puits à colonne permanente en climat nordique chapeauté par la *Chaire de recherche en géothermie sur l'intégration des PCP dans les bâtiments institutionnels* est réalisé à Mirabel. Afin de fournir à l'équipe de conception les données requises au dimensionnement du système, le site de Mirabel a fait l'objet d'une caractérisation hydrogéothermique détaillée. Les données amassées ont ensuite servi à évaluer l'influence du contexte hydrostratigraphique sur la performance thermique d'un PCP.

1.2 Objectifs de recherche

L'objectif général de ce projet de recherche est de procéder à la caractérisation hydrogéologique et géothermique des matériaux géologiques au site de démonstration de l'École de la Clé-des-Champs situé à Mirabel. Pour ce faire, les deux objectifs spécifiques suivants sont réalisés :

1. Acquérir les paramètres hydrogéothermiques de l'aquifère au moyen d'essais de pompage, de réponse thermique et de vélocimétrie en forage ; et
2. Évaluer l'influence du contexte hydrostratigraphique sur la réponse thermique d'un puits à colonne permanente opéré sans saignée.

Une revue du contexte géologique et hydrogéologique régional a permis d'identifier le site de l'École de la Clé-des-Champs comme ayant un potentiel géothermique intéressant pour l'implantation de PCP. Ainsi, une caractérisation hydrogéothermique a été réalisée pour obtenir les paramètres locaux. Les résultats obtenus lors de cette caractérisation ont mené au développement d'un modèle numérique 3D couplant le transfert de chaleur et l'écoulement souterrain qui a permis l'étude de la réponse thermique d'un PCP installé dans un aquifère fracturé.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

En un premier temps, le fonctionnement des puits à colonne permanente est introduit, ce qui permettra de se familiariser avec cette technologie et de saisir les enjeux liés à l’installation de ce type de système géothermique. Le fonctionnement des PCP repose sur des processus complexes et les paramètres hydrogéologiques et thermiques doivent être acquis pour concevoir adéquatement un tel système. Par la suite, les essais *in situ* permettant d’obtenir ces paramètres sont présentés. Finalement, une revue synthétise les travaux de recherche ayant été menés sur des PCP dans un aquifère qui comporte des hétérogénéités.

2.1 Puits à colonne permanente

Les puits à colonne permanente (PCP) sont des puits géothermiques ayant le potentiel de s’intégrer au paysage urbain en diminuant les coûts de construction tout en ayant la capacité de combler les besoins thermiques d’un bâtiment (Pasquier et al., 2016). Les systèmes géothermiques utilisant les PCP extraient directement l’eau de l’aquifère et l’eau souterraine est donc le fluide caloporteur. La Figure 2.1 illustre un PCP et son puits d’injection (PI) dans un aquifère fracturé ainsi que la pompe submersible présentant le captage de l’eau souterraine pour les besoins d’opération du système.

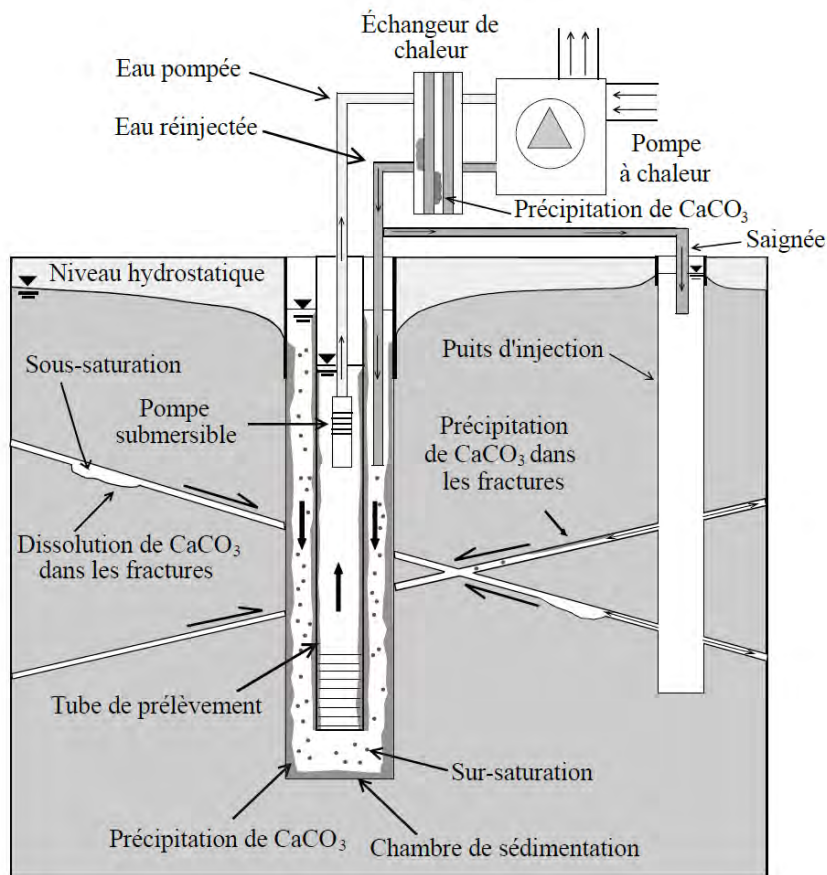


Figure 2.1 Illustration d'un puits à colonne à permanente et d'un puits d'injection. Tirée de Eppner (2016).

La configuration qui est adoptée à la Figure 2.1 est un pompage à la base du PCP via le tube de prélèvement et une réinjection en tête de puits à l'aide de la conduite de réinjection. Il s'agit d'une configuration typique pour les PCP. Il existe cependant une configuration inverse avec un pompage en tête de puits et une réinjection à sa base. Il a été démontré que la configuration avec un pompage près de la surface ne compromet pas la performance thermique du PCP dans un milieu homogène (Beaudry et al., 2019) et permet de faciliter certaines opérations de maintenance du puits. D'autres études ont toutefois avancé que la configuration avec un pompage en tête de puits permet d'obtenir des conductivités thermiques effectives supérieures (Chang et al., 2017; Lee et al., 2016).

L'échange thermique entre le PCP et le milieu géologique se fait principalement par conduction et en période de saignée le mode de transfert de chaleur par advection domine (Pasquier et al., 2016). C'est effectivement dans le processus nommé saignée que réside la performance

des PCP durant les périodes de fortes demandes thermiques. Au cours d'une saignée, un certain volume d'eau pompé est redirigé vers le PI et n'est donc pas réinjecté dans l'espace annulaire du PCP. Cela crée un rabattement dans le PCP qui induit l'arrivée d'eau dans le puits par le biais de fractures. Un PI permet de retourner l'eau de saignée dans l'aquifère d'origine comme prescrit par le Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection (RPEP) du Québec. Ainsi, puisque les puits à colonne permanente sont en connexion hydraulique ouverte avec l'aquifère, ce dernier doit donc être assez perméable pour permettre une saignée continue si requise.

Mécanismes de transfert de chaleur dans un PCP

Les principaux mécanismes de transfert de chaleur qui contribuent à l'échange thermique entre le puits à colonne permanente et son milieu sont la conduction et l'advection tels qu'illustrés à la Figure 2.2. Un échange thermique par conduction a lieu entre l'eau circulant dans le puits et l'aquifère. De plus, lorsqu'une saignée est effectuée, le rabattement induit au puits impose un écoulement radial d'eau souterraine vers le puits. De ce fait, de l'eau de l'aquifère se mélange à l'eau présente dans la colonne du puits. Cet écoulement d'eau permet un transfert de chaleur advectif. Au cours de la saignée, le transfert de chaleur advectif est dominant. D'autres mécanismes de transfert de chaleur secondaires interviennent dans l'échange thermique avec le milieu géologique tel que la flottabilité qui implique le déplacement d'un fluide dans un fluide sous l'effet d'une poussée verticale engendrée par une différence de masse volumique.

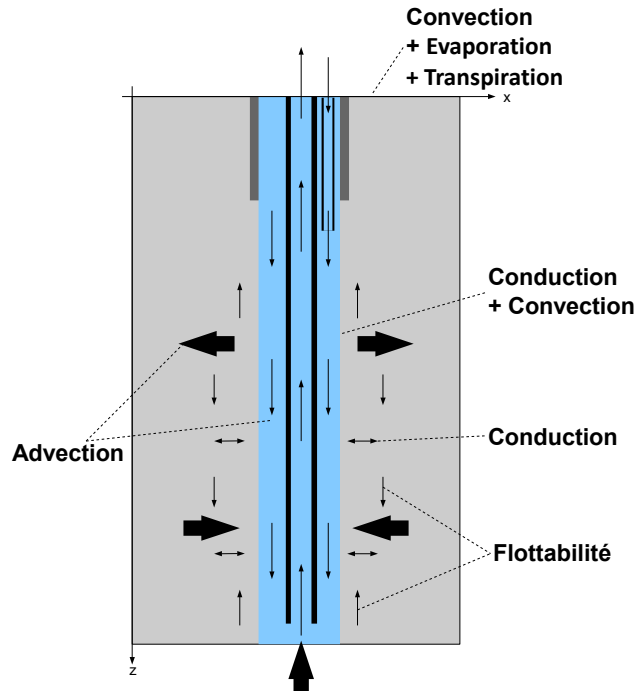


Figure 2.2 Mécanismes de transfert de chaleur impliqués dans la réponse thermique d'un PCP. Adaptée de Rees et al. (2004).

Sans saignée et pour des milieux homogènes (voir Figure 2.3), l'advection se manifeste également puisque le pompage et l'injection d'eau dans le puits modifient les charges hydrauliques à proximité du puits et induisent ainsi un écoulement entrant ou sortant d'eau (Yuill et Mikler, 1995). En effet, lorsque le puits est opéré, une pompe submersible génère un écoulement vertical dans le puits, l'eau injectée circule donc dans le puits jusqu'à être pompée à nouveau. Ainsi, le pompage et l'injection d'eau dans le PCP modifient les charges hydrauliques, ce qui favorise l'entrée d'eau dans la partie du puits où se trouve la pompe et la sortie d'eau dans la partie où il y a injection. Kastrinos et al. (2019) ont observé, grâce à des traceurs géochimiques, que le transfert de chaleur par conduction était dominant par rapport au transfert de chaleur par advection en l'absence de saignée. Le PCP était localisé dans l'unité géologique du *Cambridge Argillite*, une unité riche en argiles et présentant plusieurs zones fracturées. Outre cette étude, peu de résultats sont disponibles pour évaluer la contribution de l'advection en l'absence de saignée à l'échange de chaleur avec le milieu géologique, particulièrement dans les milieux hétérogènes (Beaudry et al., 2018).

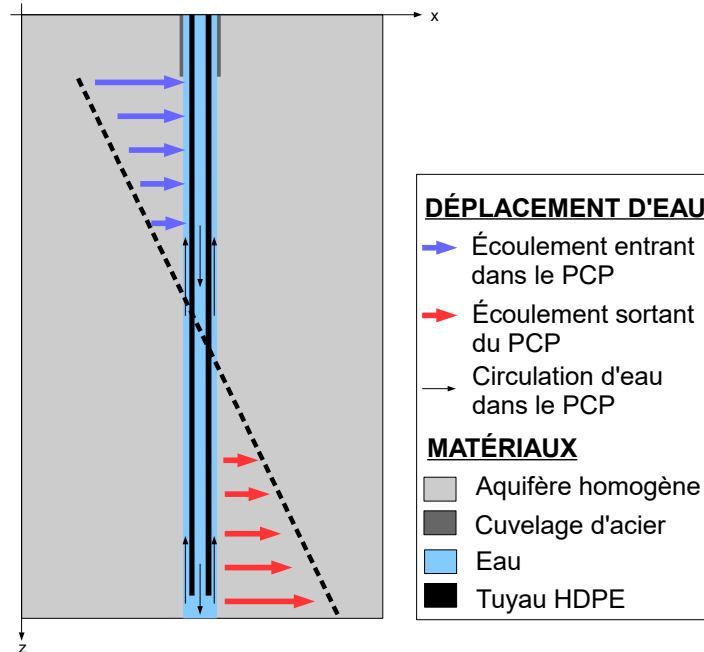


Figure 2.3 Circulation d'eau entre le PCP et l'aquifère. Adaptée de Yuill et Mikler (1995).

Contexte favorable aux PCP et caractérisation

Certains contextes géologiques présentent des conditions favorables à la mise en place et l'opération de systèmes dotés de PCP. Selon Spitler et al. (2002), les conditions favorables à l'installation d'un PCP sont les suivantes :

- socle rocheux peu profond ;
- nappe phréatique près de la surface ;
- eau souterraine peu réactive ;
- perméabilité moyenne à élevée ;
- conductivité thermique élevée.

Un socle rocheux peu profond est en effet associé à un tubage à plus faible profondeur. D'abord, cela réduit les coûts d'installation, mais cela est aussi associé à une amélioration de l'échange thermique (Spitler et al., 2002). La nappe phréatique située près de la surface permet de sélectionner une pompe ayant une puissance moindre puisque les pertes de charge sont moins importantes. De plus, la combinaison d'un puits profond et d'une nappe d'eau près de la surface implique qu'un important volume d'eau est disponible. L'eau souterraine peu réactive permet d'éviter certains problèmes de colmatage qui peuvent mener à une diminution des performances du PCP (Cerclet et al., 2020) voire à un arrêt complet du fonctionnement

du système. Une conductivité hydraulique élevée et une conductivité thermique élevée sont associées à de bonnes performances d'un système géothermique équipé de PCP (Spitler et al., 2002). La caractérisation hydrogéothermique permet donc de vérifier que le site hôte présente ces spécificités.

Parmi les essais requis pour caractériser le site pouvant accueillir des PCP, un essai de pompage permet d'estimer les propriétés hydrauliques d'un aquifère. Il s'agit d'un essai dont les procédures de réalisation et d'interprétation sont bien connues et décrites en détail dans Chapuis (1999). Généralement, l'essai est réalisé à un débit de pompage constant dans le puits de pompage et les rabattements sont mesurés dans les puits d'observation qui sont disposés aux alentours du puits de pompage. En l'absence de puits d'observation, les rabattements et la remontée sont mesurés dans le puits de pompage uniquement.

Dans le cas des aquifères fracturés, l'installation d'un massif filtrant et d'une crépine n'est pas requise. Ainsi, les résultats de l'essai de pompage correspondent à l'estimation des propriétés hydrauliques sur toute la longueur du puits ne présentant pas de cuvelage (Tiedeman et Hsieh, 2001). La durée de pompage et le débit de pompage influencent le volume d'aquifère investigué et donc aussi le résultat obtenu. Cette variation est attribuable à l'effet d'échelle surtout considérant les hétérogénéités structurales (Schulze-Makuch et Cherkauer., 1998).

Un moyen d'obtenir rapidement une idée de la distribution verticale de l'écoulement dans un puits est de réaliser un essai vélocimétrique qui permet d'identifier la localisation des venues d'eau le long du forage et, dans certains cas, les débits y circulant. Les principaux types de vélocimètres en forage sont basés sur la conductivité électrique d'un fluide, le vélocimètre électromagnétique, le vélocimètre à hélice et le vélocimètre à chaleur-pulsée (Beauheim et Pedler, 2007). Le vélocimètre à hélice permet de réaliser un essai dynamique c'est-à-dire en pompage et en déplaçant le vélocimètre à une vitesse déterminée dans la colonne du puits. Il permet d'identifier des venues d'eau plus larges que les autres types de vélocimètres soient près de 75 L/min. Lorsque le puits est en pompage, la sonde est déplacée le long du trou de forage afin d'obtenir un profil continu des débits en fonction de la profondeur. Un changement important dans la continuité de ce profil peut indiquer une zone fracturée qui contribue activement à l'écoulement de l'eau du massif rocheux vers le puits (Muldoon, 2001). Le principe est qu'en fonction du débit provenant de l'écoulement dans les fractures, les pales de l'hélice dont la sonde est équipée pivoteront proportionnellement à l'écoulement rencontré et le nombre de rotations effectuées en fonction du temps permet de calculer la vitesse de l'eau (USGS, 2016).

Un essai de réponse thermique (ERT) permet entre autres d’obtenir la conductivité thermique du milieu géologique dans lequel un puits géothermique est implanté. Il s’agit d’un paramètre essentiel à la conception d’un système géothermique (Spitler et Gehlin., 2015) et ce, quel que soit le type de puits géothermique impliqué. Les essais sont généralement réalisés avec des unités de réponse thermique. Quant à l’interprétation d’un ERT, une approche largement utilisée est l’approximation de premier ordre de la source linéique infinie (Morgensen, 1983). Cette approche repose uniquement sur la conduction de chaleur et ne considère donc pas la contribution de l’advection. L’interprétation d’un ERT peut aussi passer par l’emploi d’un modèle numérique. C’est une méthode qui permet de représenter des géométries plus complexes et un aquifère hétérogène. Dans ce cas, l’interprétation passe par la recherche d’une combinaison de paramètres qui permettra de reproduire les signaux de température enregistrés pendant l’ERT.

Synthèse

Le fonctionnement des puits à colonne permanente repose sur des processus complexes qui dépendent de l’interaction avec l’eau souterraine. Leur conception requiert donc une étude approfondie de l’aquifère qui les accueille.

2.2 Impact du contexte hydrostratigraphique sur la réponse thermique

La section suivante traite des essais de réponse thermique ayant été menés sur des PCP, puis des études expérimentales menées sur des PCP qui sont localisés dans des aquifères présentant des hétérogénéités en couches. Ensuite, les travaux de modélisation des PCP ayant encore une fois considéré l’installation de PCP dans un aquifère fracturé sont introduits afin de statuer sur l’influence du contexte hydrostratigraphique sur la réponse thermique des PCP.

2.2.1 ERT sur des PCP

Dans les dernières années, les PCP ont reçu davantage d’attention en termes de nombre de publications. Toutefois, en comparaison aux études menées sur des puits en boucle fermée, relativement peu d’études expérimentales présentant des ERT réalisés sur des PCP ont été publiées. Les paragraphes qui suivent relatent les publications présentant des ERT sur des PCP.

Koenig et Goodhall (2010) présentent un ERT réalisé sur un puits à colonne permanente implanté dans un gneiss saturé et annoncent une conductivité thermique effective de 5.35

W/mK. Ils attribuent les valeurs effectives élevées des paramètres thermiques obtenus à l'écoulement d'eau et à la fracturation le long du trou de forage. Choi et al. (2012) ont étudié l'influence de la saignée sur la performance thermique d'un PCP en comparant les conductivités thermiques effectives obtenues lors d'essais avec et sans saignée. Ils ont démontré les bénéfices de l'emploi de la saignée en obtenant une conductivité thermique effective avec saignée 1.47 fois supérieure à celle obtenue sans saignée.

Lee et al. (2018) rapportent les résultats d'une série d'ERT visant à évaluer l'effet de la géologie, de la profondeur du puits et de la conductivité thermique effective sur la performance d'un PCP. Selon leurs analyses, aucune relation linéaire n'a été obtenue entre la conductivité thermique effective et la profondeur du puits pour chaque type de roche parce que l'écoulement de l'eau souterraine affecte les mesures de conductivité thermique. Beaudry et al. (2019) ont réalisé un modèle numérique validé avec des données expérimentales provenant d'un ERT. Le modèle a entre autres permis l'étude de l'influence d'une fracture localisée près de la surface et son impact sur la performance thermique du PCP a été jugé potentiellement préjudiciable en cas d'exploitation en mode chauffage en climat froid et avec saignée. D'autres auteurs ont également rapporté avoir réalisé des ERT sur des puits à colonne permanente avec saignée (Chang et al., 2019; You et Lee, 2020) et sans saignée (Beaudry et al., 2018; Chang et al., 2017). L'essai mené par Beaudry et al. (2018) a été mené dans un aquifère relativement imperméable et les données acquises ont été reprises dans un modèle numérique qui a reproduit les résultats de l'ERT avec un mae de 0.14°C.

2.2.2 Géothermie en milieu hétérogène

Les hétérogénéités sont fréquentes dans les aquifères, particulièrement dans un contexte géologique sédimentaire (Morad et al., 2010). Pour les milieux stratifiés, chaque strate peut posséder des caractéristiques thermiques et hydrogéologiques distinctes. De plus, la fracturation du socle rocheux contribue à hétérogénéiser l'aquifère. Les fractures peuvent contribuer à l'écoulement de l'eau souterraine, elles sont dans ce cas, qualifiées d'hydrauliquement actives. Les réseaux de fractures dépendent de l'historique géologique du site et il peut s'avérer complexe de caractériser les zones fracturées lorsque peu de forages ou peu d'essais ont été menés. Toutefois, les zones fracturées peuvent concentrer ou diviser l'écoulement de l'eau le long de la paroi d'un forage lorsqu'elles sont intersectées (Singhal et Gupta., 2010).

Dans les deux dernières décennies, des procédures d'interprétation des ERT ont été développées afin de considérer les cas plus complexes comme la présence de zones de fractures. Le

paragraphe suivant rapporte quelques travaux expérimentaux d'ERT menés sur des puits en boucle fermée dans des milieux géologiques hétérogènes, puisque cette littérature est quasi non existante pour les PCP.

L'impact de la présence d'hétérogénéités dans les aquifères rocheux fracturés a largement été étudié pour les puits en boucle fermée, et ce, autant avec des simulations (Acuña et al., 2009; Aranzabal et al., 2016a,b; Fujii et al., 2009) qu'avec des essais expérimentaux (Dalla santa et al., 2021; McDaniel et al., 2014; Radioti et al., 2016). D'abord, concernant la distribution du transfert de chaleur conductif, il a été démontré qu'en présence d'un socle rocheux stratifié, l'échange de chaleur est moindre pour les couches moins perméables (Luo et al., 2014). L'effet de l'écoulement souterrain sur la performance des systèmes géothermiques en boucle fermée a également été étudié et il s'agit d'un des paramètres d'importance lorsqu'il est question de la restitution thermique (Dehkordi et Schincariol, 2014). Un flux advectif important améliore l'efficacité des échangeurs souterrains en boucle fermée (Dehkordi et Schincariol, 2014). La conductivité thermique équivalente se trouve à augmenter lorsque la vitesse de circulation de l'eau souterraine augmente (Li et al., 2020). Ainsi, les travaux énoncés précédemment mettent en lumière l'influence de l'écoulement souterrain sur la performance des systèmes géothermiques à boucle fermée alors que ces derniers ne sont pourtant pas en lien hydraulique direct avec l'aquifère comme c'est le cas pour les PCP.

L'étude de l'influence des fractures sur la réponse thermique des PCP a été abordée principalement avec une approche qui repose sur la modélisation. Certains auteurs ont évalué l'influence d'une zone fracturée ou d'une fracture sur la réponse thermique d'un PCP dans le cadre de travaux de modélisation. Deng (2004) a employé deux modèles numériques afin de comparer la réponse thermique d'un PCP dans un milieu qui est fracturé versus un milieu géologique homogène. La différence maximale entre les températures des deux simulations avoisinait les 2°C avec une saignée constante de 10%. De plus, c'est le modèle dans lequel le PCP est implanté dans un milieu homogène qui offre les meilleures performances thermiques. Plus tard, les travaux de modélisation de Croteau (2011) ont mis de l'avant l'impact bénéfique appréciable qu'une seule zone fracturée peut avoir sur la réponse thermique d'un PCP en présence de saignée en comparant un modèle fracturé à un modèle de type milieu poreux équivalent.

Un modèle numérique représentant un aquifère fracturé réalisé par Nguyen et al. (2015) a en outre permis d'établir que la présence d'une fracture peut être favorable à l'opération d'un

PCP quand celui-ci est opéré avec saignée. En absence de saignée, leurs résultats suggèrent qu’une seule zone fracturée n’a pas d’influence sur la réponse thermique du PCP.

À partir de résultats expérimentaux, Beaudry et al. (2019) ont également démontré qu’en présence de saignée, une fracture située près de la tête de puits peut affecter la réponse thermique d’un PCP. En se basant sur des simulations réalisées avec un modèle numérique, Beaudry et al. (2019) a étudié l’effet d’une fracture située dans la partie inférieure du puits sur la réponse thermique du PCP. Selon ses résultats, une fracture située en profondeur peut également améliorer l’efficacité de la saignée. Les travaux précédemment mentionnés sont les seuls qui traitent de la réponse thermique des PCP en milieu fracturé. Beaudry et al. (2018) a rapporté un ERT réalisé sans saignée sur un PCP, mais n’a pas étudié l’influence de la fracture sur la réponse thermique ni sur l’interprétation de l’essai. Ainsi, lorsque la saignée est employée, il est attendu que l’advection contribue à l’échange de chaleur et les travaux mentionnés indiquent que les zones fracturées influencent la réponse thermique du PCP. La contribution du transfert de chaleur advectif n’est toutefois pas connue pour une opération sans saignée en présence de fractures.

La plupart des travaux disponibles sur les PCP reposent sur l’hypothèse d’un milieu poreux équivalent. Ainsi, l’aquifère est plus souvent représenté comme un milieu homogène et isotrope. Cette hypothèse est valide lorsqu’il y a une distribution uniforme des fractures et que ces dernières présentent des caractéristiques similaires en termes d’ouverture, remplissage et de contribution à l’écoulement (Singhal et Gupta., 2010). Cela permet d’ailleurs de représenter l’advection dans l’aquifère autour du PCP pour une condition de pompage et d’injection sans saignée telle que décrite par Yuill et Mikler (1995). Dans un contexte géologique sédimentaire, des hétérogénéités telles que des zones fracturées sont fréquemment rencontrées. Pourtant, dans la littérature, seuls les travaux entrepris par Beaudry et al. (2019) reposent sur des données expérimentales et un modèle numérique 2D afin d’investiguer l’influence d’un milieu fracturé sur la réponse thermique d’un PCP. La contribution de l’advection dans la réponse thermique d’un PCP n’a pas été étudiée dans un contexte hydrostratigraphique très perméable.

Synthèse

Ainsi, un nombre limité de publications rapporte des ERT réalisés sur les PCP. Ceci est particulièrement vrai pour les PCP localisés dans un contexte géologique présentant une stratification et des zones de fractures hydrauliquement actives.

CHAPITRE 3 DÉMARCHE DE L'ENSEMBLE DU TRAVAIL DE RECHERCHE

Les travaux présentés dans ce mémoire visent à caractériser l'aquifère localisé à l'École de la Clé-des-Champs sur les plans hydrogéologique et géothermique afin d'obtenir les données nécessaires en vue de la conception d'un système géothermique doté de puits à colonne permanente. Tel que mentionné au Chapitre 1, il s'agit de l'objectif général du projet de recherche. Afin d'assurer l'accomplissement de cet objectif global deux objectifs spécifiques ont été définis.

Objectif spécifique 1 : Acquérir les paramètres hydrogéothermiques de l'aquifère au moyen d'essais de pompage, de réponse thermique et de vélocimétrie en forage.

Les Chapitres 4 et 5 visent à répondre à cet objectif. Comme présenté dans la revue de littérature, les particularités liées aux puits à colonne permanente ont été explorées, ce qui a mis en évidence le rôle des conditions hydrogéologiques et notamment la nécessité de les étudier (Croteau, 2011). Il en est de même pour l'évaluation des paramètres thermiques, plus spécifiquement la conductivité thermique (Spitler et Gehlin., 2015).

D'abord, le Chapitre 4 offre d'un point de vue théorique, le contexte géologique et hydrogéologique régional dans lequel le site de l'École de la Clé-des-Champs s'inscrit. Une compréhension au niveau régional s'avère nécessaire dans le processus de sélection d'un site hôte pour des puits à colonne permanente, notamment lorsqu'on considère qu'une étude hydrogéologique est requise. Donc, une revue à l'échelle régionale a permis de confirmer les plages de valeurs attendues pour les paramètres hydrogéologiques et géochimiques du site, ce qui est nécessaire avant de s'attarder à une étude plus locale.

Le Chapitre 5 regroupe l'ensemble des valeurs acquises permettant de concevoir un système géothermique équipé de puits à colonne permanente performants. Selon la revue de littérature, les paramètres d'importance sont principalement la conductivité thermique et hydraulique et le Chapitre 5 présente leurs méthodes d'acquisition, d'interprétation ainsi que les résultats obtenus, ce qui répond donc explicitement à l'objectif spécifique 1. De plus, les profils vélocimétriques sont présentés dans ce chapitre et ces derniers permettent d'identifier la localisation des fractures hydrauliquement actives sur un profil vertical dans l'aquifère. Ils viennent supporter les observations réalisées pendant les forages, ce qui supporte les hypothèses avancées quant à l'occurrence des zones fracturées ainsi que le profil vertical de conductivité hydraulique.

Objectif spécifique 2 : Évaluer l'influence du contexte hydrostratigraphique sur la réponse thermique d'un puits à colonne permanente opéré sans saignée.

Le Chapitre 6 vise à atteindre cet objectif et un modèle numérique développé pour étudier l'influence du contexte hydrostratigraphique y est présenté. Ce dernier incorpore l'ensemble des données pertinentes à la compréhension du contexte hydrogéothermique du site de l'École de la Clé-des-Champs. Le modèle numérique détaillé a permis l'interprétation de l'essai de réponse thermique sans saignée en considérant le couplage de l'écoulement d'eau souterraine et des mécanismes de transfert de chaleur. C'est l'utilisation du modèle numérique qui a permis de dégager la valeur de la conductivité thermique moyenne du milieu géologique du site de l'École de la Clé-des-Champs. De plus, le Chapitre 6 présente le profil vertical de la conductivité hydraulique pour l'aquifère rocheux au site de l'École de la Clé-des-Champs. Ce profil découle des observations et du suivi des venues cumulées pendant les forages et le modèle numérique a permis de tester et valider ce profil de conductivité hydraulique. Le Chapitre 6 est un article scientifique soumis pour publication à la revue *Geothermics*.

Le Chapitre 7 est une discussion générale traitant des principales contributions du projet de recherche. En dernier lieu, le Chapitre 8 permet de conclure le mémoire sur l'ensemble des travaux ayant été réalisés dans le cadre du présent projet de recherche ainsi que de proposer certaines voies à explorer pour de futurs travaux.

CHAPITRE 4 CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE RÉGIONAL

Dans ce chapitre, le site de l'École de la Clé-des-Champs est présenté dans le contexte hydrogéothermique régional. L'information présentée dans ce chapitre provient d'une recherche documentaire ayant permis de sélectionner le site de l'École la Clé-des-Champs comme un site adapté aux PCP.

4.1 Site d'étude

Le site d'étude est situé dans la municipalité de Saint-Augustin-de-Mirabel sur la Rive-Nord de l'Île de Montréal comme indiqué à la Figure 4.1. Il s'agit de l'École primaire de la Clé-des-Champs se trouvant sur le territoire du Centre de services scolaire des Mille-Îles (CSSMI). Le bâtiment est localisé au 14700 Rue Jean Simon, à Saint-Augustin-de-Mirabel dans la province de Québec et est établi dans un quartier résidentiel. Les travaux réalisés dans le cadre de la présente caractérisation se sont déroulés dans la cour de l'école soit au sud-est du bâtiment.

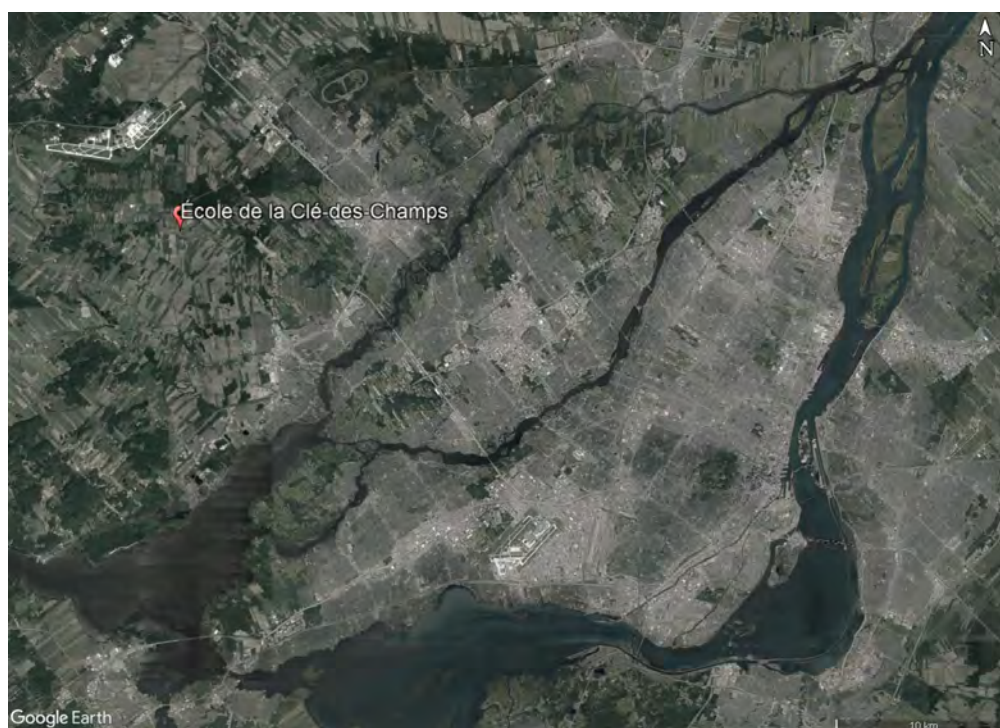


Figure 4.1 Localisation du site d'étude de l'École de la Clé-des-Champs.

4.2 Contexte géologique régional

Précédemment à la mobilisation au site de Mirabel, une revue du contexte géologique a été entreprise. Cela a permis d'établir que le site avait d'abord un potentiel géothermique intéressant, mais également de statuer sur sa capacité à accueillir un système équipé de PCP.

4.2.1 Géologie régionale

Le site de Mirabel se trouve dans la province géologique des Basses Terres du Saint-Laurent telles que délimitées par Globensky (1987). Le Système d'information géominière du Québec (SIGEOM) du MERN (2020) et le document Stratigraphie des Basses Terres du Saint-Laurent de Gervais (2012) sont deux ressources qui ont été employées afin de dresser un portrait de la géologie au site. D'abord, une faible épaisseur de mort terrain est présente dans le secteur. Ensuite se succèdent les Formation de Theresa, Formation de Cairnside et la Formation de Covey Hill. Les lithologies principales de ces unités géologiques sont présentées au Tableau 4.1. La Formation de Cairnside représente un enjeu pour les forages puisque l'arénite quartzifère est dure, abrasive et compétente. Toutefois, il s'agit d'une formation d'intérêt, car elle est riche en quartz, un minéral possédant une conductivité thermique élevée. Selon le SIGEOM, aucune faille régionale ne recoupe le site de Mirabel.

Tableau 4.1 Descriptions lithologiques des unités géologiques

| Unité | Description ¹ |
|-------------------------|--|
| Formation de Theresa | Dolomie avec interstratification de grès quartzitique et dolomitique |
| Formation de Cairnside | Grès quartzitique |
| Formation de Covey Hill | Conglomérat, grès grossier arkosique, grès quartzitique |

¹ Les descriptions proviennent de SIGEOM 2020.

4.3 Contexte hydrogéologique régional

La base de données du Système d'information hydrogéologique (SIH) (MELCC, 2020) a été utilisée pour colliger des données relatives à la profondeur du roc, à la profondeur de la nappe phréatique et aux venues d'eau attendues dans le secteur. La carte affichant la profondeur du roc est présentée à la Figure 4.2. On y remarque que pour la localisation de l'École de la Clé-des-Champs, la profondeur du roc varie entre 5 et 10 m de profondeur. L'épaisseur de mort terrain est donc faible puisque le roc est situé près de la surface du sol, ce qui est

favorable à l'implantation de PCP (Spitler et al., 2002). La carte des débits présentée à la figure 4.3 indique que des débits entre 60 et 120 L/min ont été enregistrés à proximité de l'École de la Clé-des-Champs. Les cartes présentées ont été générées avec le logiciel *Surfer®* (Golden Software, LLC).

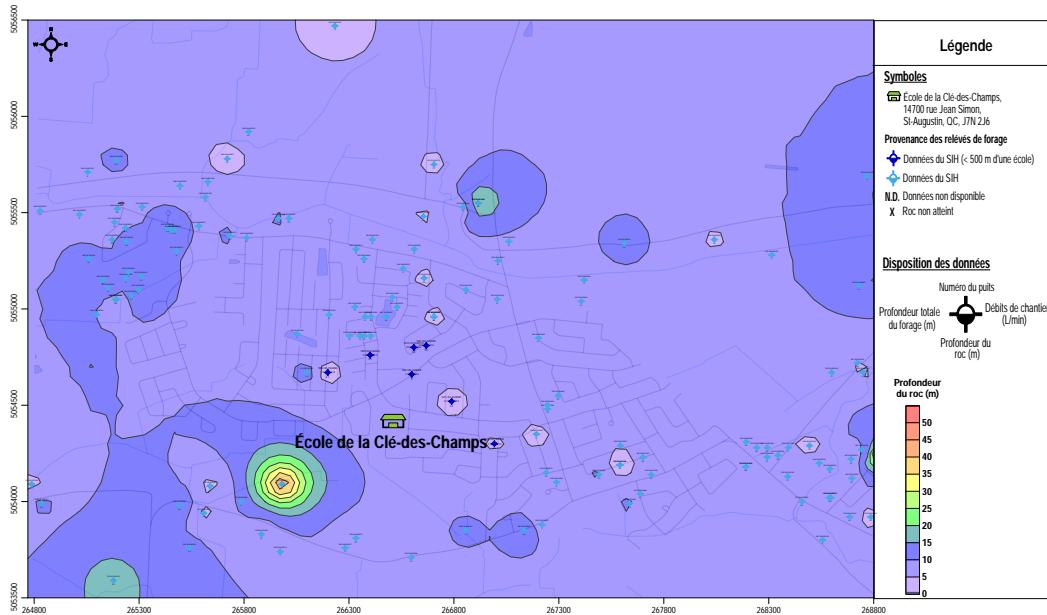


Figure 4.2 Évaluation de la profondeur du roc à partir des données du SIH.

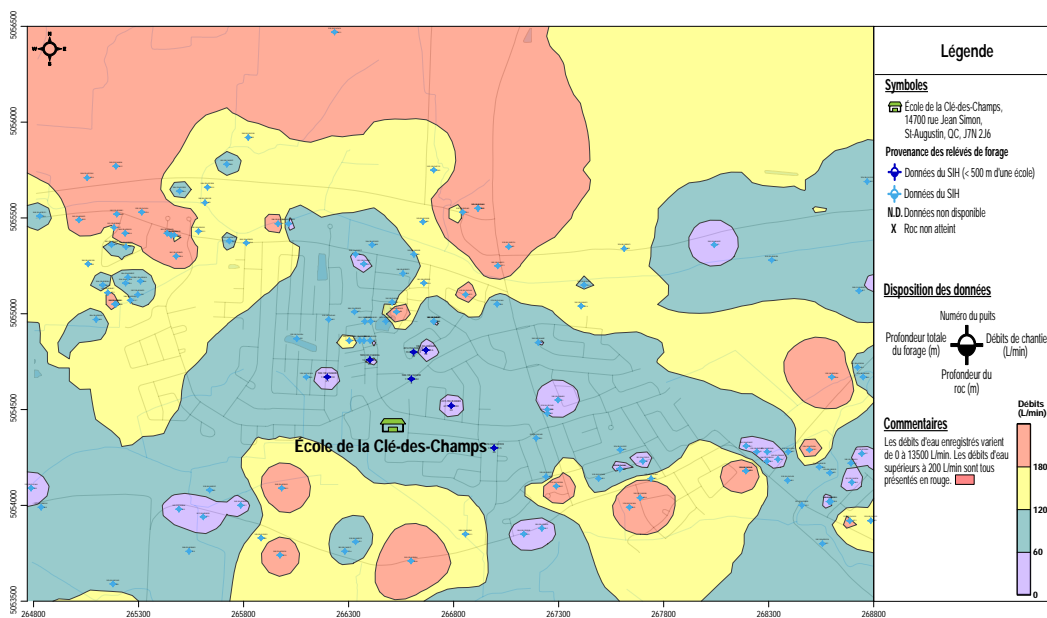


Figure 4.3 Évaluation des venues d'eau au droit des forages disponibles dans le SIH.

Aucun forage disponible sur la base de données du SIH ne présente une profondeur semblable à celle des PCP. Toutefois, les débits enregistrés fournissent tout de même de l'information pour les unités hydrostratigraphiques plus près de la surface. On remarque une certaine variabilité quant à la distribution des débits enregistrés, certains débits étant très élevés et de l'ordre de 10 000 L/min.

Les données provenant du SIH peuvent toutefois dater et ne font pas l'objet d'un processus de vérification rigoureux. Ainsi, il est possible que les données qui s'y retrouvent et les résultats de leur interpolation ne puissent pas représenter adéquatement les contraintes locales au site de Mirabel. Cependant, cette base de données collige un grand nombre d'informations et permet de dégager les tendances pour un secteur donné en matière de profondeur du roc et de venues d'eau. Deux études hydrogéologiques (COBAMIL, 2011; Savard et al., 2006) à plus grande échelle sont présentées afin de bonifier l'évaluation du contexte hydrogéothermique régional.

4.3.1 Études hydrogéologiques régionales

En 2011, le COBAMIL (2011) a publié un portrait du bassin versant de la Rivière du Chicot. Le site de l'École de la Clé-des-Champs se trouve près de la limite ouest du bassin versant de la Rivière du Chicot.

Peu de données relatives à la qualité de l'eau souterraine sont présentées dans cette étude. Dans le portrait du bassin versant, l'eau analysée à la station de la Rivière du Chicot est décrite comme étant de très mauvaise qualité, en raison notamment des valeurs élevées de la turbidité, des matières en suspension et des concentrations en phosphore total.

En 2013, une étude hydrogéologique régionale intitulée *Caractérisation hydrogéologique régionale et intégrée du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec* a été rendue publique par la Commission géologique du Canada (Savard et al., 2006). Cette étude regroupe un ensemble de données hydrogéologiques pour la région des Basses-Laurentides, ce qui inclut le présent site de Mirabel et l'étude met l'accent sur l'aquifère rocheux. Les figures suivantes sont extraites de leur rapport.

D'abord, la carte de l'élévation de la surface piézométrique présentée à la Figure 4.4 permet d'évaluer le sens de l'écoulement d'eau souterraine à l'échelle régionale. On y remarque que

l'élévation du niveau piézométrique au site de Mirabel de la Clé-des-Champs se trouve entre les élévations 60 et 50 m. À partir de cette carte, un gradient hydraulique a été estimé et celui-ci correspond à 0.0065 m/m s'écoulent du Nord nord-ouest vers le sud sud-est.

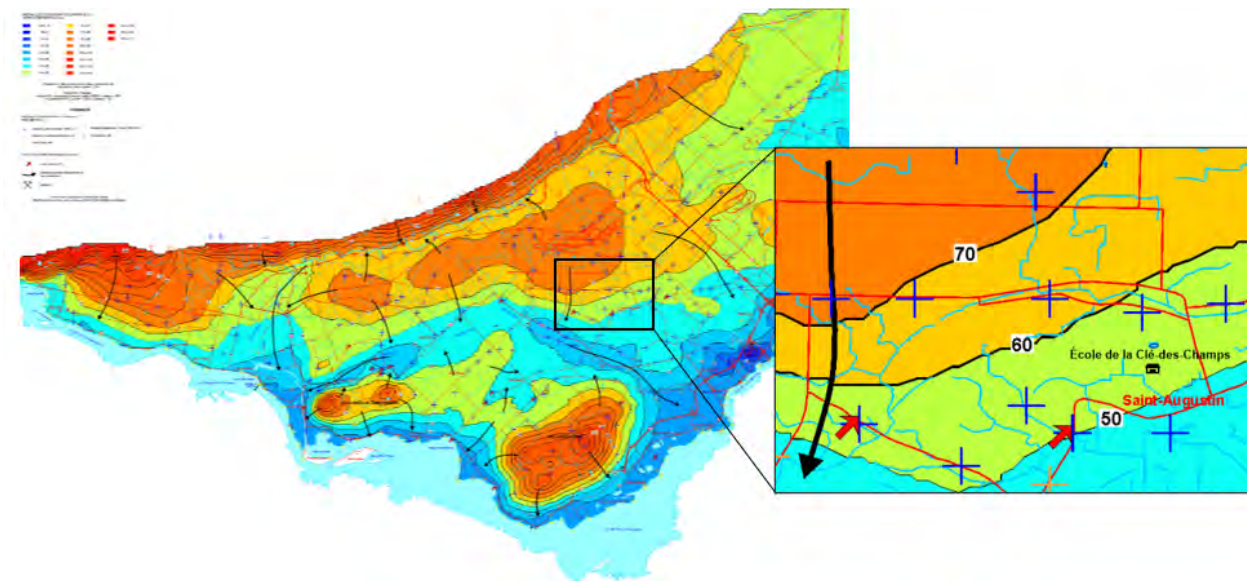


Figure 4.4 Élévation de la surface piézométrique de l'aquifère rocheux. Tirée de Richelieu Hydrogéologie Inc. (2020) d'après Savard et al. (2006).

L'infiltration à la surface du site de Mirabel est mineure et comme illustrée à la Figure 4.5, la recharge à la nappe du secteur a été évaluée de 0 à 25 mm/année. Une importante zone de recharge se trouve au nord-ouest du site et celle-ci contribue possiblement à l'approvisionnement en eau de l'aquifère rocheux localisé à l'École de la Clé-des-Champs si l'on considère la direction de l'écoulement régional de l'eau souterraine.

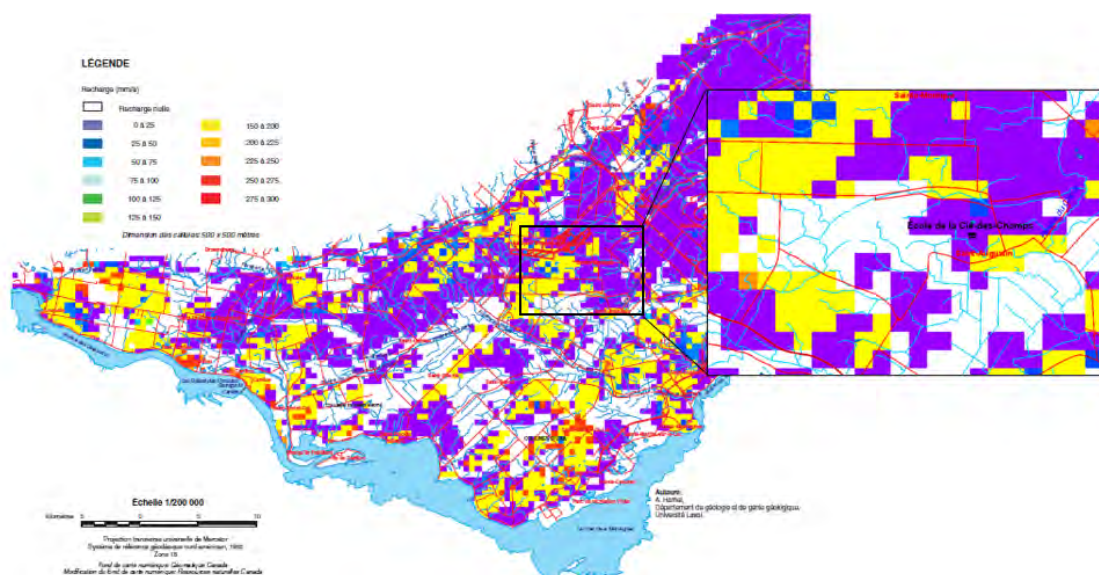


Figure 4.5 Identification des zones de recharges de l'aquifère rocheux. Tirée de Richelieu Hydrogéologie Inc. (2020) d'après Savard et al. (2006).

La Figure 4.6 décrit les types de conditions de confinement des aquifères rocheux sur le territoire couvert par l'étude régionale. L'École de la Clé-des-Champs est située dans une zone caractérisée par un aquifère à nappe captive et est localisée au nord d'un aquifère à nappe libre ou semi-captive. Cela est cohérent avec l'évaluation des zones de recharge de l'aquifère rocheux.

La Figure 4.7 présente le logarithme de la conductivité hydraulique de l'aquifère rocheux. Dans le secteur de Saint-Augustin-de-Mirabel, le logarithme de la conductivité hydraulique se trouve dans une plage variant de -4 à -4.5, ce qui correspond à 1×10^{-4} m/s et 3.2×10^{-5} m/s. Il s'agit d'une conductivité hydraulique 3 à 4 ordres de grandeur plus faible que ce qui est observé dans le reste du territoire couvert par l'étude. Cette conductivité hydraulique correspond cependant à une valeur modérément élevée. Il n'y a aucune mention faite par Savard et al. (2006) des formations géologiques liées à ces perméabilités. Il s'agit d'un bon indicateur pour l'installation d'un système géothermique qui requiert le pompage d'eau souterraine.

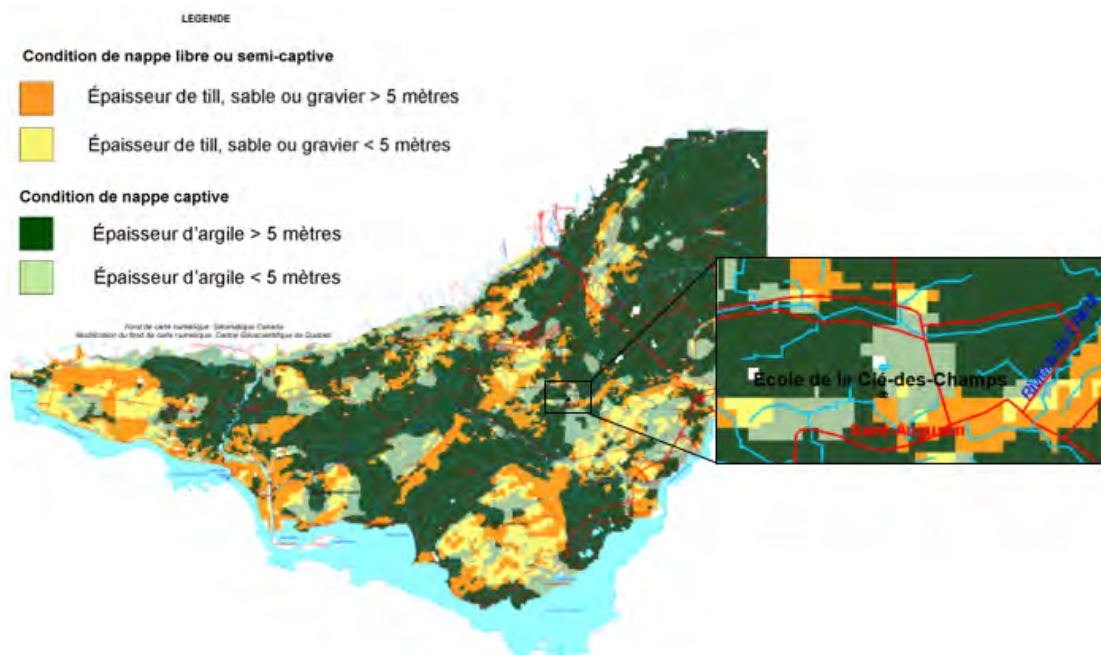


Figure 4.6 Identification des conditions de confinement de la nappe phréatique. Modifiée de Savard et al. (2006).

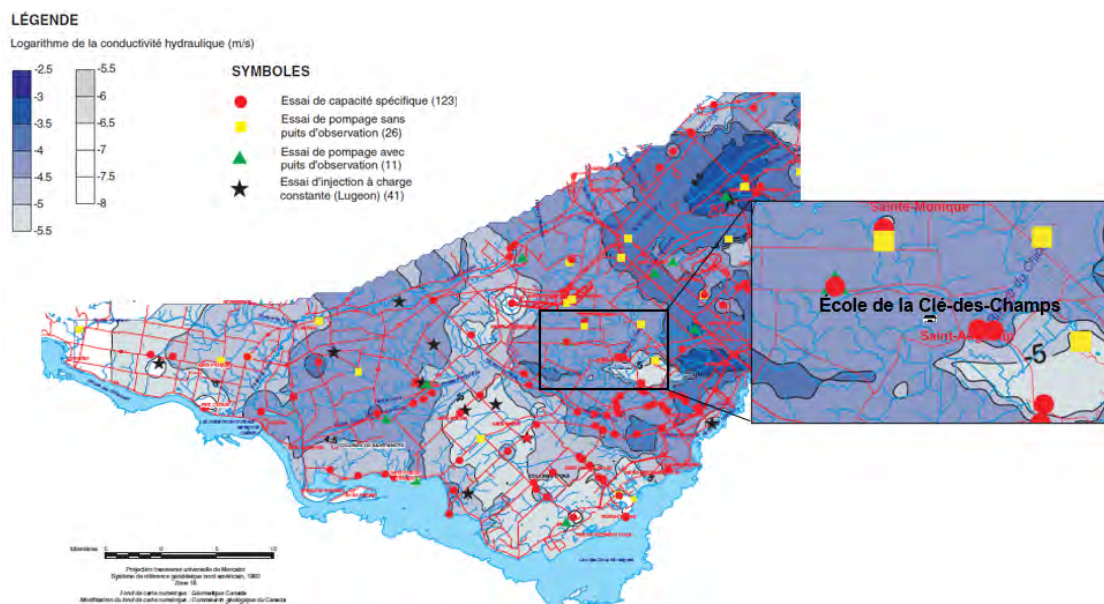


Figure 4.7 Répartition du logarithme de la conductivité hydraulique sur le territoire couvert par l'étude régionale. Modifiée de Savard et al. (2006).

En ce qui concerne la qualité de l'eau souterraine, l'étude rapporte à l'échelle régionale une tendance légèrement basique en ce qui concerne le pH ainsi qu'une eau dure dont la dureté atteint des valeurs importantes (plus de 500 mg/L CaCO_3) entre autres dans le secteur de Saint-Augustin-de-Mirabel. De plus, des concentrations élevées en manganèse sont typiquement rencontrées sur le territoire couvert par l'étude. Il en est de même pour les concentrations en fer et sulfure, même si localement ce n'est pas le cas pour Saint-Augustin-de-Mirabel.

En résumé, le site de l'École de la Clé-des-Champs se situe dans une région où l'aquifère rocheux présente des conditions qui semblent favorables à l'implantation de PCP et cette recherche documentaire a confirmé le caractère favorable du site pour l'implantation d'un projet pilote sur l'efficacité des PCP. En effet, le roc semble localisé à une faible profondeur dans le secteur. Considérant la plage attendue de conductivité hydraulique ainsi que les venues d'eau importantes qui ont été enregistrées dans des forages réalisés à proximité du site, une perméabilité élevée est attendue au site de l'École de la Clé-des-Champs. Certaines des formations géologiques pouvant être rencontrées au droit du site de Mirabel sont riches en quartz, un minéral ayant une conductivité thermique élevée. De plus, les données géochimiques accessibles laissent croire que l'eau souterraine dans le secteur est peu active bactériologiquement. Le chapitre suivant présente la caractérisation hydrogéothermique détaillée du site de l'École de la Clé-des-Champs.

CHAPITRE 5 CARACTÉRISATION HYDROGÉOTHERMIQUE

Ce chapitre collige l'ensemble des essais ayant été réalisés au site de l'École de la Clé-des-Champs et les résultats qui en découlent. Les différents volets qui ont été considérés pour la caractérisation du site y sont présentés soient : la géologie, l'hydrogéologie, la géothermie et la géochimie. La caractérisation du site a été orientée vers l'acquisition des paramètres essentiels à la conception d'un système géothermique équipé de PCP. Les travaux de terrain décrits dans ce chapitre ont été réalisés dans le cadre de ce projet de maîtrise, à l'exception des profils velocimétriques qui ont été réalisés par Dion (2021). Il est à noter qu'une partie des interprétations qui découlent de ces travaux a été réutilisée par Richelieu Hydrogéologie Inc. (2020) dans le cadre d'une demande de certificat d'autorisation environnemental devant permettre d'opérer le système géothermique doté de PCP à l'École de la Clé-des-Champs.

5.1 Contexte géologique local

L'évaluation de la géologie au site de Mirabel permet d'établir les unités hydrostratigraphiques qui définissent l'aquifère. Des forages ont été réalisés afin de déterminer la géologie et de mener les essais permettant d'obtenir les paramètres thermiques et hydrauliques du site. Ainsi, la géologie locale a été évaluée grâce à deux forages destructifs réalisés en août 2020. Le roc a été foré à l'aide d'un marteau fond-de-trou et l'action d'air comprimé a permis de remonter les fragments en surface qui ont ensuite été échantillonnés. La localisation des puits PE-20-01 et PE-20-02 est présentée à la Figure 5.1. Les forages ont été positionnés afin d'être parallèles à la direction de l'écoulement régional de l'eau souterraine dans le but d'en capter la composante principale. Le puits PE-20-01 est localisé en amont hydraulique du PE-20-02. La distance horizontale entre les deux puits est de 27.45 m.



Figure 5.1 Localisation des forages réalisés à l'École de la Clé-des-Champs à Saint-Augustin-de-Mirabel.

L'aménagement et les dimensions des puits sont présentés à la Figure 5.2. Le puits PE-20-01 a une profondeur totale de 133.2 m et il était destiné à être employé comme un PCP, il a donc été aménagé en conséquence avec un tuyau de polyéthylène haute densité jusqu'à une profondeur de 132.6 m. Concernant le PE-20-02, sa profondeur totale est de 131.6 m et le diamètre du forage est de 159 mm. Un tubage en acier a été installé dans les deux puits pour éviter que les dépôts non consolidés ne s'affaissent et tombent le puits. Pendant la réalisation des forages, les débits cumulatifs, le temps de travail et le taux d'avancement des forages ont été recueillis ce qui permet de suivre la progression des forages.

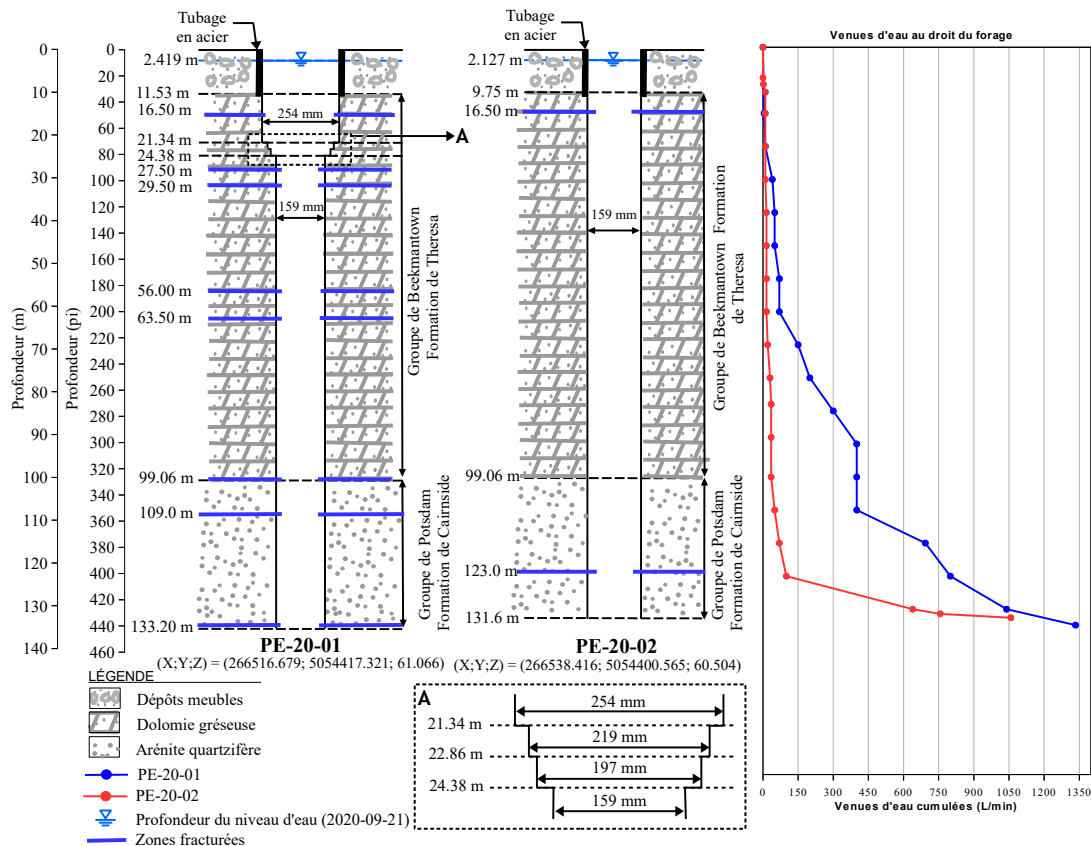


Figure 5.2 Illustration des venues d'eau cumulée en fonction de la profondeur des forages.

Afin d'identifier les différentes lithologies observées pendant les forages et d'établir une colonne stratigraphique représentative du site de Mirabel, des échantillons composites ont été prélevés. Les échantillons étaient prélevés sur une longueur de 7.62 m, ce qui correspond à la longueur d'une tige de forage. Les dépôts meubles observés au site s'apparentent à un till avec des zones plus argileuses et ont été observés de la surface jusqu'à environ 10 m de profondeur. Ensuite, de 10 m jusqu'à 99 m de profondeur, une dolomie gréseuse a été observée, celle-ci a été interprétée comme la Formation de Theresa du Groupe de Beekmantown. Puis, de 99 m jusqu'à la fin des forages, de l'arénite quartzifère a été identifiée comme étant la Formation de Cairnside du Groupe de Potsdam. En résumé, les observations qui découlent des forages sont cohérentes avec la stratigraphie attendue telle que discuté au Chapitre 4. La Figure 5.2 synthétise toutes les données acquises concernant la géologie du site. Les traits bleus représentent des zones potentiellement fracturées qui ont été identifiées pendant la réalisation des forages.

Les conditions hydrogéologiques rencontrées lors des forages ont donné un aperçu de l'écoulement important d'eau souterraine dans l'aquifère rocheux. Pendant la réalisation des forages, les débits d'eau cumulatifs ont été notés. Les venues d'eau au droit des forages étaient d'une importance significative, cumulant près de 1325 L/min au fond du puits PE-20-01. Comme illustré dans la Figure 5.2, la majorité des venues d'eau d'importance sont localisées dans la Formation de Cairnside. Il n'a pas été possible de forer plus profondément en raison de l'importance des venues d'eau.

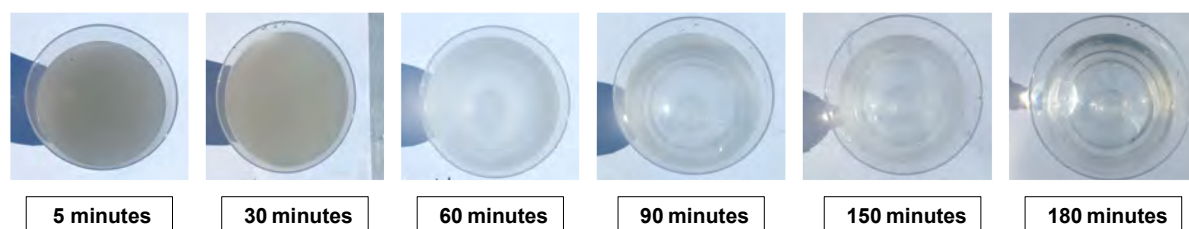


Figure 5.3 Évolution de l'eau pompée pendant le développement du puits PE-20-02.

5.2 Contexte hydrogéologique local

Le volet hydrogéologique de la caractérisation prévoyait d'obtenir les paramètres hydrogéologiques de l'aquifère en plus d'évaluer l'écoulement d'eau souterraine et de déterminer le type d'aquifère présent au site de l'École de la Clé-des-Champs. Pour ce faire, les niveaux d'eau ont été relevés pendant la période entre la réalisation des forages et l'essai de pompage.

5.2.1 Niveaux d'eau et gradient hydraulique

Les niveaux d'eau ont été relevés dans la période suivant l'aménagement des deux forages au début de l'automne 2020. Ils ont servi à estimer le gradient hydraulique au site. Le Tableau 5.1 présente les niveaux d'eau et les gradients hydrauliques au site. Les forages ont été positionnés afin de bénéficier au maximum du flux hydraulique régional, le PE-20-01 étant localisé en amont hydraulique du PE-20-02. L'évaluation de cette direction d'écoulement régional est basée sur l'étude des cartes et des données disponibles pour le secteur (COBAMIL, 2011;

Savard et al., 2006).

Tableau 5.1 Relevés des niveaux d'eau

| Date | Élévation du niveau d'eau (m) | | Gradient hydraulique (m/m) |
|------------|-------------------------------|----------|----------------------------|
| | PE-20-01 | PE-20-02 | |
| 2020-09-21 | 58.46 | 58.19 | 0.0099 |
| 2020-09-29 | 58.21 | 58.02 | 0.0069 |
| 2020-10-30 | 59.16 | 58.91 | 0.0092 |

Les valeurs du gradient hydraulique obtenues ont légèrement varié sur une période d'environ 1 mois et elles sont cohérentes avec celle déduite de l'étude hydrogéologique régionale de Savard et al. (2006) qui correspond à 0.0065 m/m.

5.2.2 Essai de pompage

Un essai de pompage à débit constant de 72 h suivi d'une remontée de 6.5 h a été réalisé le 31 octobre 2021 au puits PE-20-01 avec l'unité de réponse thermique de la *Chaire de recherche en géothermie*. Celle-ci est équipée de deux débitmètres, de capteurs de pression et d'un système d'acquisition des données. Ainsi, le débit de pompage a pu être enregistré chaque seconde pendant la durée de l'essai. De plus, l'unité est connectée au puits PE-20-01 via la conduite de pompage, elle-même étant connectée à une pompe submersible dont le panneau de contrôle se trouve dans l'unité. La pompe submersible était installée à une profondeur de 8.4 m dans le PE-20-01, soit 6 m sous le niveau d'eau. L'essai de pompage a été réalisé à un débit moyen de 130 L/min pendant 72 h. Concernant le suivi des niveaux d'eau dans les puits, des capteurs de pression indépendants de l'unité ont été installés dans les puits avec un enregistrement aux 10 secondes.

L'eau souterraine a été échantillonnée juste avant la fin de l'essai de pompage ainsi que tout juste après l'ERT. Les résultats découlant des analyses géochimiques qui ont été effectuées sont présentés à l'Annexe 1. Selon les résultats des analyses effectuées, l'eau souterraine est dure et pourrait présenter une tendance entartrante ou corrosive. Cette observation est cohérente avec la qualité de l'eau souterraine de l'aquifère régional tel que rapporté par Savard et al. (2006). De façon générale, l'eau souterraine au site de Mirabel est considérée comme agressive. Au niveau bactériologique, les analyses ont permis de noter l'absence des bactéries du fer. Étant donné que l'eau présente de faibles concentrations en fer, il est possible de conclure que le potentiel de colmatage par les bactéries du fer est très faible. Ce qui est favorable à l'opération des PCP.

La Figure 5.4 présente l'élévation des niveaux d'eau dans les puits PE-20-01 et PE-20-02. On y remarque que le débit a légèrement évolué à certains moments de l'essai. D'abord, après environ 33.25 h suivant le démarrage de l'essai, le débit moyen a légèrement augmenté, puis environ 11 h plus tard, le débit a diminué pour s'approcher de la valeur moyenne initiale. Finalement, après 72 h de pompage, une brève interruption de la pompe est survenue (2 minutes) et un redémarrage à un débit plus élevé a été effectué après cet arrêt non désiré. La pompe a ensuite été arrêtée, ce qui a permis d'enregistrer les données pendant la phase de remontée. Ces variations sont attribuées à des fluctuations dans l'alimentation électrique de la pompe. Ces fluctuations font en sorte que le débit de l'essai n'était pas toujours constant. De plus, l'arrêt soudain de la pompe et l'augmentation du débit moyen au début de la phase de remontée ont affecté les rabattements résiduels. Cela rajoute une incertitude sur les valeurs des paramètres hydrogéologiques évalués avec cette méthode.

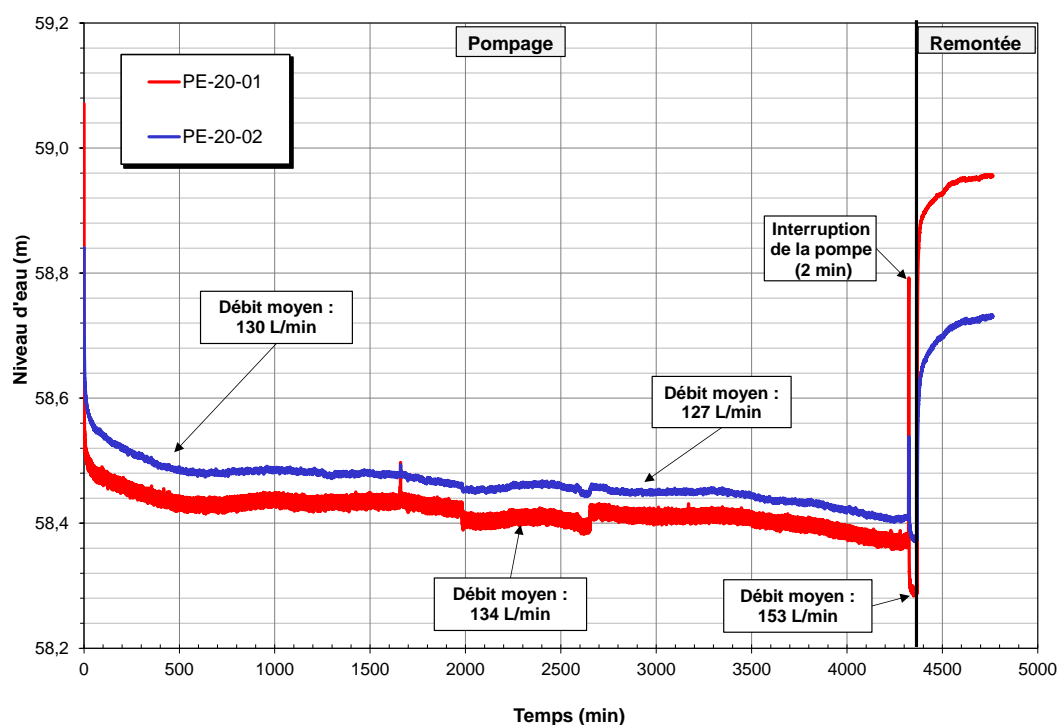


Figure 5.4 Évolution de l'élévation du niveau d'eau en fonction du temps. Modifiée d'après Richelieu Hydrogéologie Inc. (2020).

La Figure 5.5 présente les rabattements aux puits PE-20-01 et PE-20-02. Le rabattement observé au PE-20-01 sous le débit de captage principal est d'environ 0.65 m. Le rabattement maximal observé est de 0.8 m au puits PE-20-01 et correspond au débit maximal enregistré.

Les rabattements au puits PE-20-02 sont d'environ 0.36 m, mais un rabattement maximal de 0.45 m a été enregistré correspondant au débit maximal. Les rabattements enregistrés au PE-20-02 permettent de conclure qu'il existe une connexion hydraulique entre les deux puits dans l'aquifère fracturé. Les rabattements Δs tels que présentés sur la Figure 5.5 considèrent le rabattement sur un cycle logarithmique. Une épaisseur saturée de 123 m est considérée pour estimer la conductivité hydraulique. La valeur du coefficient d'emmagasinement obtenue avec la méthode rabattement temps est de 5.0×10^{-6} . Les conductivités hydrauliques respectivement obtenues au PE-20-01 et au PE-20-02 sont 6.5×10^{-5} m/s et 4.6×10^{-5} m/s.

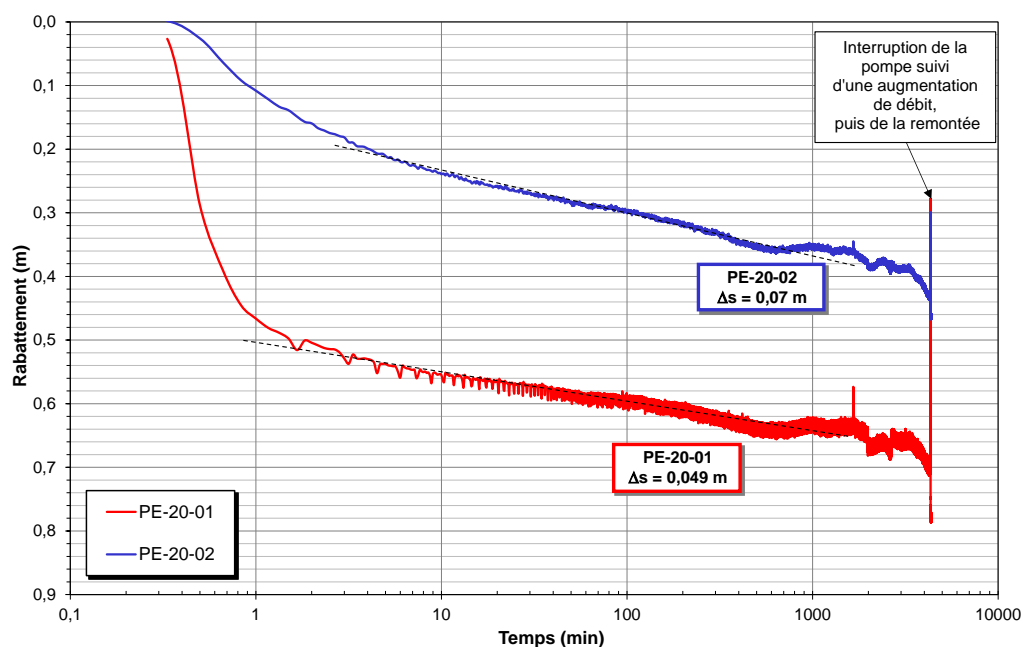


Figure 5.5 Rabattements en fonction du temps. Modifiée d'après Richelieu Hydrogéologie Inc. (2020).

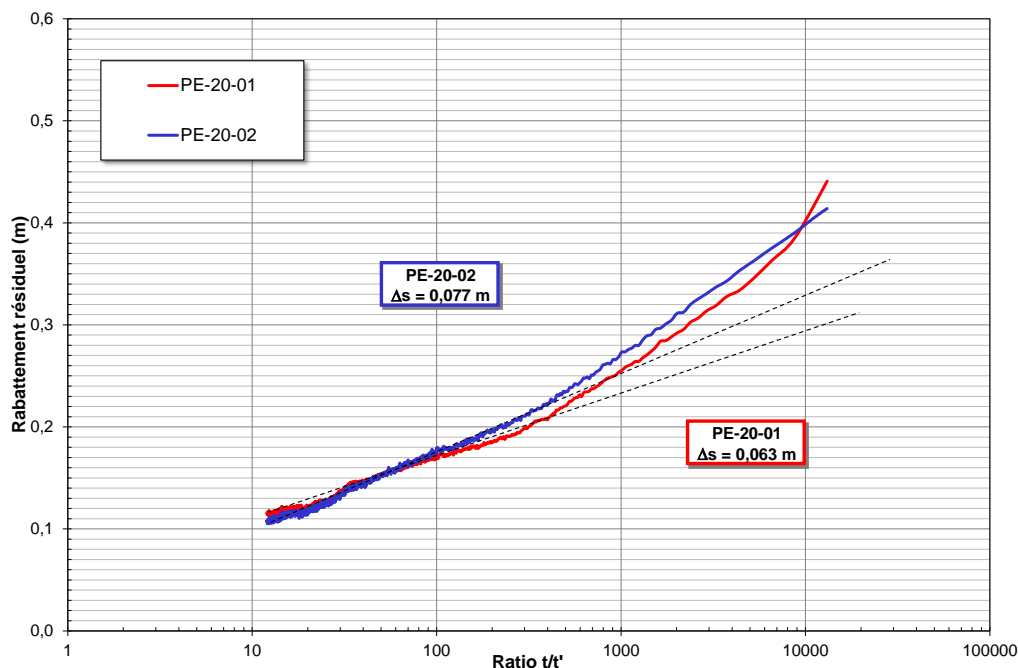


Figure 5.6 Rabattements résiduels mesurés pendant la remontée. Modifiée d'après Richelieu Hydrogéologie Inc. (2020).

La Figure 5.6 présente les rabattements résiduels en fonction du ratio du temps sur le temps depuis le début de la remontée. La phase de remontée n'était pas complète puisque le niveau d'eau dans les puits à la fin de l'enregistrement des données était environ 12 cm plus bas que le niveau initial. Les conductivités hydrauliques respectivement obtenues au PE-20-01 et au PE-20-02 sont 5.1×10^{-5} m/s et 4.2×10^{-5} m/s.

À la Figure 5.7, le graphique permettant l'analyse des données avec la méthode rabattements/distance selon Cooper-Jacob (Fetter, 2018) est présenté pour trois temps. Les trois temps ont permis de dégager des valeurs similaires de conductivité hydraulique. Les rabattements enregistrés entre 24 h et 48 h diffèrent, le régime permanent n'était donc pas atteint. Ces mesures de rabattement correspondent à deux débits moyens distincts tel qu'indiqué sur la Figure 5.4. Les coefficients d'emménagement dérivés de cette analyse sont de 4.2×10^{-7} , 4.6×10^{-7} et 2.9×10^{-7} pour les temps 10 h, 24 h et 48 h. Dans le même ordre, les conductivités hydrauliques obtenues sont de 5.6×10^{-5} m/s, 5.9×10^{-5} m/s et 5.9×10^{-5} m/s.

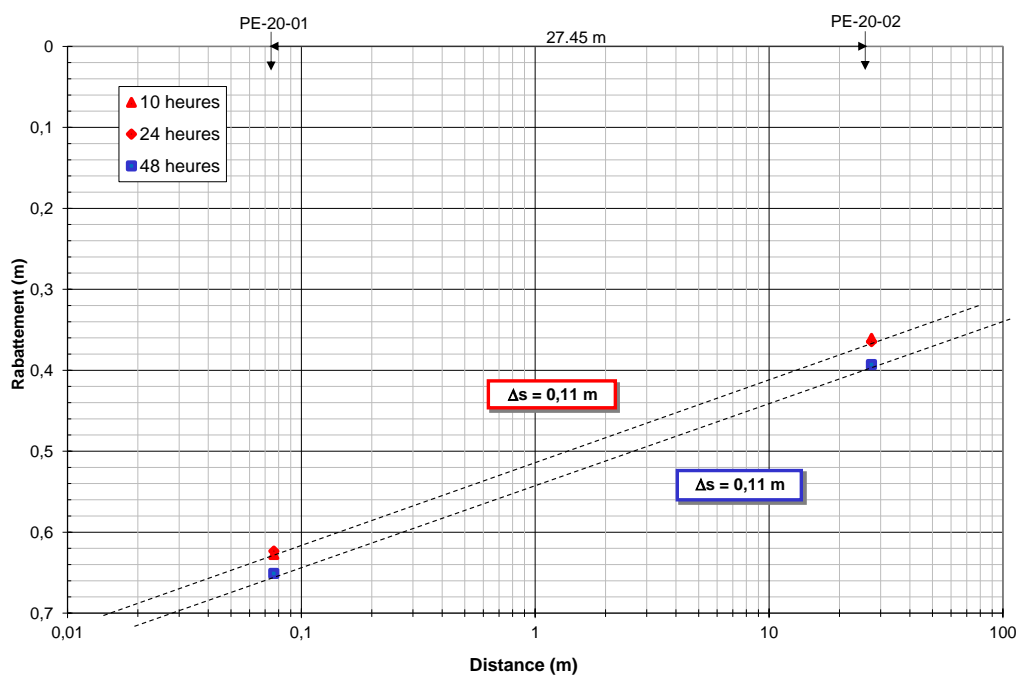


Figure 5.7 Analyses des rabattements en fonction de la distance présentées à 3 temps. Modifiée d'après Richelieu Hydrogéologie Inc. (2020).

Les valeurs de conductivités hydrauliques présentées ont été obtenues avec les méthodes d'approximation de 1er ordre du rabattement/temps, du rabattement/distance et du rabattement résiduel de Cooper-Jacob (Fetter, 2018). Les paramètres hydrauliques sont regroupés au Tableau 5.2 pour des fins de comparaison.

Tableau 5.2 Synthèse des paramètres hydrogéologiques obtenus au site de l'École de la Clé-des-Champs

| Méthode | Temps maximum ou puits considéré | Transmissivité (m^2/s) | Emmagasinement (-) | Conductivité hydraulique (m/s) |
|----------------------|----------------------------------|--|----------------------|---|
| Rabattement distance | 10 h | 0.0069 | 4.2×10^{-7} | 5.6×10^{-5} |
| | 24 h | 0.0072 | 4.6×10^{-7} | 5.9×10^{-5} |
| | 48 h | 0.0072 | 2.9×10^{-7} | 5.9×10^{-5} |
| Rabattement temps | PE-20-01 | 0.0079 | - | 6.5×10^{-5} |
| | PE-20-02 | 0.0056 | 5.0×10^{-6} | 4.6×10^{-5} |
| Rabattement résiduel | PE-20-01 | 0.0063 | - | 5.1×10^{-5} |
| | PE-20-02 | 0.0052 | - | 4.2×10^{-5} |

Les conductivités hydrauliques obtenues sont cohérentes avec la plage de valeur régionale telle qu'établie par l'étude hydrogéologique régionale de Savard et al. (2006). Cette plage s'étend de 1×10^{-4} m/s à 3.2×10^{-5} m/s et les valeurs obtenues sont comprises entre ces deux bornes. De plus, la valeur obtenue au puits PE-20-01 de 6.5×10^{-5} m/s est légèrement supérieure aux autres conductivités hydrauliques. Cela est attribué au fait que l'opération de forage a fracturé localement le massif rocheux, ce qui en a augmenté la perméabilité. Contrairement aux autres valeurs, celle-ci n'est pas représentative de l'aquifère entre le PE-20-01 et le PE-20-02, mais est plutôt représentative des conditions autour du puits PE-20-01. C'est pourquoi c'est cette valeur qui sera considérée lors de l'analyse de l'ERT. Les coefficients d'emménagement calculés ont permis d'établir que l'aquifère est confiné. Les valeurs de coefficient d'emménagement dégagées des données expérimentales sont toutefois plutôt faibles. Les valeurs typiques de coefficients d'emménagement pour un aquifère confiné se trouvent entre 10^{-3} et 10^{-6} (Singhal et Gupta., 2010). Le Tableau 5.3 présente les valeurs moyennes des paramètres hydrogéologiques et qui sont considérées représentatives des conditions locales.

Tableau 5.3 Synthèse des paramètres hydrogéologiques moyens au site de l'École de la Clé-des-Champs

| Paramètres | Valeur | Unités |
|--|----------------------|--------|
| Conductivité hydraulique moyenne de l'aquifère | 5×10^{-5} | m/s |
| Conductivité hydraulique du PE-20-01 | 6.5×10^{-5} | m/s |
| Gradient hydraulique | 6.5×10^{-3} | m/m |
| Coefficient d'emménagement | 2.6×10^{-6} | - |

La Figure 5.8 présente les températures mesurées par les capteurs installés dans les puits pendant l'essai de pompage. Il est intéressant d'y noter qu'au démarrage de la pompe submersible, la température de l'eau dans le puits diminue. Tel que présenté dans la section relative aux paramètres thermiques, l'eau à la base du PE-20-01 est à une température près de 8°C. L'action de pompage mélange la colonne d'eau à l'intérieur du puits, ce qui a pour effet de diminuer la température en surface. En opérant à un débit moyen de 130 L/min, la température moyenne à 4.7 m dans le PE-20-01 est environ 9.5°C pour les conditions météorologiques pendant l'essai. Finalement, même si elle est de moindre amplitude, une diminution est également notée dans la température mesurée au puits PE-20-02.

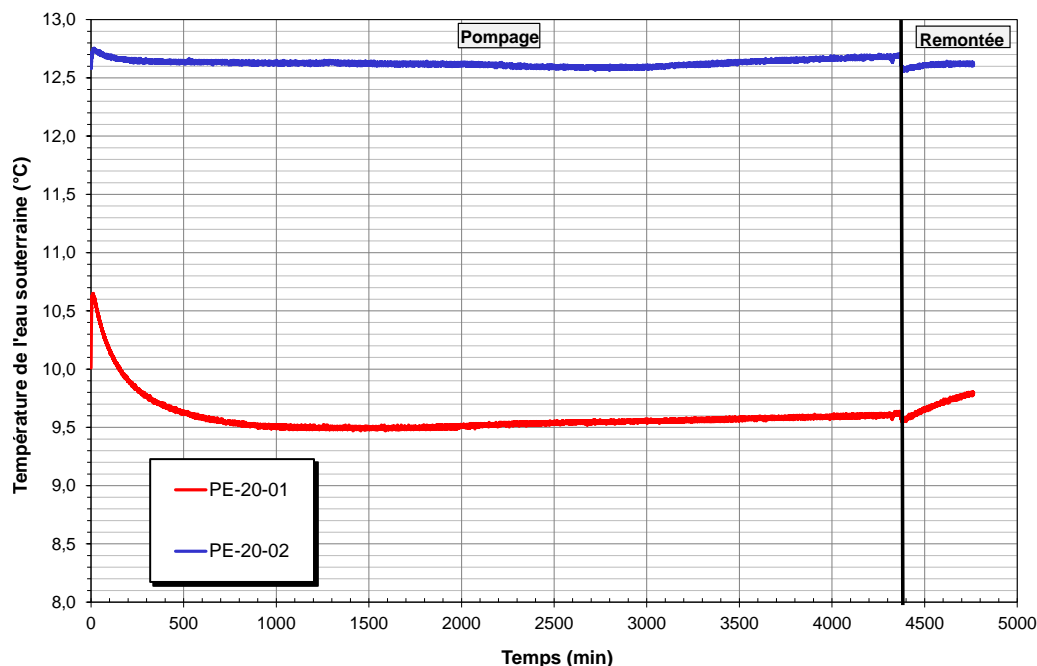


Figure 5.8 Signaux de températures enregistrées pendant l'essai de pompage. Modifiée d'après Richelieu Hydrogéologie Inc. (2020).

5.3 Géothermie

Afin d'acquérir les paramètres thermiques de l'aquifère, des profils de température initiaux ont été relevés et un essai de réponse thermique a été réalisé.

5.3.1 Profil de température initial

Les profils de température ont été relevés dans les puits PE-20-01 et PE-20-02 en conditions statique (sans pompage). Une sonde de température est descendue dans le puits et un temps de stabilisation thermique est observé entre chaque déplacement vers une autre mesure. Les profils sont relevés au mètre pour les 20 premiers mètres, puis aux 2 mètres jusqu'à 30 mètres de profondeur et finalement aux 4 mètres jusqu'au fond du forage. De façon similaire, un second profil a été réalisé dans le puits PE-20-01 une semaine plus tard afin de confirmer les valeurs relevées. Ces profils sont présentés à la Figure 5.9.

En général, le relevé du profil vertical de température permet d'évaluer le gradient géothermique. Or, les profils obtenus au site de Mirabel ne présentent pas la tendance attendue, c'est-à-dire qu'il n'est pas possible d'y observer une augmentation graduelle de la tempéra-

ture avec la profondeur. Dans les premiers mètres, la température diffère grandement, car elle est influencée par la température extérieure. Entre 20 et 30 m, on remarque que les profils de température se rejoignent. Puis, les profils demeurent assez uniforme et diminuent légèrement pour atteindre environ 8°C à la base des forages. La base des puits présente donc une température légèrement plus basse que la partie intermédiaire, et on observe un gradient géothermique légèrement négatif. Les températures moyennes des profils PE-20-01 (19 sept.), PE-20-02 (19-sept.) et PE-20-01 (21 sept.) sont respectivement de 9.15°C , 8.91°C et 10.80°C .

Une hypothèse pour expliquer cette évolution de température est la présence de fractures hydrauliquement actives, plus spécialement dans la partie inférieure du forage. Sous le gradient hydraulique régional, un apport d'eau souterraine plus froide pénètre dans le puits et y circule. Il pourrait donc y avoir un mélange de l'eau dans la colonne du puits, ce qui expliquerait le fait que la température y est relativement uniforme et que le gradient est négatif. Cela suppose que les fractures sont principalement subhorizontales. De plus, l'eau dans les puits atteint sa température la plus basse à la base des forages, ce qui pourrait correspondre à une zone d'entrée d'eau souterraine.

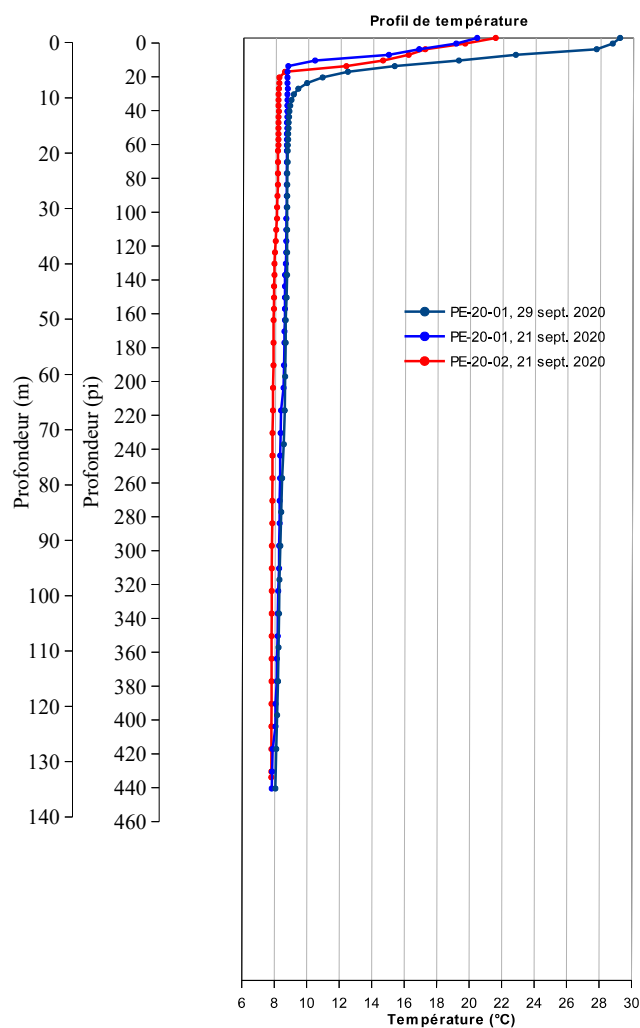


Figure 5.9 Profils verticaux de température relevés dans les puits.

5.3.2 Essai de réponse thermique

Un essai de réponse thermique a été réalisé au puits PE-20-01 à l'aide de l'unité de réponse thermique de la *Chaire de recherche en géothermie*. L'unité, visible sur la Figure 5.10 est construite afin d'exécuter des essais sur les forages ouverts. Elle possède une capacité de chauffage d'une puissance de 24 kW soit deux fois supérieure aux essais conventionnels. Une génératrice a été utilisée pour alimenter l'unité. En plus du système de chauffage, l'unité est équipée d'un système d'acquisition de données pour les débitmètres, les capteurs de pression et de température et la puissance. Dû à des contraintes de terrain, il n'a pas été possible

d'installer une fibre optique dans le puits. Cependant, quatre sondes de température supplémentaires ont été installées dans l'unité afin d'avoir des mesures de la température à l'entrée (EWT 1 et 2) et à la sortie (LWT 1 et 2) de l'unité. Des capteurs mesurant la température de l'air extérieur et intérieur ont également été ajoutés.

D'abord une phase de circulation continue de 16 heures a été exécutée, s'en est suivi une phase de chauffage de 83 heures sous une puissance de chauffage moyenne de 21.96 kW correspondant à 165 W/m. Finalement, une phase de restitution de 60 heures a permis de compléter l'essai de réponse thermique. Une pompe submersible positionnée à 8.4 m de profondeur dans le puits PE-20-01 a été employée pour réaliser l'essai et le débit moyen enregistré pendant l'essai était de 127.5 L/min. L'essai a été réalisé sans saignée en pompant dans le haut de la colonne d'eau et en réinjectant à la base du puits.



Figure 5.10 Unité de réponse thermique mobile dans la cour de l'École de la Clé-des-Champs.

Les températures enregistrées pendant l'ERT sont présentées à la Figure 5.11. Dans la partie supérieure de la figure, les températures de l'eau entrante et sortante de l'unité sont illustrées alors que les températures de l'air extérieur et intérieur sont présentées dans la partie inférieure. La comparaison des températures de l'eau et de l'air a permis de détecter un léger problème d'isolation des conduites. En effet, on remarque une corrélation entre les signaux de température, lorsque la température de l'air augmente, une légère augmentation est également visible dans la température de l'eau sortant de l'unité. L'isolation des conduites n'était

pas adéquate et une correction a dû être appliquée pour considérer ce gain ou cette perte thermique pendant l'essai. De plus, on note qu'un des capteurs de température LWT présente un ratio bruit sur signal assez important. Finalement, il a été noté qu'un des capteurs présentait un décalage de 0.02°C qui a été corrigé.

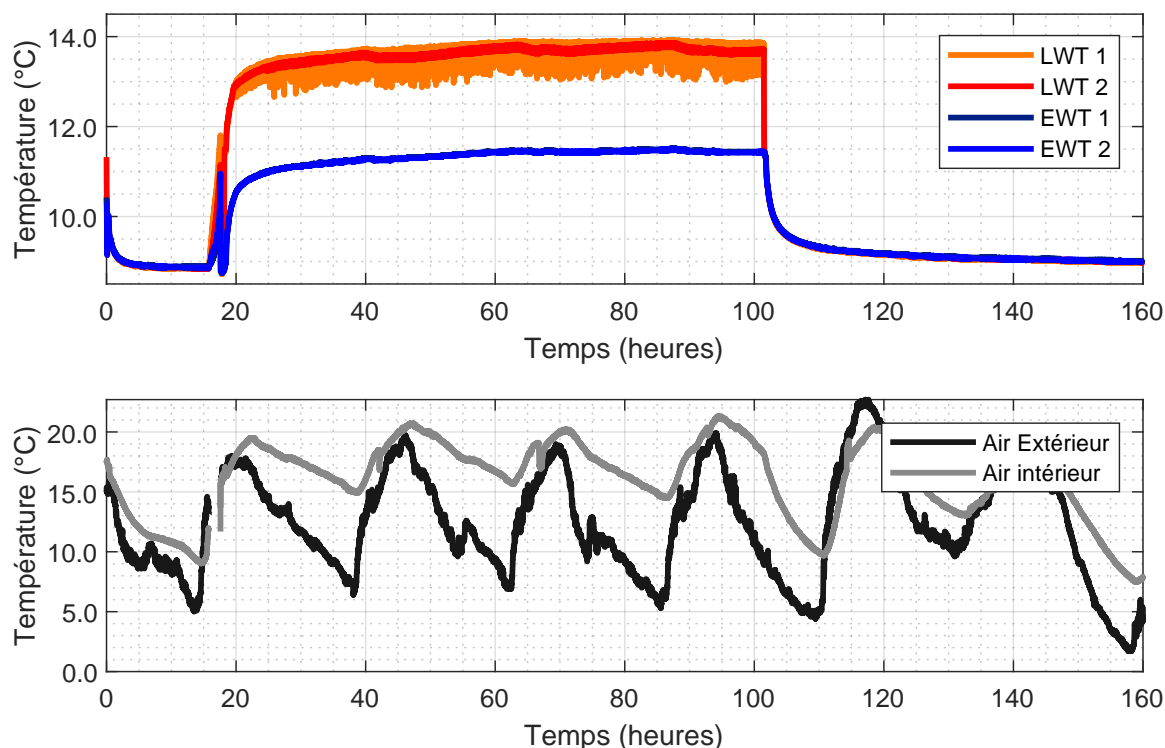


Figure 5.11 Données de températures brutes acquises pendant l'essai de réponse thermique. LWT 1 et 2 correspondent à la température de l'eau sortant de l'unité et EWT 1 et 2 à celle entrant dans l'unité.

Ce sont donc les signaux de température corrigés qui ont été utilisés pour l'interprétation de l'essai. Une variation maximale de température de seulement 3°C après 24 heures de chauffage à 165 W/m a été enregistrée, ce qui constitue un rendement thermique impressionnant, même pour un PCP.

Une interruption de la pompe submersible est survenue 16 heures après le début de la phase de circulation continue tel que visible sur la Figure 5.12. Les conduites d'eau du système dans l'unité mobile ont été ouvertes et l'air a pu pénétrer dans les conduites et les boîtes où les sondes de température sont installées. Cela a eu pour effet d'augmenter artificiellement les températures enregistrées par les sondes puisque pendant ce temps, les sondes mesuraient la température de l'air et non celle de l'eau. Suivant cette interruption, la phase de circulation

continue a été poursuivie pendant environ 1 heure avant le démarrage de la phase de chauffage. La température de l'eau avant le début de la période de chauffage a été évaluée à 8.71°C .

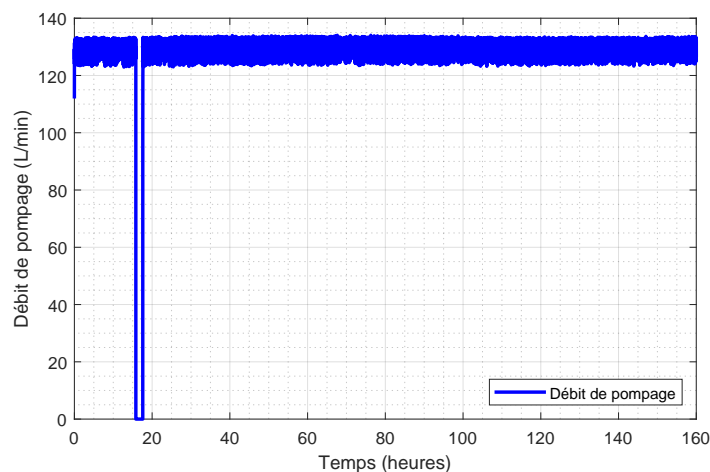


Figure 5.12 Débit enregistré pendant l'essai de réponse thermique.

Tel que mentionné précédemment, le signal de puissance mesuré et enregistré par le système d'acquisition de données de l'unité mobile ne correspond pas à la puissance de chauffage réelle appliquée sur l'eau pendant l'essai. D'abord en raison d'un léger défaut dans l'isolation thermique du système, mais également en raison de la pompe submersible qui dégage également une puissance de chauffage. Afin de reconstruire le signal de chauffage réellement appliqué, les signaux de température LWT et EWT ont été utilisés, ce qui permet de considérer les gains ou pertes thermiques causés par le problème d'isolation. Sur la Figure 5.13, on remarque que la puissance corrigée fluctue davantage que la puissance mesurée au chauffe-eau. Une puissance de chauffage de 1 kW a été attribuée à la pompe submersible et cette valeur n'est pas incorporée aux signaux présentés à la figure suivante.

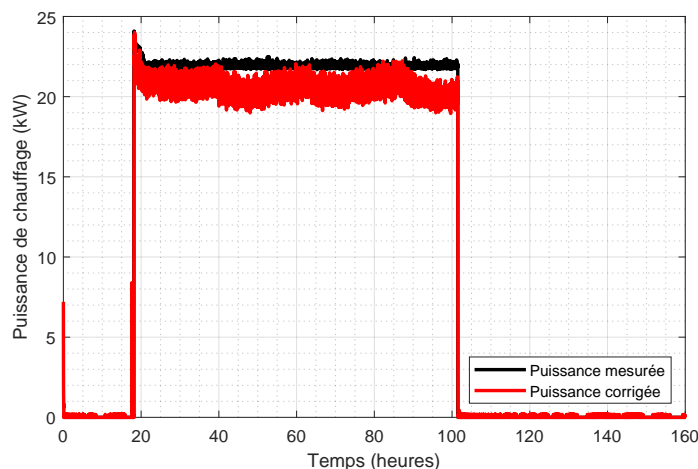


Figure 5.13 Comparaison de la puissance de chauffage mesurée et corrigée.

Pour interpréter l'ERT, le modèle d'interprétation employé est la source linéique infinie (Morgensen, 1983). La Figure 5.14 présente la droite obtenue pour l'interprétation de la conductivité thermique sur la moyenne de LWT et EWT. La conductivité thermique apparente semble avoir évolué pendant l'essai puisque trois tendances linéaires peuvent être distinguées sur la Figure 5.14. La pente semble diminuer graduellement pendant l'essai et donc, il est possible d'en déduire que la conductivité thermique apparente a augmenté pendant l'essai. Le régime d'écoulement pourrait avoir évolué pendant l'essai, ce qui aurait un impact sur l'échange thermique entre le milieu géologique et l'eau dans le PCP. La valeur obtenue pour l'estimation de la conductivité thermique est de près de 70 W/mK. Elle est particulièrement élevée et ne correspond pas à une valeur plausible pour des matériaux géologiques. Cela s'explique par le fait que la méthode utilisée repose exclusivement sur la conduction comme mécanisme de transfert de chaleur. Considérant la valeur obtenue, il ne s'agit pas d'une méthode appropriée pour interpréter les résultats de l'ERT réalisé au site de Mirabel.

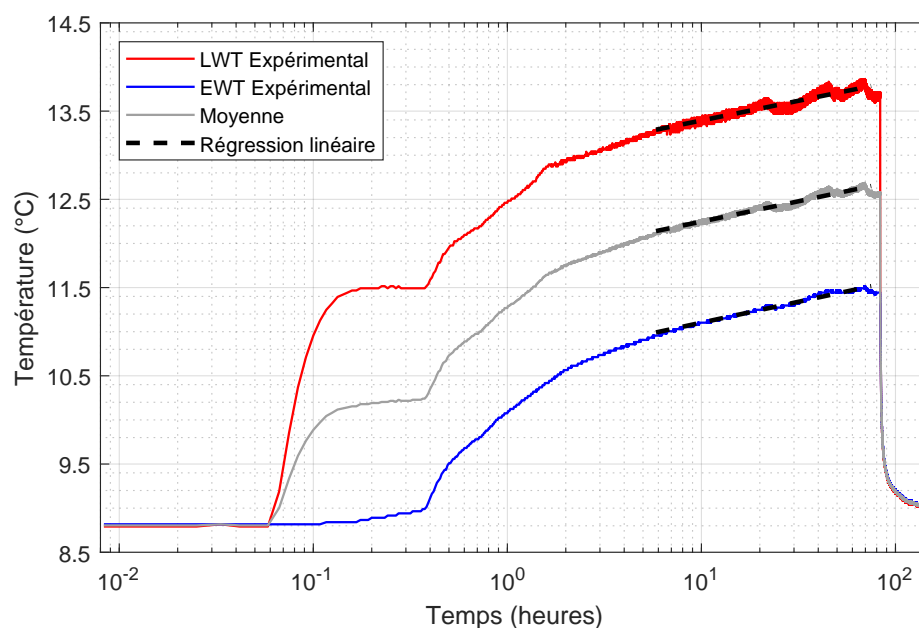


Figure 5.14 Évaluation de la conductivité thermique via la méthode d'approximation de premier ordre de la SLI.

L'interprétation de l'ERT a donc été réalisée à l'aide d'un modèle numérique, ce qui permettait de considérer le transfert de chaleur par advection. La modélisation est décrite en détail au Chapitre 6. La valeur de la conductivité thermique moyenne de l'aquifère obtenue avec le modèle numérique est présentée au Tableau 5.4. Il est intéressant de noter qu'il y a une différence supérieure à 1°C entre la température moyenne provenant des profils de température et la température enregistrée pendant la circulation continue au PE-20-01. Cela démontre que seule la température acquise pendant la circulation continue est représentative de la température du puits le jour de l'essai. L'action de pompage et de recirculation permet également de mélanger l'eau dans le puits et induit probablement l'advection d'une eau plus froide dans le puits.

Tableau 5.4 Synthèse des paramètres thermiques acquis au site de l'École de la Clé-des-Champs

| Paramètres | Valeur | Unités |
|--|--------|--------|
| Conductivité thermique apparente | 70 | W/mK |
| Conductivité thermique moyenne | 3.99 | W/mK |
| Température au fond des forages | 8.00 | °C |
| Température en circulation continue | 8.71 | °C |
| Moyenne des profils de température au PE-20-01 | 9.97 | °C |

5.4 Véllocimétrie

Suite à la réalisation de la caractérisation hydrogéothermique à l'automne 2020, les travaux de construction du système géothermique ont pu être entrepris à l'été 2021. Lors de ces travaux quatre PCP ont été aménagés, de sorte qu'un total de cinq PCP ont été implantés au site de l'École de la Clé-des-Champs. Ces puits supplémentaires ont permis de bonifier la caractérisation géologique et de confirmer certaines des hypothèses émises au Chapitre 6. La méthodologie présentée et les résultats découlent des travaux réalisés par Dion (2021) au site de l'École de la Clé-des-Champs en juillet 2021. Une partie de ces travaux sont colligés dans ce mémoire afin de fournir un portrait global du site de démonstration de Mirabel, mais aussi afin de fournir des éléments de discussion qui seront repris au Chapitre 7.

Dans la brève période entre la réalisation des forages et l'aménagement de ces forages en PCP, il a été possible de réaliser des essais vélocimétriques et ainsi de dresser les profils vélocimétriques des quatre nouveaux forages dont l'emplacement est illustré à la Figure 5.15.



Figure 5.15 Localisation des PCP au site de l'École de la Clé-des-Champs.

En raison de l'important écoulement d'eau souterraine au site, le vélocimètre employé est un vélocimètre à hélice, car ce dernier permet de détecter des débits plus importants. Ce

vélocimètre permet de confirmer la présence de zone transmissive le long de la paroi d'un forage ouvert (Mount Sopris Instrument Co. Inc., 2021) et c'est avec cet objectif qu'il a été employé au site de Mirabel. Afin de réaliser l'essai vélocimétrique, le vélocimètre a été descendu et remonté à vitesse constante dans les puits à l'aide d'un treuil. De ce fait, pour chaque puits investigué, des profils en descente et en ascension sont obtenus. Les relevés ont été réalisés avec pompage en tête de puits et la composante verticale de l'écoulement y est mesurée (Crowder et Mitchell, 2002; Mount Sopris Instrument Co. Inc., 2021). Le tableau 5.5 regroupe le nombre et le type d'essais réalisés par puits.

Tableau 5.5 Essais vélocimétriques menés dans les PCP du site de l'École de la Clé-des-Champs

| Puits | Pompage | |
|------------------|-----------|----------|
| | Ascension | Descente |
| PCP 1 (PE-20-01) | - | - |
| PCP 2 | 2 | 2 |
| PCP 3 | 1 | 1 |
| PCP 4 | 1 | 1 |
| PCP 5 | 1 | 1 |

Il faut considérer que l'aménagement d'un trou de forage en PCP implique l'installation d'un tuyau de HDPE de la tête jusqu'au fond du forage, d'une pompe submersible, de capteurs de pression et d'autres conduites. Il n'est donc pas possible de descendre de l'équipement une fois qu'un puits est aménagé. C'est pour cette raison que seuls les PCP 2, PCP 3, PCP 4 et PCP 5 ont été investigués avec le vélocimètre. Les essais vélocimétriques ont été effectués en double dans le PCP 2 afin de valider la répétabilité de l'essai.

Le pompage a été effectué à l'aide d'une pompe submersible ayant un débit nominal de 310 L/min. Les débits ont été estimés manuellement pendant les essais vélocimétriques et le débit moyen enregistré avoisine les 230 L/min. La pompe était installée à une profondeur approximative de 6 m dans le puits et un temps de pompage d'environ 10 minutes était laissé entre le démarrage de la pompe et le début de l'essai vélocimétrique.

Le vélocimètre donne des données brutes en cycles par seconde (CPS) qui peuvent être converties en débit. La configuration de l'essai vélocimétrique, qui correspond à un pompage en surface avec débit connu ainsi qu'une vitesse constante de déplacement, permet une

interprétation via (Dresser Atlas Division, 1982) :

$$PDT = \frac{RPS(z) - RPS(0)}{RPS(100) - RPS(0)} \cdot 100 \quad (5.1)$$

Dans l'équation 5.1, z est la profondeur de mesure dans le puits (m), PDT est le pourcentage de débit total (%) à la profondeur z et RPS est la valeur brute enregistrée par le vélocimètre (CPS) à la profondeur z . Les valeurs $RPS(100)$ et $RPS(0)$ sont pour un débit maximal (100%) et pour un débit minimal (0%). Afin de comparer les 5 profils avec pompage entre eux, les résultats sont présentés en pourcentage du débit total PDT .

Pendant le pompage, des rabattements plutôt variables ont été enregistrés dans les PCP, le Tableau 5.6 présente les rabattements une fois le régime permanent atteint ainsi que le débit de pompage moyen pendant l'essai.

Tableau 5.6 Débits de pompage et rabattements aux PCP pendant les essais vélocimétriques

| Puits | Débits de pompage (L/min) | Rabattement (m) | Profondeur du forage (m) |
|-----------------|---------------------------|-----------------|--------------------------|
| PCP 2 | 245 | 0.92 | 137.6 |
| PCP 2 (Doublon) | 225 | 0.92 | 137.6 |
| PCP 3 | 227 | 2.52 | 136.6 |
| PCP 4 | 215 | 3.33 | 136.6 |
| PCP 5 | 227 | 1.21 | 135.0 |

Les profils vélocimétriques obtenus sont présentés à la Figure 5.16. Le pourcentage du débit total en fonction de la profondeur y est présenté pour le relevé enregistré en descente et en remontée pour chaque PCP investigué.

Les valeurs non affichées correspondent à des erreurs d'enregistrement de la part de l'appareil, à des débits trop faibles pour être détectés par le vélocimètre ou à l'absence d'écoulement. Le PCP 2 et le doublon du PCP 2 donnent des profils similaires en apparence, mais ils ne sont pas identiques. Un débit légèrement différent a été employé et cela engendre peut-être une stimulation différente des fractures, dans tous les cas, il faut considérer que l'appareil présente une certaine imprécision puisque les résultats n'ont pas pu être reproduits parfaitement. Lorsque l'on compare le profil en descente et en remontée, seuls ceux enregistrés dans le puits PCP 5 se superposent. Dans les autres puits, les profils en descente et en remontée ne se superposent pas sur la quasi-totalité du trajet. Finalement, les profils ne sont pas strictement croissants, ce qui suggère qu'à l'occasion des débits sortants ont été enregistrés.

Pour les quatre PCP investigués, on note un apport important en eau près du fond des forages autour de 130 m de profondeur. Cette zone fracturée semble horizontale. Dans les PCP 2, PCP 3 et PCP 4, un apport important en eau est visible entre 90 m et 110 m de profondeur. Dans le PCP 2, cette zone fracturée est rencontrée davantage autour de 90 m alors que dans le PCP 4 cette zone est intersectée autour de 110 m de profondeur. Ces PCP semblent donc présenter deux zones fracturées principales qui contribuent à l'écoulement dans les puits. Le PCP 5 semble présenter une seule zone fracturée majeure, le reste du trou de forage présente des fractures plus mineures, mais qui contribuent également à l'écoulement comme c'est le cas pour les autres puits.

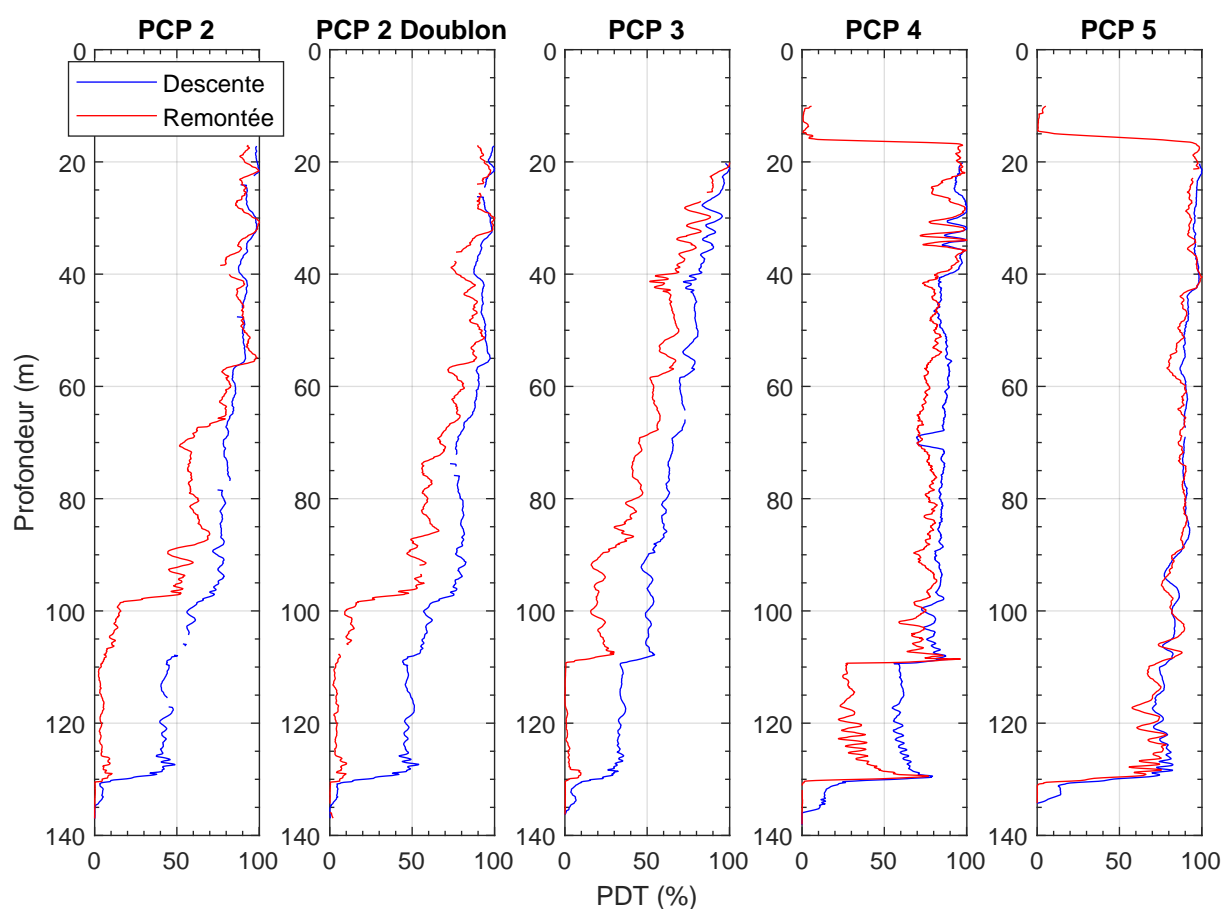


Figure 5.16 Profils vélocimétriques réalisés dans les PCP du site de l'École de la Clé-des-Champs. Modifiée d'après Dion (2021).

CHAPITRE 6 ARTICLE 1 - IMPACT OF LAYERED HETEROGENEITY ON THERMAL RESPONSE TEST INTERPRETATION PERFORMED ON A STANDING COLUMN WELL OPERATED WITHOUT BLEED

Stéphanie Robert^a, Philippe Pasquier^a, Alain Nguyen^b

^a Department of Civil, Geological and Mining Engineering, Polytechnique Montréal, P.O. Box 6079 Station Centre-Ville, Montreal, H3C 3A7, Quebec, Canada

^b CanmetENERGY, Natural Resources Canada, 1615 Lionel-Boulet Boulevard, Varennes, J3X 1P7, Quebec, Canada

Article soumis le 29 novembre 2021 à la revue *Geothermics*

Abstract

This paper presents a comprehensive field testing program conducted in Mirabel, Quebec, that aims to demonstrate the thermal effectiveness of a standing column well installed in a pervious layered aquifer. The first-order approximation of the infinite line source model of a thermal response test in the absence of bleed suggested that heat conduction alone could not explain the thermal response obtained at a test standing column well. To further investigate this hypothesis, a numerical model that couples the state equations for heat transfer and groundwater flow is developed and exploited to assess the contribution of advective heat transfer. A comparative study involving four cases is presented to analyze the effect of the aquifer heterogeneity in terms of hydraulic and thermal conductivity on the thermal response of test well. The results show that in contrast to the work currently available in the literature, the advective heat transfer mechanism can have a large contribution to the thermal response in specific geological environment, even without bleed. In this particular case, advection is approximately 265 times more important than conduction. This shows that layered heterogeneity and mean hydraulic conductivity can significantly impact the thermal response of a standing column well operating without bleed. The results presented in this study show that hydrogeological conditions should be given greater consideration by incorporating local hydrogeological features to replicate the experimental measurements of the thermal response test.

Keywords :

Standing column well, Thermal response test, Ground source heat pump system, First-order approximation

6.1 Introduction

Low-temperature geothermal energy can be exploited to heat and cool institutional and industrial buildings with high thermal loads using ground heat exchangers (GHE). The most common GHEs are closed-loop wells (CLW), although they often require numerous boreholes and considerable land area. Standing column wells (SCW) are an effective and frequent alternative in the northeastern United States (Orio et al., 2005). These GHEs are open boreholes drilled into the bedrock that are generally more efficient (Nguyen et al., 2020), less expensive (O'Neill et al., 2006) and more easily integrated in dense urban environments than CLWs (Pasquier et al., 2016).

Still, the main advantage of SCWs is in their ability to respond to peak thermal demand through a process called bleed, which can temporally increase the SCW performances (Spitler et al., 2002). Indeed, when bleed is active, a fraction of the groundwater contained in the SCW is pumped out of the well, while the remaining fraction of water is recirculated into it. The SCW configuration can include downhole pumping and top injection, although the reverse configuration has been evaluated to have a beneficial effect on effective thermal conductivity (Lee et al., 2016). By unbalancing the SCW inflow and outflow, a drawdown is induced in the SCW and nearby aquifer which generates a radial flow from the aquifer and towards the SCW that brings groundwater at a higher temperature in heating mode, or at a lower temperature in cooling mode. By opposition, CLW systems cannot activate on demand advective heat transfer and are thus relying only on conduction as a heat transfer mechanism.

Although SCWs do combine both heat transfer processes, for a specific study site, Kastrinos et al. (2019) observed that advective heat transfer occurs mainly with bleed and that conductive heat transfer is dominant when bleed is not active. However, Nguyen et al. (2015) suggested that in the presence of a hydraulic gradient or other site-specific geological conditions, heat transfer by advection could be non-negligible without bleed. Lee. (2018) studied the advective heat transfer under regional groundwater flow based on modelling work. A hydrogeological feature that is generally site specific is the fracture network in the aquifer surrounding the SCW. Most modelling works conducted so far on SCWs considered a homogeneous and isotropic equivalent porous medium to represent the aquifer (Al-Sarkhi et al., 2008; Deng et al., 2005; Ng et al., 2011). This assumption often illustrates accurately fractured media if the density, opening and frequency of fractures are relatively uniform (Singhal et Gupta., 2010). However, for layered heterogeneous fractured aquifers, it is likely that hydraulically active fractures are intersected by the SCW and that preferential flow paths occur, which

invalidate the assumption of equivalent porous media. Detailed information on fractures is rarely available.

Studies regarding the impact and characterization of layered heterogeneity have been conducted mainly for CLW systems and were based either on experimental data (Radioti et al., 2016) or numerical simulations (Acuña et al., 2009; Aranzabal et al., 2016a,b; Fujii et al., 2009). Effect of groundwater seepage on equivalent thermal conductivity has also been studied for CLWs. A recent study (Li et al., 2020) confirms that equivalent thermal conductivity is proportional to groundwater velocity. Luo et al. (2014) evaluated the impact of layered aquifers on CLW heat exchanges based on experimental and modelling works. They demonstrated that the magnitude of heat transfer is lower in less pervious layers. Chang et al. (2019) noticed a similar phenomenon for SCWs from modelling works and observed that pervious aquifers, since they induce water flow towards the well, enhance heat transfer. For most practical applications, thermal characterization is limited to a thermal response test (TRT) that allows obtaining only the average thermal conductivity along the borehole. With such approach, fractures and groundwater flow are largely neglected whether the site investigated is intended to host SCWs or CLWs.

For a SCW installed in a homogeneous aquifer, it is known since the pioneering work of Yuill et Mikler (1995) that recirculation in a SCW induces groundwater flow to the aquifer near the injection point and to the SCW near the pumping point, even if no bleed is active to directly stimulate advective heat transfer. Indeed, pumping operations will naturally depressurize the aquifer around the submersible pump while a pressure increase will occur around the injection pipe, leading to a vertical variation of the velocity profile between these two points as shown in Fig. 6.1a) for the homogeneous case. In the case of a layered heterogeneous aquifer, the same hydraulic process will be active but the hydraulic exchanges between the SCW and the aquifer will also be affected by the permeability of each layer as shown in Fig. 6.1b). Therefore, since SCWs are in direct hydraulic connection with the fractured aquifer, stratification could also have an impact on heat exchange in a SCW even if no bleed is active.

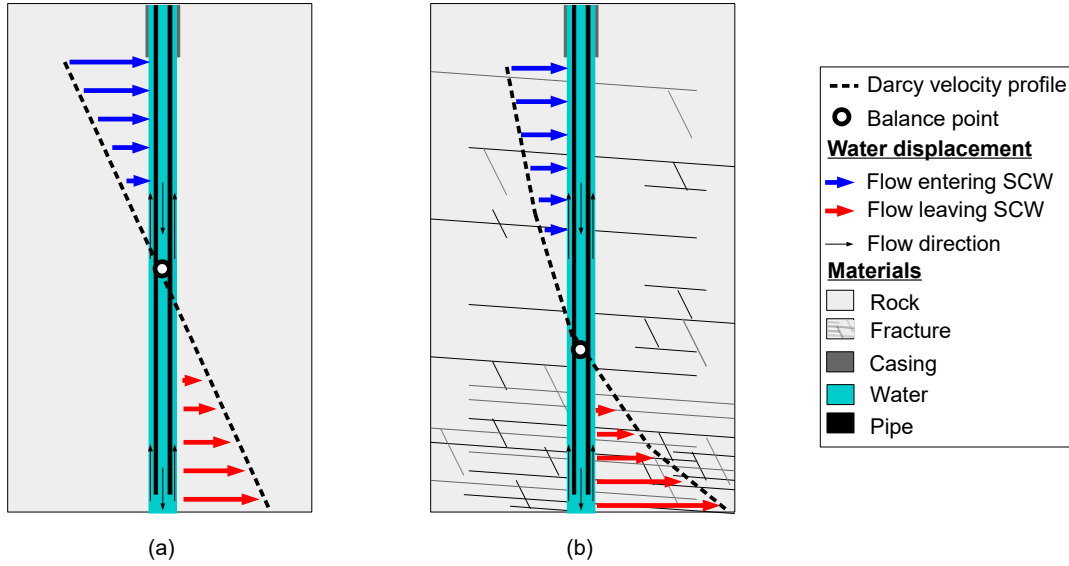


Figure 6.1 Simplified representation of water flow along borehole wall for top-pumped SCW in a) homogeneous aquifer (adapted from Yuill et Mikler (1995)) and b) layered heterogeneous fractured aquifer with a higher permeability in the lower part of the borehole.

A few research works using numerical models have previously discussed the impact of rock fracturing on the thermal response of a SCW (Croteau, 2011; Deng, 2004; Nguyen et al., 2015). All these works established that the presence of a fractured zone can impact the thermal response of a SCW when bleed is enabled. More recently, Beaudry et al. (2019) studied the influence of a fracture located near the top of a SCW with experimental data. Contributions included evaluation of the effect of a fracture on the thermal performance of SCW operated with bleed with a finite element model. Beaudry et al. (2018) also executed a TRT without bleed in a relatively impervious aquifer. Koenig et Goodhall (2010) performed TRT on a SCW without bleed, but the objective of their study also did not involve an investigation of the impact of layer heterogeneity on thermal response. Therefore, to date, no work studied the impact of layered heterogeneity in a very pervious aquifer on the thermal response of a SCW when no bleed is active. In addition, no work has so far illustrated how layered heterogeneity can impact the analysis of a TRT performed on a SCW, which is usually accomplished without bleeding the SCW.

This paper aims to 1) analyze the experimental data gathered during a 6.5-day TRT performed on a SCW operating without bleed and 2) to illustrate the impact of layered heterogeneity in a very pervious aquifer on the SCW's thermal response and TRT analysis. The analysis strategy is based on the development of a detailed numerical model integrating the

hydrostratigraphy observed during the completion of exploratory boreholes and hydraulic parameters measured during a pumping test. The model is then exploited to illustrate how layered heterogeneity and advection play a major role in the thermal response obtained at the SCW, even in the absence of bleed.

6.2 Field data acquisition and interpretation

The experimental data used in this study were gathered during the exploratory phase of a demonstration project dedicated to the integration of SCWs in institutional buildings located in cold climates. As part of the exploratory phase, a detailed characterization of the aquifer was undertaken to identify the local hydrostratigraphy, and evaluate the hydraulic and thermal parameters. The characterization works were based on two exploratory boreholes, a pumping test and a TRT performed on the site of the demonstration project.

6.2.1 Local hydrostratigraphy

Figure 6.2 (right) shows the location of the two exploratory boreholes PE-20-01 (133.2 m deep) and PE-20-02 (131.6 m deep), which were drilled in August 2020, in the area of Mirabel (Quebec, Canada). Layout and materials of borehole PE-20-01 are also shown in Fig. 6.2 (left). Note that both boreholes were drilled parallel to the assumed main component of regional groundwater flow. In other words, PE-20-01 is located hydraulically upstream of PE-20-02. Both boreholes are open holes in hydraulic connection with the aquifer, except for a steel casing installed to prevent superficial loose soil deposits from falling into the boreholes.

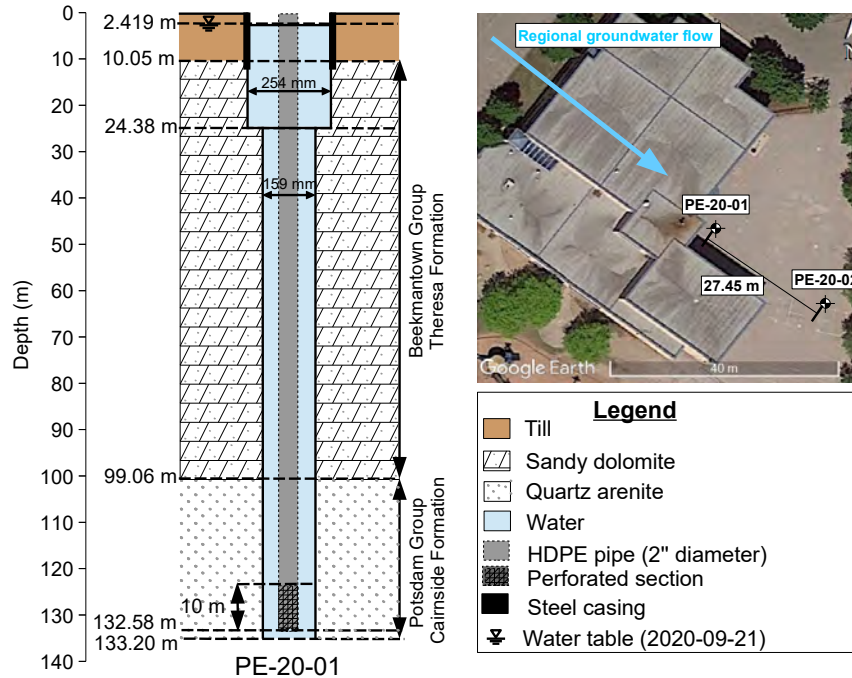


Figure 6.2 Geology observed at borehole PE-20-01 and boreholes locations. The illustration on the left shows the installation at standing column well PE-20-01 equipped with a HDPE reinjection pipe perforated in the lower part.

The evaluation of the geology observed at the site is based on the analysis of composite samples corresponding to a drilling rod of a length of 7.6 m. First, glacial unconsolidated deposits (till) with sandy and clayey zones are located between the surface and a depth of 10.05 m. A sandy dolomite, that is interpreted as the Theresa Formation of the Beekmantown Group (Globensky, 1987), was observed between 10.05 m and 99.06 m below the ground surface. Then, quartz arenite, that is associated to the Cairnside Formation of the Potsdam Group, is observed until the bottom end of the borehole. The depths of the observed lithologies are presented in Fig. 6.2. All observations are consistent with the expected geology which corresponds to sedimentary rock units of the St-Lawrence Lowlands described by Globensky (1987). Cumulative flow has also been measured over the depth of the borehole which led to identification of a presumed important fractured zone at the bottom of the well, especially in the Cairnside Formation with cumulative flow reaching 1325 L/min at the base of the borehole.

6.2.2 Hydrogeological parameters

A pumping test was conducted on PE-20-01 with a TRT unit designed to perform pumping tests and thermal response tests on open borehole circuit. Flow was recorded with the unit's flow meters and data acquisition system. Pressure sensors have been installed in PE-20-01 and PE-20-02 to monitor drawdowns. The pumping test was performed with the submersible pump installed at a depth of 8.4 m below the ground surface, which corresponds to approximately 6 m below the water table. The mean flow rate was approximately 130 L/min over 72 hours.

A local average hydraulic conductivity at the well PE-20-01 of 6.5×10^{-5} m/s was obtained from Cooper and Jacob solution (Fetter, 2018). As presented in Fig. 6.3, the maximum drawdown observed at PE-20-01 is nearly 0.8 m while the maximum drawdown observed in PE-20-02, located 27.45 m downstream, is around 0.48 m. The drawdown observed at PE-20-02 allows us to conclude that a hydraulic connection exists between the two wells since a significant drawdown was observed, although the fracture network ensuring the connection is not known. An average hydraulic conductivity of the aquifer between the wells of 5×10^{-5} m/s was estimated using both Cooper and Jacob solution, and Thiem solution (Fetter, 2018). A specific storage of 2×10^{-8} m⁻¹ was deduced from the pumping test, which is indicative of a confined aquifer. A hydraulic gradient of 0.0069 m/m was measured at the site, which is consistent with the regional hydrogeological study of Savard et al. (2006) from which the gradient is estimated at 0.0065 m/m.

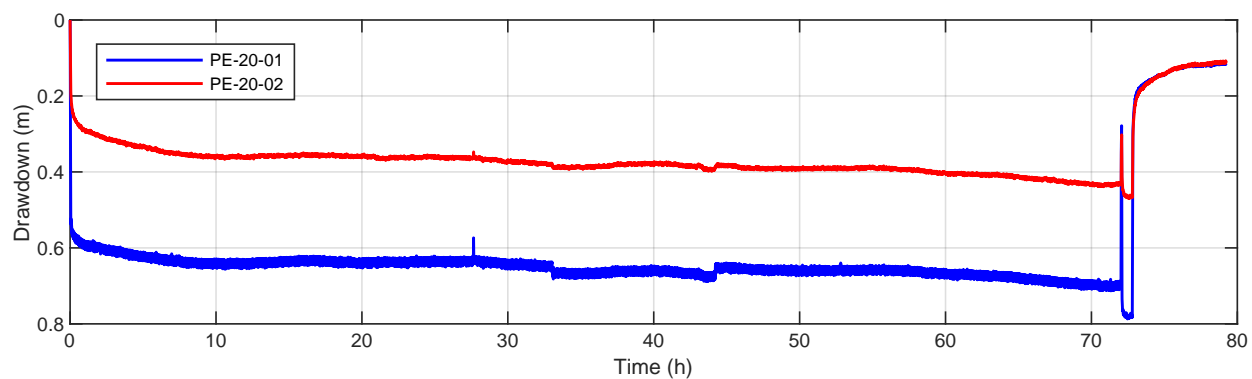


Figure 6.3 Drawdown at PE-20-01 and PE-20-02 during the pumping test performed at PE-20-01 at a mean flow rate of 130 L/m. The pumping test lasted 72 hours and was followed by a recovery test of 6.6 hours.

6.2.3 Thermal parameters

A TRT was performed on PE-20-01 with the TRT unit and the submersible pump also located at a depth of 8.4 m. Due to worksite limitations, distributed temperature sensors were not installed in PE-20-01. However, temperature sensors were added to the TRT unit to record the unit's leaving water temperature (LWT) and entering water temperature (EWT). Note that the TRT unit is equipped with pressure and temperature sensors as well as a data acquisition system for flow measurements and heating power. The nominal heating power is 24 kW, which is twice the power of a conventional TRT. A mobile generator was used as power supply. The TRT was performed for 6.5 days during which EWT and LWT were recorded for the continuous circulation, heating and recovery phases at a frequency of one measurement per 30 seconds. Over the course of the heating phase, an average heating power of 21.96 kW (165 W/m) was applied for 83 hours with a mean flow rate of 127.5 L/min. Water was pumped from the upper part of the well by the submersible pump and reinjected at the bottom end. The TRT was performed without any kind of bleed.

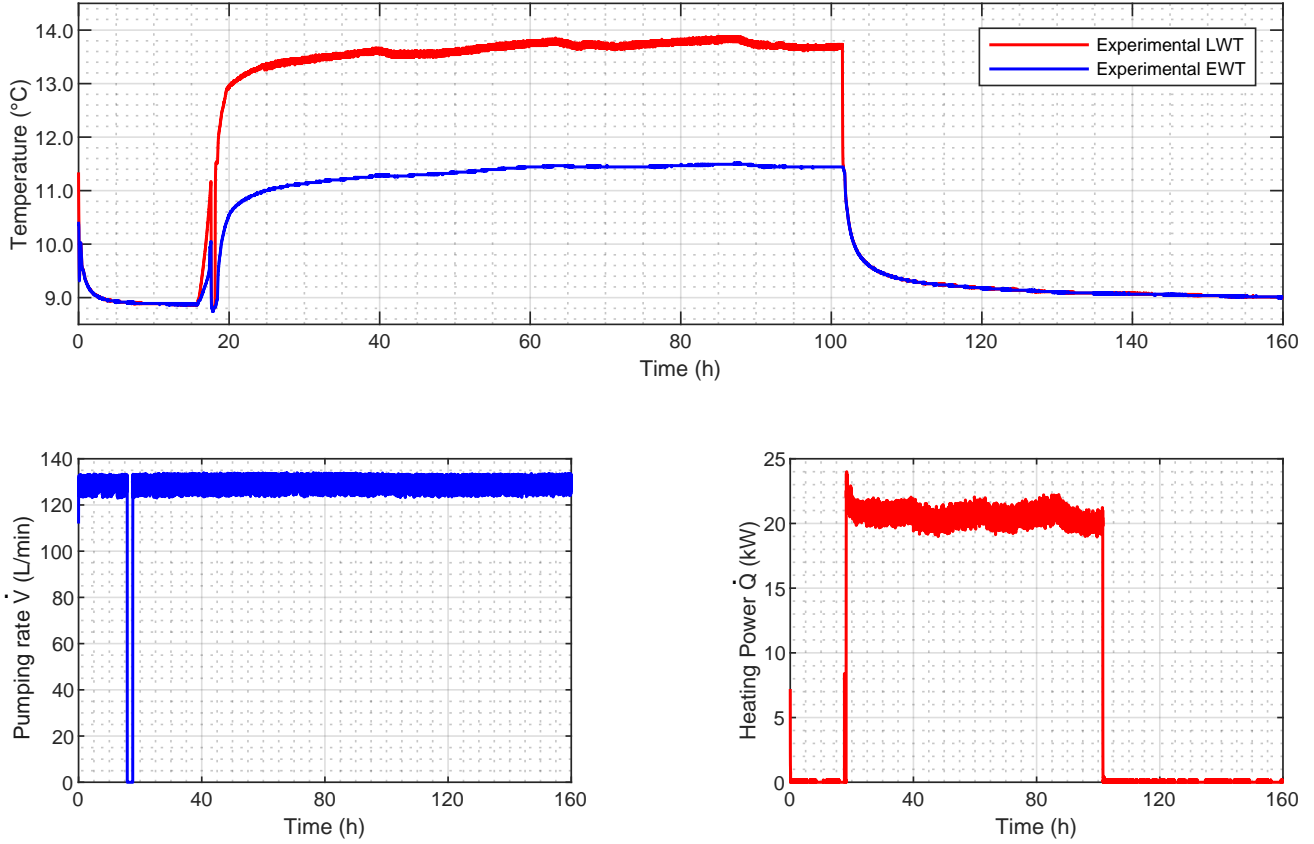


Figure 6.4 Summary of the experimental data acquired during the thermal response test. The water temperatures at the inlet and outlet of the unit, labeled respectively EWT and LWT are presented on the top graph. The peaks in these two signals before the heating phase (around 18 h) are due to a brief interruption of the circulation pump.

As seen in Fig. 6.4, a thermal steady state is almost reached approximately 24 hours after the beginning of the heating phase. A maximum temperature change of only 3°C at 165 W/m is also observed, which is a significant thermal yield for a SCW that is only 133.20 m deep and that is operated without bleed. Indeed, without bleed one would expect that if conduction is the only heat transfer mechanism, ground load would be significantly inferior to 165 W/m.

The first interpretation of the TRT data was accomplished with the first-order approximation of the infinite line source model (Ingersoll, 1948; Morgensen, 1983). This method uses the slope of the temperature signal as shown in Fig. 6.5 and considers only conductive heat transfer. This led to an apparent thermal conductivity of nearly 70 W/mK, which is not a plausible value for geological materials. Indeed, the thermal conductivity of a sedimen-

tary rock typically varies between 1.5 W/mK and 7.7 W/mK (Clauser et Huenges, 1995). Hence, this apparent thermal conductivity, which is approximately 10 times higher than highly conductive sedimentary rocks, suggests that other heat transfer mechanisms besides conduction influence the thermal response of PE-20-01.

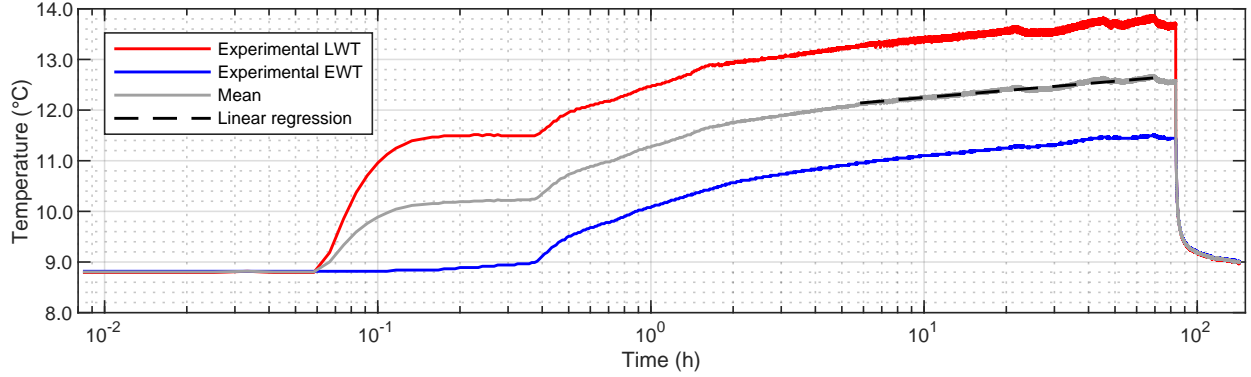


Figure 6.5 Interpretation of the thermal response test with the first-order approximation of the infinite line source model. The slope of the dashed line is used for the regression analysis and corresponds to an apparent thermal conductivity of approximately 70 W/mK.

6.3 Model development and implementation

As indicated previously, thermal conduction alone cannot explain the thermal yield observed during the TRT and advective heat transfer must be taken into account in the data analysis. Consequently, a numerical model was deemed necessary to fully understand the impact of the hydrogeological settings around the SCW and better characterize the local thermal properties. In this work, a 3D finite element model was constructed in the *Comsol Multiphysics* (Comsol, 2019) environment. The model couples the state equations for heat transfer and groundwater flow, and thus simulates the temperature evolution caused by conductive and advective heat transfer.

The experimental data were used to build and validate a model that allowed the interpretation of the TRT when considering complex groundwater flow patterns in the SCW and its nearby geological layers. First, this Section presents the modelling strategy retained to ease the TRT's analysis with a detailed and heavy finite element model. Then, a description of the geometry, mesh, and boundary conditions is done. Lastly, the properties of a first model, referred to as the Base Case, are presented.

6.3.1 Modelling strategy

The iterative use of a 3D transient numerical model proved rapidly cumbersome and a significant speed-up was obtained using a finite element model and a spectral approach (Nguyen et al., 2015; Pasquier et Marcotte, 2014, 2020). The approach consists to use a simulation model with the proper boundary conditions and a unit impulse to generate a transfer function g corresponding to EWT. The transfer function is then convolved in the spectral domain (Marcotte et Pasquier, 2008; Pasquier et Marcotte, 2014) with an excitation function f that integrates the heating power signal and flow rate measured during the TRT. The latter is given for $t \equiv t_i$ by :

$$f(t) = \frac{\dot{Q}(t) - \dot{Q}(t_{i-1})}{\dot{V}C_f} \quad (6.1)$$

where $\dot{Q}(t)$ is the heating power measured at time step t_i , \dot{V} is the mean circulation flow rate and C_f is the volumetric heat capacity of groundwater. Since the transfer function g corresponds, by construction, to the temperature leaving the borehole and entering the TRT unit, the simulated *EWT* is obtained easily by a convolution through

$$EWT(t) = (f * g)(t) + T_0 \quad (6.2)$$

where T_0 is the initial and uniform ground temperature. It is worth noting that this simulation approach is based on the superposition principle and is exact assuming that function f is a step function, a valid assumption since the heating power was recorded every 30 seconds. Using this modelling strategy allows reducing the computation time of the model from several days to five minutes, a significant gain when performing parametric study.

6.3.2 Geometry and mesh

The model geometry (150 m wide by 150 m long and 133.2 m deep) is a simplified 3D representation of the study site with the SCW (PE-20-01) at its center (see Fig. 6.6). Borehole PE-20-02 was not included in the model. However the hydraulic gradient between the wells was incorporated into the model. The diameter of the SCW was simplified to a 152 mm width along the entire length of the well, thus the pumping chamber illustrated in Fig. 6.2 was not modelled for simplification purposes.

Located at the center of PE-20-01, the reinjection pipe extends from the top of the well to a depth of 127.6 m. This geometrical simplification is intended to compensate for the perforated section of the high-density polyethylene (HDPE) pipe which is not directly included in

the model. The pumping pipe was omitted in the model and therefore pumping is performed from the surface of the model instead of at 6 m depth. All these simplifications allowed to reduce the complexity of the geometry and thus speed up the calculation time.

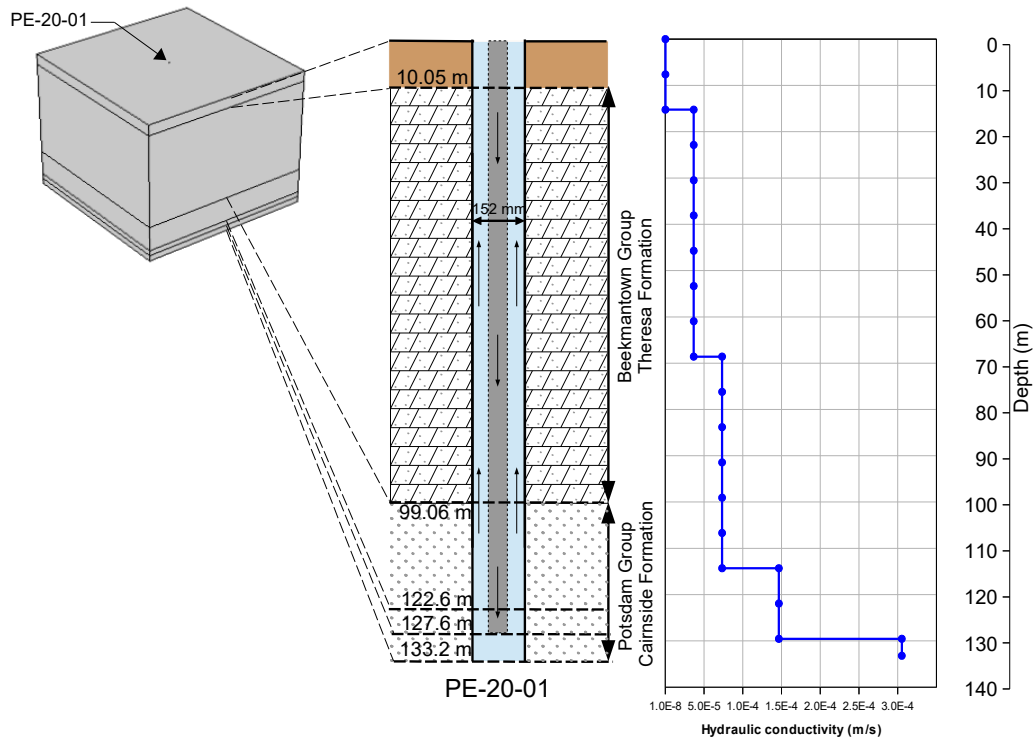


Figure 6.6 Overview of the model geometry (not to scale). The model includes the geology encountered at PE-20-01 and a simplified geometry of PE-20-01. The hydraulic conductivity profile used for the Base Case is shown on the right.

Fig. 6.6 provides an overview of the model geometry and materials and shows the vertical divisions of the 3D model attributed to corresponding geologic and/or well features. The domain is divided into 3 main layers corresponding to the surface deposits, the Theresa Formation and the Cairnside Formation. A triangular mesh was applied to the model surface and then extruded to the base to form a total of 402 974 elements over a total of 143 layers. A mesh independence analysis was performed and this mesh was found to ensure a sufficient numerical accuracy.

6.3.3 Boundary conditions

The model development and boundary conditions were inspired from previous works of Eppner et al. (2017), Beaudry et al. (2018) and Laroche (2021) who all developed detailed SWC

models for various applications. This modelling approach was validated experimentally by Beaudry et al. (2018) and showed its robustness and efficiency on several occasions. As indicated previously, this model was used with the proper boundary conditions to generate a transfer function g .

The boundary conditions used to constrain the numerical model at each physical limit are presented in Fig. 6.7. Far field constant hydraulic head boundaries are applied to account for the regional hydraulic gradient, which corresponds to the value measured on site and initial values of hydraulic head were set to consider the regional gradient. In addition, pumping and water injection are included in the model by two boundary conditions where the inlet and outlet velocity of water are imposed. When pumping occurs at PE-20-01, both inflow ($v_{in} = \dot{V}/A_{in}$) and outflow ($v_{out} = \dot{V}/A_{out}$) velocities are included with a normal velocity that considers the average pumping rate during the TRT (\dot{V}) and the appropriate cross-sectional area of the boundary condition (A_{in} and A_{out}).

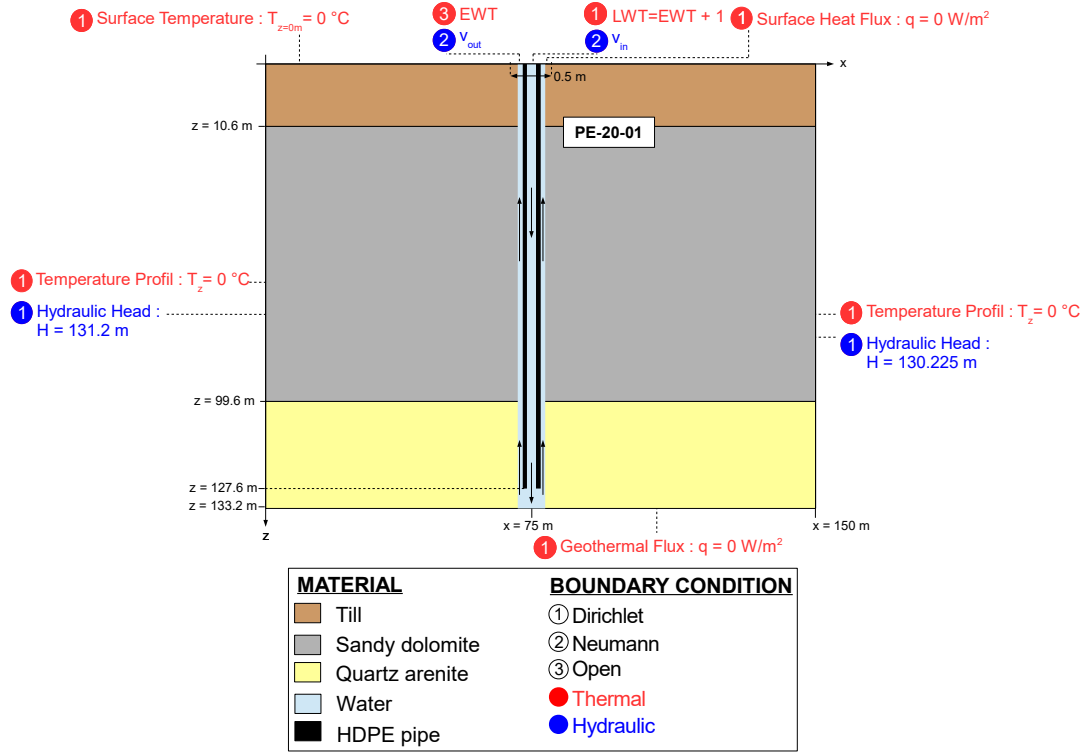


Figure 6.7 Thermal and hydraulic boundary conditions applied to the numerical model to generate a transfer function g . When not indicated, a zero flux boundary condition applies. Representation of boundary conditions are inspired from Laroche (2021). The cross-section is parallel to regional groundwater flow illustrated in Fig. 6.2.

For the thermal boundaries, the conditions applied to the limits of the model are all used to recreate an environment without thermal influence on the well to obtain the transfer function g . Thus, the main thermal boundary condition included in the model is the application of a unit temperature change at the entrance of the SCW expressed by $LWT = EWT + 1$. A null heat flux applied to a circular surface with a radius of 0.25 m is used around the well for $z = 0$ m. This boundary is used to reconcile the thermal boundary condition imposed on the surface (zero temperature) and the temperature of the water in the well. This prevented numerical errors. All the other boundary conditions were prescribed as a zero temperature or normal heat flux.

6.3.4 Properties

The thermal and hydrogeological parameters incorporated in the model are assigned according to the known characteristics of each hydrostratigraphic unit. They are summarized in Table 6.1 and come from the field works accomplished during the exploratory phase of the demonstration project, from educated guess or from thermal properties measured in the same geological units and released in the last decade by Nasr (2016), Perozzi (2016) or Tran Ngoc et al. (2011). These properties are used in the Base Case model discussed in the next Section.

Tableau 6.1 Thermal and hydraulic parameters incorporated in the numerical model for the Base Case.

| Properties | Units | Soil | Theresa Formation | Cairnside Formation | Water | HDPE |
|------------------------|------------------------------------|--------|-------------------|---------------------|-------|-------|
| Thickness | m | 10.05 | 89.01 | 34.14 | - | - |
| Density | kg m ⁻³ | 2700 | 2700 | 2700 | 1000 | 950 |
| Porosity | % | 20.00 | 2.17 | 5.86 | 100 | 0.001 |
| Specific heat capacity | J kg ⁻¹ K ⁻¹ | 850 | 857 | 809 | 4183 | 2400 |
| Thermal conductivity | W m ⁻¹ K ⁻¹ | 2.70 | 3.40 | 5.90 | 0.56 | 0.42 |
| Hydraulic conductivity | m s ⁻¹ | $K(z)$ | $K(z)$ | $K(z)$ | 10 | - |

Field observations. Educated guess. From Tran Ngoc et al. (2011). From Perozzi (2016). From Nasr (2016)

In Table 6.1, the hydraulic conductivity is expressed as a function of depth $K(z)$. This function is shown in Fig. 6.6 and mimic the cumulative flows recorded during drilling at PE-20-01 while ensuring that the mean horizontal hydraulic conductivity of the profile $\bar{K}_x(z)$ is equal to the value of 6.5×10^{-5} m/s measured by the pumping test at PE-20-01. The mean hydraulic conductivity is based on 18 estimations of the cumulative flow made during drilling operations and is given by :

$$\bar{K}_x(z) = \frac{\sum_{i=1}^{18} K_i(z) b_i}{\sum_{i=1}^{18} b_i} \quad (6.3)$$

where $K_i(z)$ is the hydraulic conductivity of section i and b_i is the thickness of section i . A total of 18 sections along the borehole are used in the profile, 17 sections of 7.62 m and the bottom end section of 3.66 m. Hence, the hydraulic conductivity profile included in the model is based on the results of pumping tests and drilling observations. The specific storage used in the model is also deduced from the pumping test and is 2×10^{-8} m⁻¹.

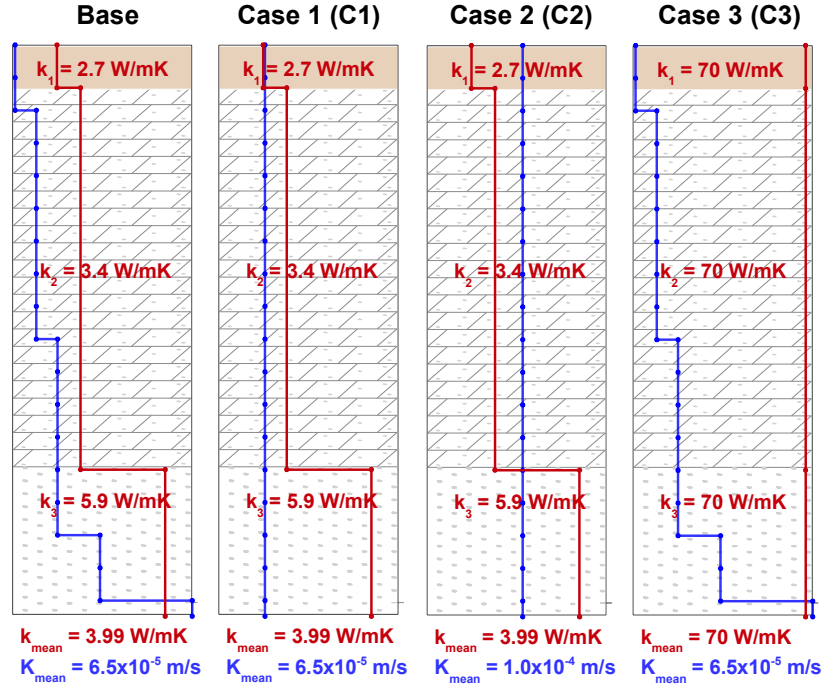


Figure 6.8 Profiles of thermal and hydraulic conductivity of the Base Case and of the three alternative cases (C1 to C3) used in this work (not to scale). Note that Case 1, 2 and 3 are variations from the Base Case.

6.4 Results and discussion

The detailed numerical model presented in the previous section corresponds to a Base Case that, as shown later in this section, allows reproducing the experimental temperatures measured during the TRT. To illustrate the impact of layered heterogeneity on the analysis of a TRT performed without bleed, three alternative models were also considered. All models are presented in Fig. 6.8 and consist of :

- Base Case : Thermal and hydraulic parameters from Table 6.1 are used. Hydraulic conductivity is distributed as a function of depth that corresponds to the profile shown in Fig. 6.8. The thermal parameters of the main layers are coming from properties measured in the same geological units but not on the test site studied in this work. The mean thermal conductivity along the borehole is 3.99 W/mK.
- Case 1 (C1) : The hydraulic conductivity profile is replaced by a homogeneous value. This value corresponds to the mean hydraulic conductivity of 6.5×10^{-5} m/s given by the pumping test at PE-20-01.
- Case 2 (C2) : The hydraulic conductivity profile is replaced by a homogeneous value.

This value corresponds to 1×10^{-4} m/s and is coming from the regional hydrogeological study of Savard et al. (2006).

- Case 3 (C3) : The thermal conductivity profile is replaced by a homogeneous value. This value corresponds to 70 W/mK and is coming from the analysis of the TRT with the first-order approximation of the infinite line source model.

Note that several additional scenarios were analyzed such as the impact of the vertical distribution of the thermal properties and regional groundwater flow magnitude. Our results have shown that the distribution of thermal conductivity does not have a significant impact on the thermal response of the well if the mean value remains the same. Similarly, modifying the regional groundwater flow lead to similar EWT and LWT, although the hydraulic head distributions were distinct. To simplify the discussion, these additional results were not presented in this work.

6.4.1 Comparison of experimental and simulated temperatures

The EWT and LWT measured during the TRT and simulated for the Base Case and alternatives C1, C2 and C3 are all presented in Fig. 6.9. Table 6.2 also summarizes the mean absolute error (*mae*) and maximum absolute error between the experimental temperatures and the simulated ones. It also shows the relative error on the temperature change between the Base Case and alternatives C1 to C3. Note that the errors were computed using both EWT and LWT.

First, note in Fig. 6.9 how the simulated temperatures of the Base Case show a very good fit with the experimental temperature signal. Indeed, the simulated temperature (red lines) almost perfectly overlaps the experimental data (black lines). This fit was obtained without any major calibration. Hence, the combination of the hydraulic conductivity profiles inferred from the field observations and the hydraulic and thermal parameters presented in Table 6.1 resulted for the Base Case in a small *mae* of 0.04 °C and a maximum error of 0.31 °C.

Tableau 6.2 Comparison of the relative, maximum and mean absolute errors between the simulated and experimental temperatures.

| | Base | Case 1 (C1) | Case 2 (C2) | Case 3 (C3) |
|--|------|-------------|-------------|-------------|
| Mean absolute error (°C) | 0.04 | 0.25 | 0.76 | 1.36 |
| Maximum absolute error (°C) | 0.31 | 0.53 | 1.32 | 2.31 |
| Relative error on maximum temperature change (%) | - | -15.7 | -47.5 | -86.1 |

The alternative C1 has a uniform hydraulic conductivity of 6.5×10^{-5} m/s. Although the mean hydraulic conductivity are the same for both the Base Case and alternative C1, the use of a uniform value did not result in an optimal fit with the experimental data of the TRT. Indeed, C1 presents lower LWT and EWT with a *mae* more than 6 times the *mae* obtained for the Base Case. With respect to the Base Case, the maximum error for C1 is 70% higher. Since the hydraulic conductivity profile integrates the layered heterogeneity observed on site, this shows how the fractured zone impacts the thermal response of the well even without bleed.

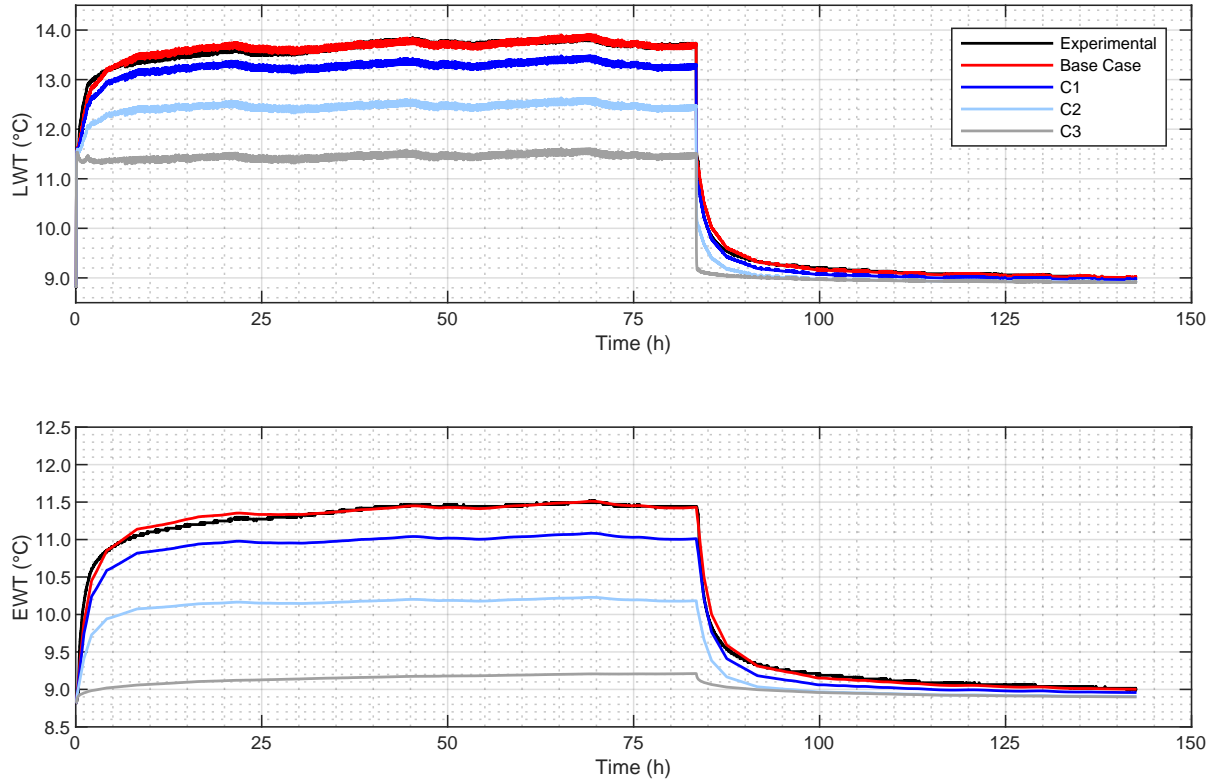


Figure 6.9 Comparison of experimental and simulated EWT and LWT for Base Case and alternatives C1, C2 and C3 illustrated in Fig. 6.8.

Alternative C2 has a higher hydraulic conductivity than the other scenarios. Again, use of a uniform and higher hydraulic conductivity did not result in optimal fit with a *mae* of 0.76°C and a maximum error of more than 1°C . Comparing C1 and C2 with each other, as both are simulated with a homogeneous hydraulic conductivity profile, one notices that the increase in the average hydraulic conductivity caused a decrease in the water temperature. Therefore, the average value of hydraulic conductivity also influences the thermal response

of the SCW. This result seems to contradict the previous findings of Deng (2004), Croteau (2011) and Nguyen et al. (2015) who all observed a moderate to no impact of the hydraulic conductivity on EWT or LWT. These results were, however, obtained for SCWs operated with an intermittent or continuous bleed, and with water reinjected at the top of the SCW, a significant difference to the cases analyzed here. Furthermore, their result did not consider layered heterogeneity in a very pervious aquifer.

Finally, the purpose of C3 is to use the thermal conductivity of 70 W/mK obtained from the first-order approximation of the infinite line source model for the three geological units of the model. Naturally, the simulated thermal response of the well with such an unrealistic value did not reproduce the experimental temperatures, with a *mae* of 1.36°C and a maximum error of 2.31°C.

In all alternative C1, C2 and C3, it is interesting to note that the use of theoretical and approximate values led to an overestimation of the well performance. The performance is overestimated in these cases because the simulated temperatures are lower than the experimental data acquired during TRT as visible in Fig. 6.9. As mentioned earlier, it is an exceptional performance that was observed at well PE-20-01 even for a SCW, but poor evaluation of hydraulic and thermal parameters could lead to an inappropriate design. In a situation where performance is overestimated, this could lead to a system that is unable to provide the thermal needs of a building.

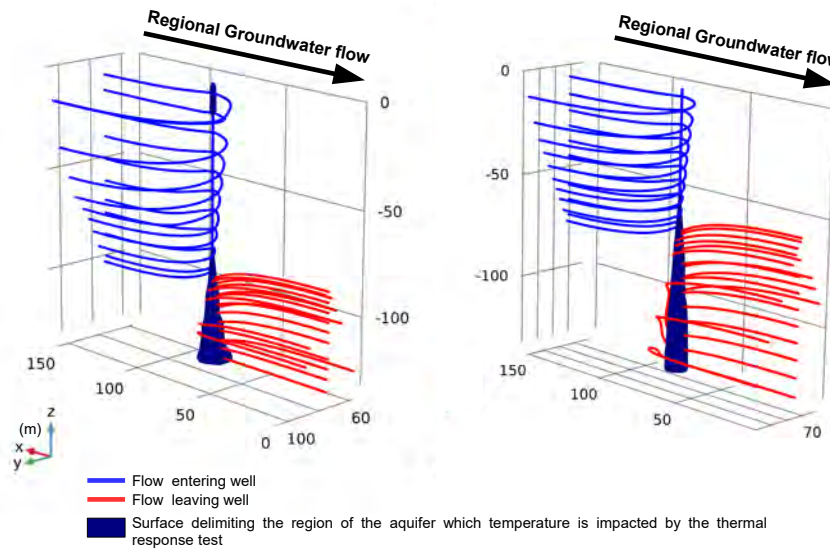


Figure 6.10 Visualization of groundwater flow entering (blue) and leaving the SCW PE-20-01 (red) for Base Case (left) and alternative C1 (right).

6.4.2 Advective heat transfer in the absence of bleed

As mentioned in the Introduction Section (see Fig. 6.1), pumping and reinjection modify the hydraulic head distribution in the vicinity of the SCW. Therefore, during the TRT, a local drawdown is created near the submersible pump while the hydraulic head increases around the injection point. In presence of a regional groundwater flow, this results in a somehow complex flow pattern. As illustrated by the blue lines in Fig. 6.10, a fraction of the water is coming from the aquifer and flows towards the well in the upper part of the SCW. In the lower section, part of the groundwater leaves the SCW and flows towards the aquifer following mainly the regional flow direction. Note that in both simulations presented in Fig. 6.10, most groundwater flows vertically in the annular space. This is due to the SCW configuration which involves pumping from the top of the well and reinjection at the bottom.

The transition depth between the inflow and outflow zones is referred to as the balance point where the head gradient is zero (Rees et al., 2004). In the Base Case, this balance point is deeper (92 m) than in alternative C1 (65 m). This is simply due to presence of a more pervious layer near the injection point that concentrates the flow of recirculated water in the Base Case. On the opposite, the materials near the surface are less pervious, which induces a higher drawdown. This results in moving the balance point downwards for the adopted configuration.

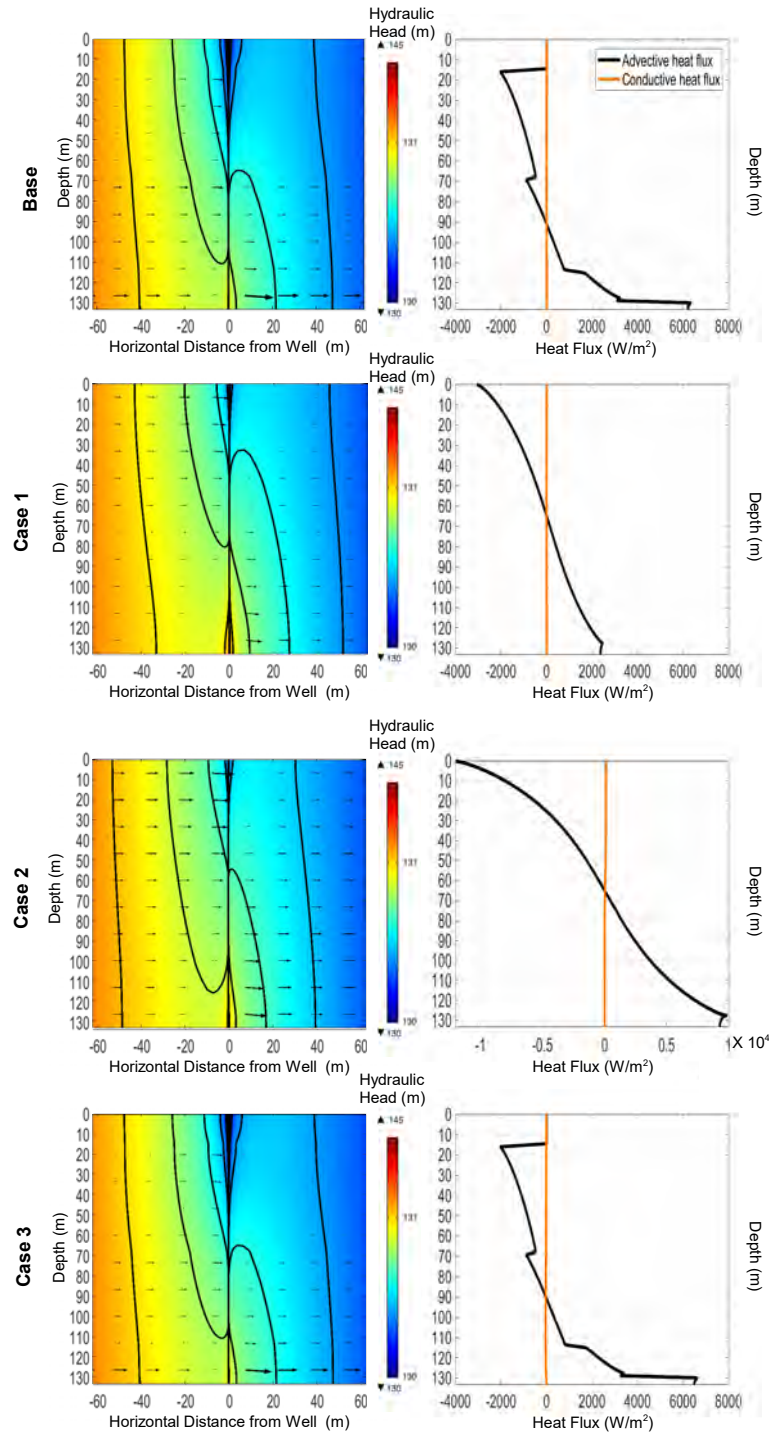


Figure 6.11 Hydraulic head and heat fluxes 83 hours after the beginning of the TRT. Left) Hydraulic head and equipotentials on a 2D plane parallel to the regional groundwater flow direction. Arrows indicate the direction of groundwater and their sizes are proportional to the Darcy velocity. Right) Horizontal component of the heat fluxes 15 cm from the south wall of the well. Negative heat flux corresponds to heat transfer towards the SCW while positive flux corresponds to heat transfer towards the aquifer. A balance of the illustrated heat flows was performed. The Base Case is shown on the first row, alternatives C1 to C3 are shown on rows 2 to 4.

To illustrate how the flow pattern shown in Fig. 6.10 can impact the advective heat transfer and the water temperature, Fig. 6.11 shows the hydraulic head and heat fluxes for a fixed time at the end of the heating period, which corresponds to time $t=83$ h in Fig. 6.9. The heat fluxes presented were obtained with a temperature change of 1°C for the purpose of generating the transfer function as described previously. Thus, the results presented correspond to a constant thermal load of 8.87 kW, which is approximately 40% of the actual load applied during the TRT. Even so, the observations made represents well the heat transfer mechanisms although their magnitude relates to a lower thermal load. One can see how the hydraulic heads are disturbed near the SCW during the TRT even if no bleed is active. The Base Case and alternative C3 have the same hydraulic head pattern since they share the same vertical distribution of hydraulic conductivity.

As shown in Fig. 6.11, the dominant heat transfer mechanism during the TRT is advective heat transfer despite no bleed is involved. Although the conductive heat flux appears to be zero, in the Base Case the flux varies in absolute value between 0 and 24 W/m^2 along the borehole. This is approximately 265 times less than the advective heat transfer. This confirms the relatively small impact of the conductive heat flux on the temperature and explains why the thermal response of the well is so sensitive to a change of hydraulic conductivity. Furthermore, this confirms that the interpretation of the TRT could not be done by the first-order approximation of the infinite line source as the latter is based on conduction only. So, when studying the thermal response of a SCW with a TRT, the analysis must consider the effect of layered heterogeneity and advection to deduce the thermal conductivity value.

The mean hydraulic conductivity impacts the magnitude of advective heat transfer, as can be seen by comparing the heat flux plots for alternatives C1 and C2 in Fig. 6.11. The average hydraulic conductivity of C1 is lower, as are the heat fluxes. With a lower heat flux, the temperature in the well is higher, as there is less heat exchange between the SCW and the aquifer. Note that this is the case since the TRT was done with heat injection, but the opposite could have been observed in a situation with heat extraction.

6.5 Conclusions

A comprehensive field testing program was accomplished to characterize an aquifer where a standing column well was installed. Analysis of the thermal response test data with the first-order approximation of the infinite line source provided a high and unrealistic value for

the mean thermal conductivity. Thus, development and exploitation of a numerical model were deemed necessary to explain the heat transfer processes that led to such high apparent thermal conductivity.

By comparison to conductive heat transfer, the modelling work accomplished showed that the advective heat transfer mechanism was dominant during the thermal response test, which was done without bleed in a very pervious fractured aquifer. Exploitation of the numerical model also revealed that profile and high mean hydraulic conductivity have an impact on the thermal response of the SCW even without bleed. It is necessary to point out that this conclusion is partially or completely in contradiction with some studies that have already been published. These studies, however, involved SCW operated with bleed, a significant difference with respect to this work. Additional research works might help to better understand under which hydrogeological conditions the hydraulic conductivity impacts the thermal performances of standing column wells.

The work done demonstrates that as the SCWs are in direct hydraulic connection with the aquifer, a hydrogeological understanding is needed to support the system design, as layered heterogeneity and mean hydraulic conductivity can affect the heat transfer of the SCW. An important observation made is related to the fact that first-order approximation of the infinite line source can't always be used to obtain the thermal conductivity around a standing column well, as this method can lead to unrealistically high thermal conductivity.

Nomenclature

| | |
|-----------|---|
| A_{out} | Cross-sectional area (annular space) (m^2) |
| A_{in} | Cross-sectional area (central space) (m^2) |
| b_i | Thickness of the borehole section i (m) |
| C_f | Volumetric heat capacity (J/m^3K) |
| EWT | Entering water temperature ($^{\circ}C$) |
| f | Excitation function ($^{\circ}C$) |
| g | Transfer function (-) |
| H | Hydraulic head (m) |
| K | Hydraulic conductivity of section i (m/s) |
| K_i | Hydraulic conductivity (m/s) |
| \bar{K} | Average hydraulic conductivity (m/s) |

| | |
|------------|--|
| k | Thermal conductivity (W/mK) |
| LWT | Leaving water temperature ($^{\circ}C$) |
| \dot{Q} | Heating Power (kW) |
| t | Time (h) |
| T | Temperature ($^{\circ}C$) |
| T_0 | Initial and uniform ground temperature ($^{\circ}C$) |
| ΔT | Temperature variation ($^{\circ}C$) |
| v_{in} | Normal velocity entering the well (m/s) |
| v_{out} | Normal velocity leaving the well (m/s) |
| \dot{V} | Pumping rate (L/min) or (m^3/s) |
| x | Horizontal distance (m) |
| z | Depth (m) |

Acronyms

| | |
|------|---------------------------|
| CLW | Closed-loop well |
| GHE | Ground heat exchangers |
| HDPE | High density polyethylene |
| IW | Injection well |
| mae | Mean absolute error |
| SCW | Standing column well |
| TRT | Thermal response test |

Acknowledgements : The authors wish to acknowledge the support and funding provided by Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (grant no. ALLRP 544477-2019), Hydro-Québec and Québec Research Funds - Nature and Technologies (grant no. 287650).

CHAPITRE 7 DISCUSSION GÉNÉRALE

Les données acquises et présentées au Chapitre 5 ont permis d'élaborer un modèle numérique 3D du site de l'École de la Clé-des-Champs. Ce dernier a été employé pour interpréter l'ERT, mais également pour étudier l'impact du contexte hydrostratigraphique sur la réponse thermique d'un PCP. Pour construire le modèle, certaines hypothèses reposant sur la caractérisation du site ont dû être émises. Des essais de velocimétrie en forage ont ensuite permis de soutenir ces hypothèses. Une discussion générale orientée vers le potentiel géothermique du site ainsi que l'incorporation du contexte hydrogéologique dans le modèle numérique, les hypothèses associées et les incertitudes sur les données est présentée dans ce chapitre.

7.1 Analyses des hypothèses

Une hypothèse importante qui a été employée dans le modèle numérique s'applique à l'incorporation de la fracturation dans l'aquifère. En effet, l'emplacement des zones fracturées a été déduit du profil de débits cumulés pendant la réalisation des forages ainsi que de l'évolution des pressions du compresseur de la foreuse. Il est intéressant de noter que les résultats obtenus avec la velocimétrie en forage supportent les observations notées lors des forages de l'automne 2020. Cela donne une certaine crédibilité au modèle numérique et aux hypothèses employées quant à la distribution verticale de la conductivité hydraulique. C'est particulièrement le cas pour l'incorporation de la valeur la plus élevée du profil de conductivité hydraulique à la base du forage, car les profils velocimétriques ont confirmé la présence d'une zone perméable importante au fond de tous les PCP investigués. Ensuite, ces profils confirment la présence d'un écoulement d'eau souterraine considérable entre 100 m et 130 m de profondeur. Ainsi, en plus d'augmenter le volume de terrain investigué et de confirmer l'extension latérale de certaines fractures, ces profils supportent l'incorporation de conductivités hydrauliques élevées dans la couche du modèle représentant la Formation de Cairnside qui a été observée à ces profondeurs. Le site de Mirabel présente donc des conditions hydrogéologiques intéressantes et les cinq PCP aménagés présente au moins une zone fracturée à la base de la colonne.

Une autre hypothèse concerne l'orientation des fractures. Il est impossible de connaître l'orientation des fractures sans réaliser des relevés géophysiques ou de géocaméra. Dans le cas de l'École de la Clé-des-Champs, l'hypothèse d'un pendage subhorizontal est toutefois plausible considérant le fait que des zones de fractures semblent avoir été intersectées à des profondeurs

similaires pour le PE-20-01 et le PE-20-02. Encore une fois, les vélocimètres ont permis de constater que les zones fracturées semblaient avoir une extension subhorizontale à la base du forage puis qu’une autre zone fracturée semble avoir un léger pendage. Les forages réalisés en 2021 ont aussi permis de confirmer l’extension des formations géologiques rencontrées ainsi que leur pendage supposé subhorizontal. Tout cela supporte le fait que le modèle numérique considère les trois unités comme étant horizontales.

À l’occasion de la réalisation des profils vélocimétriques, les niveaux d’eau ont été relevés. Pour des débits de pompage similaires, les rabattements stabilisés étaient variables. Par exemple, un rabattement trois fois supérieur à celui du PCP 2 a été relevé au PCP 4. Le modèle numérique présenté au Chapitre 6 tient compte uniquement d’une variabilité sur le plan vertical alors que sur le plan x et y l’aquifère a été considéré homogène. Cela représente une limitation du modèle numérique.

7.2 Particularité géothermique

Les profils de température initiale ayant été relevés au site de Mirabel ne correspondent pas tout à fait à un profil typique, il est généralement attendu que la température augmente de façon linéaire avec la profondeur (Gehlin et Nordell, 2003) et on peut en extraire le gradient géothermique. Ce n’est pas le cas pour les profils verticaux de température qui ont été mesurés au site de Mirabel, car, sous la section affectée par les variations saisonnières, les profils sont relativement uniformes. Dans le PE-20-01, on remarque une légèrement diminution de la température le long du profil. Cela semble donc indiquer un gradient géothermique ayant une tendance légèrement négative. Tel que mentionné au Chapitre 5, l’hypothèse avancée est que l’écoulement souterrain contribue à homogénéiser la température et que la zone fracturée à la base du forage apporte de l’eau souterraine à une température avoisinant les 8°C. Il est aussi possible, sans l’action de pompage et d’injection, qu’il existe un certain écoulement vertical dans le puits qui contribuent à homogénéiser la température de l’eau.

Somme toute, les données acquises au site de Mirabel pendant les essais sur le PCP témoignent de la performance élevée que certains milieux géologiques peuvent offrir. En plus des venues d’eau importantes et de la contribution du transfert de chaleur par advection sur la réponse thermique du puits, les matériaux géologiques au site de Mirabel présentent des conductivités thermiques élevés, particulièrement la Formation de Cairnside puisqu’elle est riche en quartz, un minéral possédant une conductivité thermique élevée.

7.3 Incertitudes sur les données

Lors de la réalisation de l'ERT, une perturbation thermique avoisinant les 3°C a été enregistrée. Il s'agit d'une faible perturbation thermique qui témoigne du potentiel géothermique du site. Or, les simulations réalisées dans le cadre des travaux de modélisation sont toutes contenues dans cette plage 3°C , en effet, aucune erreur absolue maximale ne dépasse les 3°C . Les erreurs moyennes absolues indiquent aussi des écarts par rapport aux données expérimentales relativement faibles pour les quatre cas simulés. Il est donc intéressant de considérer l'incertitude sur les mesures des données expérimentales.

Des capteurs de *HOBO®* de *Onset®* ont été employés pour obtenir les signaux de température pendant l'ERT. La précision de ces capteurs est de 0.25°C . La Figure 7.1 présente la plage d'incertitude sur les données expérimentales en comparaison avec les résultats des simulations pour le cas de base et le cas C1, les autres cas étant davantage éloignés des données expérimentales. Le cas de base se trouve en tout temps inclus dans l'intervalle défini par l'incertitude sur la mesure du capteur. Or, le cas C1, lui, se trouve à l'extérieur de cet intervalle sur 57% de la durée de l'essai. C'est particulièrement le cas pour la phase de chauffage. Ainsi, malgré le faible écart de température entre les simulations et les faibles mae en général, il est intéressant de noter que seul le cas de base se trouve entièrement inclus dans l'intervalle de précision du capteur de température.

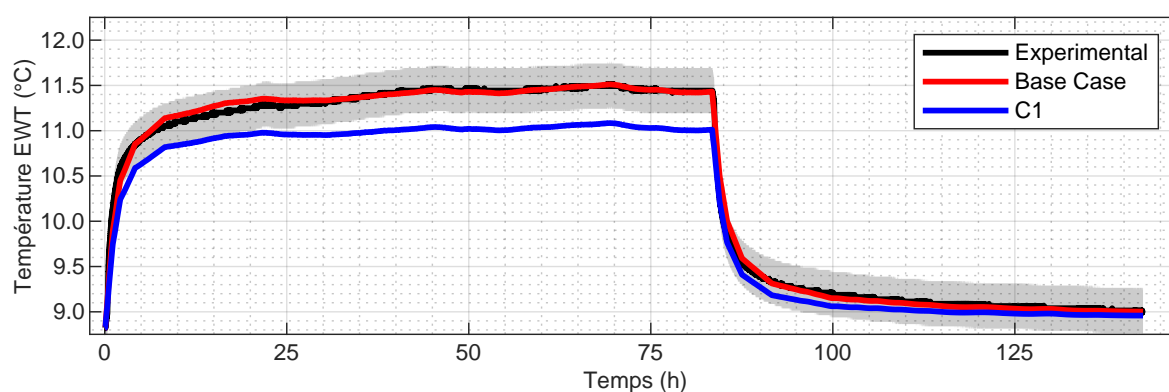


Figure 7.1 Affichage des données expérimentales et de la plage d'incertitudes associée à la lecture du capteur de température.

Malgré le fait que les écarts entre tous les cas étudiés demeurent plutôt faibles, il est inté-

ressant de noter que la tendance des données à la fin de la période de chauffage se distingue dans chaque cas. La Figure 7.2 permet d'apprécier visuellement ce phénomène, car les tendances des droites en trait tireté noir sont de plus en plus faibles pour les cas C1 à C3. Cela est cohérent avec la performance thermique observée pour chaque simulation. En effet, plus la pente est faible, plus la conductivité thermique estimée avec l'approximation de premier ordre de la SLI est grande. Dans le même ordre d'idée, plus la conductivité thermique est grande, plus les températures de EWT pendant l'ERT seront faibles. Ainsi, les tendances des cas C1 à C3 ne correspondent pas à celle du cas de base et ce dernier représente donc bien le contexte hydrogéothermique du site.

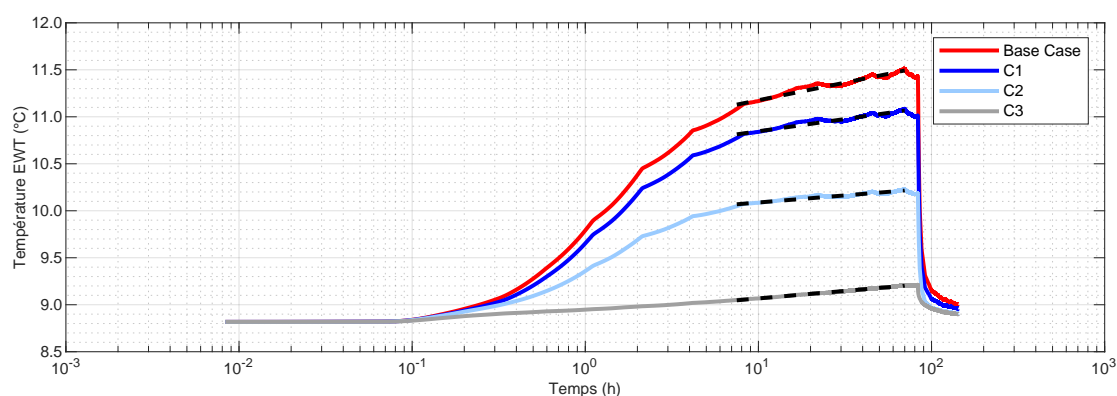


Figure 7.2 Comparaison de la tendance des données en fin de période de chauffage pour les cas simulés.

CHAPITRE 8 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Les systèmes géothermiques équipés de PCP présentent de nombreux avantages en termes d'efficacité et de coûts et leur conception requiert une bonne compréhension du milieu géologique dans lequel ils sont installés. Peu d'essais expérimentaux réalisés sur des PCP sont disponibles dans la littérature particulièrement en ce qui a trait à l'étude de l'influence du contexte hydrostratigraphique sur l'interprétation des ERT réalisés sur des PCP sans saignée. Le projet de recherche présenté dans ce mémoire a été réalisé au site de l'École de la Clé-des-Champs qui se trouvera à être l'hôte d'un système doté de PCP installé dans les Basses Terres du Saint-Laurent. L'objectif général de ce projet était donc de caractériser l'aquifère du site de Mirabel sur le plan hydrogéologique et thermique. Pour ce faire, deux objectifs spécifiques ont été définis soit d'acquérir les paramètres hydrogéothermiques de l'aquifère au moyen d'essais de terrain, puis d'étudier l'effet du contexte hydrostratigraphique sur la réponse thermique d'un PCP opéré sans saignée.

8.1 Synthèse des travaux

Une des contributions du projet de recherche est l'acquisition d'un jeu de données expérimentales pour un PCP opéré sans saignée dans un aquifère fracturé. Pour ce faire, une importante phase d'investigation sur le terrain a été réalisée dans le but de déduire les paramètres hydrogéologiques et thermiques de l'aquifère rocheux. Ainsi, au moyen de deux forages exploratoires, d'un essai de pompage à débit constant, d'un essai de réponse thermique sans saignée, des relevés velocimétriques en forage et des analyses géochimiques de l'eau souterraine un portrait détaillé du site a pu être établi. Lors des forages, des venues d'eau cumulant 1325 L/min à la base du PCP ont été enregistrées. L'objectif spécifique 1 du projet a donc été rempli puisqu'au PCP, une conductivité hydraulique moyenne de 6.5×10^{-5} m/s a été obtenue de l'essai de pompage et une conductivité thermique moyenne de 3.99 W/mK a été déduite de l'ERT. Les analyses d'eau souterraine ont permis d'obtenir un portrait de la qualité de l'eau au site en considérant entre autres le potentiel de colmatage du système. Il s'est avéré que le site présente un potentiel très faible de colmatage par les bactéries du fer. Toutefois, l'eau présente une tendance entartrante et corrosive. Finalement, les essais velocimétriques ont permis d'appuyer les hypothèses concernant l'important écoulement d'eau souterraine au site et plus spécifiquement, les hypothèses concernant la présence d'une zone de fracture hydrauliquement actives dans la portion inférieure des forages qui correspond à la Formation de Cairns et par le fait même, confirmer l'utilisation de conductivités hydrauliques élevées

pour représenter cette unité.

L'interprétation de l'ERT a été réalisée à l'aide d'une modélisation numérique combinée à une approche spectrale. Cette approche a été employée, car la méthode de l'approximation de premier ordre de la SLI ne permettait pas d'obtenir une valeur réaliste pour la conductivité thermique pour des matériaux géologiques. Le contexte hydrostratigraphique du site et son influence sur la réponse thermique ont donc été étudiés à l'aide du modèle. Ce dernier a permis de mettre en lumière la contribution du transfert de chaleur advectif dans la réponse thermique du PCP et ce, même en l'absence de saignée. De plus, l'intégration d'une zone de fractures dans le modèle, par le biais d'un profil de conductivité hydraulique, a permis de reproduire les signaux de température enregistrés pendant l'ERT. Donc il en a été déduit que la fracturation influençait la réponse thermique du PCP et ultimement l'interprétation des ERT réalisés en milieu fracturé. De plus, la fracturation en base de forage, telle qu'observée au site de Mirabel, diminue légèrement les performances thermiques du PCP en comparaison au cas d'un aquifère homogène. Les travaux réalisés ont également indiqué que la valeur moyenne de la conductivité hydraulique du site influence la réponse thermique du PCP selon la relation suivante : une augmentation de la conductivité hydraulique est bénéfique à la performance du PCP. La conductivité hydraulique s'avère être un paramètre influençant la réponse thermique du PCP au site de Mirabel puisque l'advection est le processus de transfert de chaleur dominant pendant l'ERT.

En outre, les modèles numériques alternatifs ont tous simulé des performances thermiques supérieures à celle qui a réellement été enregistrée au site. La surestimation des performances d'un puits peut mener à des erreurs lors de la conception et en définitive, conduire à un système étant dans l'incapacité de combler les besoins thermiques d'un bâtiment. Ceci met de l'avant l'importance de considérer les zones de fractures et les autres particularités hydrostratigraphiques dans l'interprétation des ERT. Ainsi, il est recommandé de bien étudier le contexte hydrostratigraphique avant de considérer l'emploi de l'approximation de premier ordre de la SLI puisque cette dernière ne considère que la conduction de chaleur et donc selon les conclusions présentées dans ce mémoire, elle n'est pas toujours adaptée pour obtenir la conductivité thermique du milieu géologique accueillant un PCP.

8.2 Limitations de l'étude

Certaines conclusions obtenues avec les travaux de modélisation entrent en contradiction avec des résultats publiés par d'autres auteurs. Il est donc nécessaire de mentionner que davantage d'études expérimentales sont requises et que les résultats obtenus dans le présent projet de maîtrise s'appliquent exclusivement au contexte hydrostratigraphique du site de l'École de la Clé-des-Champs. Les effets de la conductivité hydraulique, du gradient hydraulique et des fractures sur la réponse thermique d'un puits à colonne permanente ne semblent pas, à ce jour, pouvoir être décrits par des généralités, car des études expérimentales menées dans différents contextes géologiques ont rapporté des conclusions distinctes.

8.3 Améliorations futures

Plusieurs améliorations pourraient être apportées dans le cadre de futurs travaux de caractérisation et l'étude entamée avec le modèle numérique pourrait être poursuivie. Les principales recommandations quant à l'amélioration du projet sont avancées dans la section qui suit.

Lors de la réalisation de l'ERT, l'emploi de fibre optique aurait permis l'acquisition de données de température pour toute la longueur du forage et aurait enrichi le modèle numérique. De plus, l'utilisation de capteurs de pression pour suivre l'évolution du niveau d'eau dans les puits aurait permis d'acquérir des données complémentaires utiles à la conception, même si des travaux de modélisation réalisés dans le cadre d'une étude hydrogéologique ont permis de répondre à ces questions. De plus, il aurait été intéressant de réaliser un ERT avec saignée puisque cela aurait permis de comparer les résultats avec l'essai réalisé sans saignée et ultimement d'étudier l'effet de la zone de fractures sur la réponse thermique du PCP avec saignée dans le contexte hydrostratigraphique du site de Mirabel. Il aurait été définitivement intéressant d'utiliser des traceurs géochimiques pour tenter de quantifier l'advection dans le PCP PE-20-01 lors d'une opération sans saignée.

L'utilisation d'un modèle analytique tenant compte de l'écoulement souterrain aurait pu être envisagée afin de réaliser l'interprétation de l'essai de réponse thermique et comparer le résultat obtenu avec celui de l'approximation de premier ordre de la source linéique infinie.

La réalisation d'un profil de conductivité hydraulique vertical expérimental aurait été intéressante. Ce profil pourrait d'ailleurs être comparé à celui déduit des débits cumulés enregistrés

pendant les forages et inclus dans le modèle numérique. Un moyen envisagé pour l'obtenir est à l'aide d'essais réalisés avec des obturateurs. La conductivité hydraulique du site est toutefois plutôt élevée et il faudrait peut-être envisager une méthode d'investigation alternative.

Pour conclure, puisque le site de l'École de la Clé-des-Champs deviendra le site hôte d'un projet pilote pour un projet de démonstration de l'efficacité des PCP, de nombreuses autres investigations géophysiques, géologiques, structurales et environnementales sont entendues. Les données qui seront recueillies seront définitivement bénéfiques pour améliorer le modèle numérique et permettront de mieux représenter l'aquifère fracturé.

RÉFÉRENCES

- Acuña, J., Mogensen, P., et Palm, B. (2009). Distributed thermal response test on a u-pipe borehole heat exchanger. Effstock 2009 : 11th International Conference on Thermal Energy Storage, Stockholm, 14-17 juin, 2009. Academic Conferences Publishing.
- Al-Sarkhi, A., Abu-Nada, E., Nijmeh, S., et Akash, B. (2008). Performance evaluation of standing column well for potential application of ground source heat pump in Jordan. *Energy Conversion and Management*. 49(4), 863-872.
- Aranzabal, N., Radioti, G., Martos, J., Soret, J., Nguyen, F., et Charlier, R. (2016a). Enhanced thermal response test using fiber optics for a double U-pipe borehole heat exchanger analysed by numerical modeling. ECOS 2016 : 29th International Conference 19-23 juin 2016.
- Aranzabal, N., Martos, J., Montero, A., Monreal, L., Soret, J., Torres, J., et García-Olcina, R. (2016b). Extraction of thermal characteristics of surrounding geological layers of a geothermal heat exchanger by 3D numerical simulations. *Applied Thermal Engineering*. 99, 92-102.
- Beaudry, G., Pasquier, P., Marcotte, D. (2018). Hydrogeothermal characterization and modelling of a standing column well experimental installation. IGSHPA Research Track 2018, Stockholm, Suède.
- Beaudry, G., Pasquier, P., et Marcotte, D. (2019). The impact of rock fracturing and pump in-take location on the thermal recovery of a standing column well : model development, experimental validation, and numerical analysis. *Science and Technology for the Built Environment*, 25(8), 1052-1068.
- Beauheim, R. L., et Pedler, W. H. (2007). Fluid electrical conductivity logging in borehole dgr-1 at the bruce site. Conference : 60th Canadian Geotechnical Conference et 8th Joint CGS/IAH-CNC Groundwater Conference, Ottawa, Canada. 433-440.
- Cerclet, L., Courcelles, B., et Pasquier, P. (2020). Impact of Standing Column Well Operation on Carbonate Scaling. *Water*. 12(8), 2222.
- Chang, K.S., Kim, Y.J., et Kim, M.J. (2017). An Experimental Study on the Thermal Performance Evaluation of SCW Ground Heat Exchanger. *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, 25(1), 1750006 (13 pp.).
- Chang, K.S., Kim, Y.J., et Kim, M.J. (2019). An Investigation of Hydrological Effects on the Thermal Performance of Standing Column Well Using the in-situ Thermal Response Test. *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, 27(02).

- Chapuis, R. P. (1999). Guide des essais de pompage et leurs interprétations. Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Québec.
- Choi, H.-K., Yoo, G.-J., Lim, K.-B., Lee, S.-H., et Lee, C.-H. (2012). Characteristic analysis of bleeding effect on standing column well (SCW) type geothermal heat exchanger. *Journal of Central South University*. 19(11), 3202–3207.
- Clauser, C., et Huenges, E. (1995). Rock Physics and Phase Relations. A Handbook of Physical Constants, Volume 3, 105–126. Thomas J. Ahrens, editor.
- Conseil des bassins versants des Mille-Îles (COBAMIL). (2011). Portrait du bassin versant de la rivière du Chicot – Dans le cadre du Plan directeur de l'eau de la zone des Mille Îles.
- Comsol Multiphysics. (2019). Version 5.2, Stockholm, Suède.
- Croteau, J.E. (2011). Évaluation des paramètres influençant les températures d'opération des puits à colonne permanente. Mémoire de maîtrise. École Polytechnique de Montréal.
- Crowder, R.E., et Mitchell, K. (2002). Spinner Flowmeter Logging - A Combination of Borehole Geophysics and Hydraulics. Préparé pour : Arizona Hydrological Society's Well Design and Installation Workshop, Phoenix, Arizona.
- Dalla Santa, G., Pasquier, P., Schenato, L., et Galgaro, A. (2021). Repeated ETRTs in a complex stratified geological setting : high resolution thermal conductivity identification by multiple linear regression. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, In press.
- Dehkordi, S. E. et Schincariol, R. A. (2014). Effect of thermal-hydrogeological and borehole heat exchanger properties on performance and impact of vertical closed-loop geothermal heat pump systems. *Hydrogeology Journal*. 22(1), 189–203.
- Deng, Z. (2004). Modeling of standing column wells in ground source heat pump systems. Thèse de doctorat. Oklahoma State University.
- Deng, Z., Rees, S.J., et Spitler, J.D. (2005). A Model for Annual Simulation of Standing Column Well Ground Heat Exchangers. *HVAC&R Research*. 11(4), 637–655.
- Dion, G. (2021). Vélométrie de forage - vélocimètres à hélice et à pulsation de chaleur. Séminaire de géomatériaux, GLQ6003. 25 pages.
- Dresser Atlas Division (1982). Interpretive Methods for Production Well Logs. Section 2 : the Continuous Spinner Flowmeter : A Velocity Measuring Instrument. *Dresser Industries, inc.*
- Eppner, F., Pasquier, P., et Baudron, P. (2017). A coupled thermo-hydro-geochemical model for standing column well subject to CO₂ degassing and installed in fractured calcareous aquifers. *Geomechanics for Energy and the Environment*. 11, 14–27.

- Eppner, F. (2016). Évolution thermo-hydro-géochimique d'un puits à colonne permanente conduisant à la précipitation et à la dissolution de la calcite. Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal.
- Fetter, C. W. (2018). Applied Hydrogeology : Fourth Edition. Waveland Press. ISBN 978-1-4786-3744-8.
- Fujii, H., Okubo, H., Nishi, K., Itoi, R., Ohyama, K., et Shibata, K. (2009). An improved thermal response test for U-tube ground heat exchanger based on optical fiber thermometers. *Geothermics*. 38(4), 399–406.
- Gehlin, S. et Nordell, B. (2003). Determining undisturbed ground temperature for thermal response test. *ASHRAE Transactions*, Conference : Winter meeting of the American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 26-29 janvier 2003. 109(1), 151–156.
- Gervais, F. (2012). Stratigraphie des Basses-Terres du Saint-Laurent. Stratigraphie et sédimentologie, GLQ 3100. Polytechnique Montréal. Modifié de J. Beaulieu.
- Globensky, Y. (1987). Geology of the St. Lawrence Lowlands, Ministry of Energy and Resources, General Direction for geologic and mineral exploration, Québec, Report MM, 02–85.
- Hydro-Québec. (2021a). Mieux gérer sa consommation par grand froid. URL : <https://www.hydroquebec.com/residentiel/espace-clients/consommation/consommation-electrique-hiver.html>.
- Hydro-Québec. (2021b) Systèmes géothermiques. URL : <https://www.hydroquebec.com/residentiel/mieux-consommer/fenetres-chauffage-climatisation/geothermie.html>.
- Ingersoll, L. R. (1948). Theory of the ground pipe heat source for the heat pump. *Heating Piping and Air Conditioning*, 20, 119–122.
- Kastrinos, J. R., Chiasson, A., et Ormond, P. (2019). Estimating groundwater heat exchange in a standing-column well by injection of a bromide tracer. *Geothermics*. 82, 121–127.
- Koenig, A. A. et Goodhall, J. (2010). Thermal Measurement, Analysis & Interpretation of a Pilot Standing Column Well. *World Environmental and Water Resources Congress 2010 : Challenges of Change*. 833–845.
- Laroche, V. (2021). Intégration de sources énergétiques non conventionnelles : cas de la Ville de Montréal, Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal.
- Lee, C., You, J. et Park, H. (2018). In-situ response test of various borehole depths and heat injection rates at standing column well geothermal heat exchanger systems. *Energy and Buildings*. 172, 201–208.

- Lee, K. S. (2011). Modeling on the Performance of Standing Column Wells During Continuous Operation Under Regional Groundwater Flow. *International Journal of Green Energy*. 8(4), 474-485.
- Lee, S., Lee, C., Moon, H., Jeong, J., Lee, Y., Kim, H., Han, J., et Jo, S. (2016). Thermal response performance of the heat exchanger of a standing column well based on the location of the return pipe. *JP Journal of Heat and Mass Transfer*. 13, 559–573.
- Lenntech B.V. (2020). Lenntech B.V. (Ryznar Stability Index). URL : <https://www.lenntech.com/calculators/ryznar/index/ryznar.htm>.
- Li, B., Han, Z., Hu, H., et Bai, C. (2020). Study on the effect of groundwater flow on the identification of thermal properties of soils. *Renewable Energy*. 147, 2688–2695.
- Luo, J., Rohn, J., Bayer, M., Priess, A., et Xiang, W. (2014). Analysis on performance of borehole heat exchanger in a layered subsurface. *Applied Energy*. 123, 55–65.
- Marcotte, D., et Pasquier, P. (2008). Fast fluid and ground temperature computation for geothermal ground-loop heat exchanger systems. *Geothermics*. 37(6), 651–665.
- McDaniel, A., Tinjum, J., Hart, D. J., Lin, Y.-F., Stumpf, A., et Thomas, L. (2018) Distributed thermal response test to analyze thermal properties in heterogeneous lithology. *Geothermics*. 76, 116–124.
- MELCC. (2020). Système d'information hydrogéologique (SIH), Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.
- MERN. (2020). Système d'information géominière du québec - carte interactive, SIGEOM. Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles.
- Mount Sopris Instrument Co. Inc. (2021). QL40SFM bi-directional spinner flowmeter Data Sheet.
- Morad, S., Al-Ramadan, K., Ketzer, J. M., et Ros, L. F. D. (2010). The impact of diagenesis on the heterogeneity of sandstone reservoirs : A review of the role of depositional facies and sequence stratigraphy. *AAPG Bulletin*. 94(8), 1267–1309.
- Morgensen, P. (1983). Fluid to duct wall heat transfer in duct system heat storage. International Conference on Subsurface Heat Storage in Theory and Practice, Stockholm, Suède. 625–657.
- Muldoon, M., (Toni) Simo, J., et Bradbury, K. (2001). Correlation of hydraulic conductivity with stratigraphy in a fractured-dolomite aquifer, northeastern Wisconsin, USA. *Hydrogeology Journal*. 9(6), 570–583.
- Nasr, M. (2016). Évaluation des propriétés thermiques de la plateforme du Saint-Laurent : Mesures au laboratoire et approche diagraphique. Mémoire de maîtrise, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique.

- Ng, B. M., Underwood, C. P., et Walker, S. L. (2011). Standing column wells—Modeling the potential for applications in geothermal heating and cooling. *HVAC&R Research* 17(6), 1089-1100.
- Nguyen, A., Pasquier, P., et Marcotte, D. (2015). Influence of groundwater flow in fractured aquifers on standing column wells performance. *Geothermics*. 58, 39–48.
- Nguyen, A., Beaudry, G., et Pasquier, P. (2020). Experimental assessment of a standing column well performance in cold climates. *Energy and Buildings*. 226, 110391.
- O'Neill, Z. D., Spitler, J. D., et Rees, S. (2006). Performance analysis of standing column well ground heat exchanger systems. *ASHRAE Transactions*. 112(2), 633-643.
- Orio, C. D., Chiasson, A., Johnson, C. N., Deng, Z., Rees, S. J., et Spitler, J. D. (2005). A survey of standing column well installations in North America. Volume 111, Partie 2. *ASHRAE Transactions*, Denver, CO, États-Unis. 109–121.
- Pasquier, P. (2019). Cours 8 – Les puits à colonne permanente. Géothermie de basse température, GML 6953. Polytechnique Montréal.
- Pasquier P., et Marcotte, D. (2014). Joint use of quasi-3D response model and spectral method to simulate borehole heat exchanger. *Geothermics*. 51, 281–299.
- Pasquier P., et Marcotte, D. (2020). Robust identification of volumetric heat capacity and analysis of thermal response tests by Bayesian inference with correlated residuals. *Applied Energy*. 261.
- Pasquier, P., Nguyen, A., Eppner, F., Marcotte, D., et Baudron, P. (2016). 10 - Standing column wells. Dans S. J. Rees : Advances in Ground-Source Heat Pump Systems. *Elsevier*. 269–294.
- Perozzi, L. (2012). Travaux préparatoires au monitoring sismique de l'injection du CO₂. 4ième Colloque de la Chaire sur la séquestration géologique du CO₂. Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique.
- Radioti, G., Delvoie, S., Charlier, R., Dumont, G., et Nguyen, F. (2016). Heterogeneous bedrock investigation for a closed-loop geothermal system : A case study. *Geothermics*. 62, 79–92.
- Rafferty, K. (1999). Scaling in geothermal heat pump systems. Préparé pour : U.S. Department of Energy. Contract No. DE-FG07-90ID 13040.
- Ramesh, A. et Spitler, J. (2012). A quasi-two-dimensional standing column well model for ground source heat pump systems. Conférence Innostock tenue à Lleila, en Espagne, Mai 2012. Vol. 16.

- Rees, S. J., Spitler, J. D., Deng, Z., Orio, C. D., et Johnson, C. N. (2004). A Study of Geothermal Heat Pump and Standing Column Well Performance. *ASHRAE Transactions*. 110, 11.
- Richelieu Hydrogéologie Inc. Étude hydrogéologique à l'École de la clé-des-champs, projet de géothermie de type puits à colonne permanente. Rapport technique, Richelieu, QC. 117 pages.
- Savard M. M., et al. (2006). Le projet de caractérisation hydrogéologique régionale du système des aquifères fracturés du sud-ouest du québec (AFSOQ), Commission géologique du Canada. Bulletin 587. 117 pages.
- Schulze-Makuch D., et Cherkauer, D. S. (1998). Variations in hydraulic conductivity with scale of measurement during aquifer tests in heterogeneous, porous carbonate rocks. *Hydrogeology Journal*. 6(2), 204–215.
- Singhal, B. B. S., et Gupta, R. P. (2010). Applied Hydrogeology of Fractured Rocks : Second Edition. *Springer Science & Business Media*. 429 pages.
- Spitler J. D., et Gehlin, S. E. A. (2015). Thermal response testing for ground source heat pump systems—An historical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 50, 1125–1137.
- Spitler, J. D., Rees, S. J., Deng, Z., Chiasson, A., Orio, C. D., et Johnson, C. (2002). R&D studies applied to standing column well design. *ASHRAE Research Project*.
- Tiedeman, C. R., et Hsieh, P. A. (2001). Assessing an Open-Well Aquifer Test in Fractured Crystalline Rock. *Groundwater*. 39(1), 68–78.
- Tran Ngoc, T. D., Konstantinovskaya, E., Lefebvre, R., et Malo, M. (2011). Caractérisation hydrogéologique et pétrophysique des aquifères salins profonds de la région de Bécancour pour leur potentiel de séquestration géologique du CO₂. Rapport INRSCO2-2011-V2.10. INRS - Centre Eau Terre Environnement. 65 pages.
- USGS. Vertical flowmeter logging, groundwater information : Hydrogeophysics branch. URL <https://water.usgs.gov/ogw/bgas/flowmeter/index.html>.
- You, J., et Lee, C. (2020). Comparative Analysis of Geothermal Energy in Korea Based on Closed Borehole and Single- and Two-Well Standing Column Well Geothermal Heat Exchange Systems. *Applied Sciences*. 10(7), 2467.
- Yuill, G. K., et Mikler, V. (1995). Analysis of the effect of induced groundwater flow on heat transfer from a vertical open-hole concentric-tube thermal well. 173-185. (No. CONF-950104-). American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA (United States).

ANNEXE A ANALYSES GÉOCHIMIQUES

Les propriétés géochimiques de l'aquifère demeurent un enjeu d'importance lorsque le système géothermique est ouvert sur l'aquifère comme c'est le cas pour les PCP. Même si cela ne constitue pas l'un des objectifs du présent projet de recherche, de l'eau souterraine a tout de même été prélevée afin de dresser un portrait géochimique général de l'eau souterraine au site d'étude et de conclure sur le potentiel du risque de colmatage avant l'implantation du système géothermique.

Deux prélèvements d'eau souterraine ont été effectués dans le puits PE-20-01. Un premier échantillonnage a été réalisé après l'essai de pompage en date du 3 novembre 2020 et un second échantillonnage a été réalisé après l'essai de réponse thermique en date du 11 novembre 2020. Les échantillons d'eau souterraine ont été prélevés via une valve située sur une conduite à la sortie de l'unité de réponse thermique dans les contenants désignés et remis par le laboratoire d'analyse. Les échantillons ont été conservés au frais pendant leur transport jusqu'au laboratoire d'analyse. Les analyses effectuées sont présentées aux tableaux A.1, A.2 et A.3 et les paramètres sélectionnés visaient à répondre aux besoins des travaux la *Chaire de recherche en géothermie*.

D'abord, le profil bactériologique de l'eau souterraine, tel que présenté au tableau A.1, a permis de mettre de l'avant l'absence des bactéries du fer, et ce, lors des deux échantillonnages réalisés à l'automne 2020. Les deux prélèvements d'eau souterraine ont également révélé de faibles concentrations en fer. Il est donc possible de conclure que le risque d'un colmatage lié aux bactéries du fer est très faible.

Les autres paramètres évalués lors de l'analyse de l'eau souterraine et leurs concentrations respectives sont présentés aux tableaux A.2 et A.3. Il a ainsi été possible d'évaluer l'agressivité de l'eau souterraine pour un éventuel système géothermique (Rafferty, 1999). Pour ce faire, le logiciel de calcul Lenntech a été employé pour estimer l'indice de stabilité de Ryznar (Lenntech, 2020; Richelieu Hydrogéologie Inc., 2020). La valeur obtenue pour l'indice de stabilité de Ryznar est de 6.8 ce qui indique qu'il s'agit d'une eau agressive. Pour cette valeur, il est possible d'avancer qu'il y a des risques de corrosion et d'entartrage. Outre cette observation, en raison de sa dureté, l'eau souterraine au site d'étude est considérée comme étant dure. L'évolution de la qualité de l'eau souterraine au site d'étude continuera d'être suivie dans le cadre des projets de recherche de la *Chaire de recherche en géothermie*, les valeurs présentées constituent donc un profil initial dressé précédemment à l'exploitation du

système géothermique.

Tableau A.1 Qualité de l'eau souterraine - Évaluation bactériologiques

| Paramètres | PE-20-01 | |
|--|-----------|-----------|
| | 03-nov-20 | 11-nov-20 |
| Coliformes totaux (UFC/100 ml) | - | 51 |
| Bactéries atypiques (UFC/100 ml) | >200 | 9 |
| Bactéries du fer (UFC/100 ml) | Absence | Absence |
| Dénombrement total (BHAA) (UFC/ml) | 150 | 63 |
| Escherichia coli (UFC/100 ml) | 0 | 0 |
| Coliformes fécaux (UFC/100 ml) | 0 | 0 |
| Entérocoques fécaux (UFC/100 ml) | 0 | 0 |
| Bactéries sulfato-réductrices (UFC/100 ml) | <100 | <1000 |
| Fer ferreux (mg/L) | 0,06 | <0,02 |
| Fer total (Colorimétrie) (mg/L) | 0,12 | 0,16 |
| pH mesuré | 8,02 | 7,93 |

Tableau A.2 Qualité de l'eau souterraine - Évaluation physico-chimiques

| Paramètres | PE-20-01 | |
|---------------------------------------|-----------|-----------|
| | 03-nov-20 | 11-nov-20 |
| Azote ammoniacal (mg/L) | 0,059 | 0,072 |
| Carbone inorganique total (mg/L) | 67 | 87 |
| Carbone organique dissous (mg/L) | 1 | 0,95 |
| Carbone organique total (mg/L) | 1,4 | 1,3 |
| Conductivité (du laboratoire) (mS/cm) | 0,74 | 0,67 |
| Couleur vraie (UCV) | <2,0 | 6,1 |
| DBO5 (mg/L) | <4,0 | <4,0 |
| DCO (mg/L) | <5,0 | <5,0 |
| Fluorure (mg/L) | 0,33 | 0,31 |
| Nitrate et Nitrite (mg/L) | 0,11 | <0,020 |
| Nitrates (mg/L) | 0,11 | <0,020 |
| Nitrites (mg/L) | <0,020 | <0,020 |
| NTK Azote Total Kjeldahl | 1,1 | <0,40 |
| Orthophosphate (mg/L) | <0,050 | <0,050 |
| pH (du laboratoire) | 7,81 | 7,87 |
| Résistivité (kOhm-cm) | 1,3 | 1,5 |
| Sulfures (mg/L) | <0,020 | <0,020 |
| Turbidité (NTU) | 1,7 | 1,7 |
| Alcalinité totale (en CaCo3) (mg/L) | 250 | 260 |
| Carbone Total (mg/L) | 69 | 88 |
| Bromure (mg/L) | 0,12 | <0,10 |
| Bicarbonates (mg/L) | 250 | 260 |
| Carbonates (mg/L) | <1,0 | <1,0 |
| Chlorures (mg/L) | 45 | 31 |
| Hydroxides (mg/L) | <1,0 | <1,0 |
| Sulfates (mg/L) | 62 | 60 |
| Matières en suspension (mg/L) | <2,0 | <2,0 |

Tableau A.3 Qualité de l'eau souterraine - Évaluation des substances inorganiques

| Paramètres | PE-20-01 | |
|------------------------------|-----------|-----------|
| | 03-nov-20 | 11-nov-20 |
| Aluminium (mg/L) | <0,010 | <0,010 |
| Antimoine (mg/L) | <0,0010 | <0,0010 |
| Arsenic (mg/L) | <0,0010 | <0,0010 |
| Baryum (mg/L) | 0,14 | 0,16 |
| Béryllium (mg/L) | <0,0020 | <0,0020 |
| Bismuth (mg/L) | <0,0010 | <0,0010 |
| Bore (mg/L) | 0,073 | 0,056 |
| Cadmium (mg/L) | <0,00020 | <0,00020 |
| Calcium (mg/L) | 61 | 60 |
| Chrome (mg/L) | <0,0050 | <0,0050 |
| Cobalt (mg/L) | <0,0010 | <0,0010 |
| Cuivre (mg/L) | 0,0016 | <0,0010 |
| Dureté totale (CaCO3) (mg/L) | 300 | 290 |
| Étain (mg/L) | <0,0020 | <0,0020 |
| Fer (mg/L) | 0,27 | 0,27 |
| Lithium (mg/L) | <0,010 | <0,010 |
| Magnésium (mg/L) | 36 | 35 |
| Manganèse (mg/L) | 0,021 | 0,014 |
| Mercure (mg/L) | 0,00011 | <0,00010 |
| Molybdène (mg/L) | 0,0049 | 0,0052 |
| Nickel (mg/L) | <0,0020 | <0,0020 |
| Phosphore total (mg/L) | <0,010 | 0,014 |
| Plomb (mg/L) | 0,0005 | <0,00050 |
| Potassium (mg/L) | 7,3 | 6,3 |
| Sélénium (mg/L) | <0,0030 | <0,0030 |
| Silicium (mg/L) | 6,4 | 6,8 |
| Sodium (mg/L) | 38 | 29 |
| Strontium (mg/L) | 0,89 | 0,92 |
| Thallium (mg/L) | <0,0020 | <0,0020 |
| Titane (mg/L) | <0,010 | <0,010 |
| Uranium (mg/L) | <0,0010 | <0,0010 |
| Vanadium (mg/L) | <0,0020 | <0,0020 |
| Zinc (mg/L) | <0,0070 | <0,0070 |