

Université du Québec
Institut national de la recherche scientifique
Centre Eau Terre Environnement

ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE D'UN CHAMP DE FORAGES GÉOTHERMIQUES

Par
Nehed Jaziri

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître en sciences de la Terre

Jury d'évaluation

Président du jury et
Examineur interne

Michel Malo
INRS-ETE

Examineur externe

François Mathieu Potvin
Université Laval

Directeur de recherche

Jasmin Raymond
INRS-ETE

Codirecteur de recherche

John Molson
Université Laval

REMERCIEMENTS

J'aimerais d'abord exprimer ma plus sincère gratitude à mon directeur de recherche, le professeur Jasmin Raymond, qui m'a permis de découvrir le domaine passionnant qu'est la géothermie. Sa direction, ses conseils précis, sa disponibilité et sa motivation m'ont aidé ces deux dernières années à réaliser ce travail. Sa détermination et son sens analytique font de lui un professeur passionné très inspirant. Merci pour votre temps consacré à moi, votre patience et vos encouragements.

Je remercie également mon codirecteur de recherche, le professeur John Molson. Il a été généreux de son temps et n'hésitait pas à répondre à mes courriels et me faire de longues explications. Sa vaste expérience en recherche et ses nombreux conseils, surtout en hydrogéologie, m'ont grandement aidé à progresser et réaliser ce projet.

Je tiens à remercier aussi les autres membres de jury, soient les professeurs Michel Malo, et François Mathieu Potvin pour le temps consacré à l'évaluation de ce travail.

Je tiens à remercier également tout le personnel de la division du développement durable chez GBi à Mirabel et spécialement mes superviseurs Maxime Boisclair et Jérôme Plante pour leur encouragement et leur soutien technique et moral.

Je tiens aussi à remercier le personnel de la Commission scolaire des Patriotes et plus précisément l'ingénieur Jean-Francois Rondeau pour le temps qu'il a consacré à ce projet, en répondant à mes questions et mes courriels avec des documents très utiles.

Un remerciement spécial et reconnaissant pour Nicoló Giordano pour ses explications précieuses, son support inconditionnel dans la modélisation numérique et tout le temps qu'il m'a offert pour m'aider dans mon projet.

J'aimerais finalement adresser mes gratitudes les plus sincères à l'INRS dont le milieu de formation est des plus stimulants. Ce projet a été soutenu par une bourse BMP Innovation du CRSNG et du FRQNT en partenariat avec GBi et la Commission scolaire des Patriotes.

RÉSUMÉ

Les systèmes de pompes à chaleur géothermique sont couramment installés dans les bâtiments institutionnels. Ils offrent des économies d'énergie avantageuses et permettent de réduire les émissions de gaz à effet de serre. L'école Carignan-Salières, située sur la rive sud de Montréal, est un exemple de bâtiment muni d'un système de pompes à chaleur géothermique fonctionnel depuis 2013 et qui assure les besoins en chauffage et en climatisation. Ce dernier fonctionne sous des conditions variables d'écoulement d'eau souterraine à cause de sa localisation à proximité de deux carrières où l'eau est irrégulièrement pompée dans l'une de celles-ci. Les forages aménagés pour les échangeurs de chaleur ont été remplis de sable d'olivine puisque l'écoulement souterrain a rendu difficile le colmatage des forages avec un coulis. L'objectif de ce travail est d'évaluer la performance des échangeurs de chaleur à long terme, tout en mettant en évidence l'impact du choix des matériaux de remplissage des forages et de l'écoulement d'eau souterraine sur les transferts thermiques au niveau du sous-sol.

Un test d'injection de chaleur a été réalisé dans le but d'évaluer la réponse thermique de tout le champ de forages géothermiques. Les données enregistrées ont permis de développer un modèle préliminaire simple, à travers lequel la conduction de chaleur dans le sous-sol a été simulée pour évaluer la température d'opération des échangeurs de chaleur géothermique durant 20 ans. Les résultats ont montré que les matériaux de remplissage des forages ont un impact mineur sur la performance du système par rapport à l'impact que peut avoir la conductivité thermique apparente du sous-sol.

Un deuxième modèle simulant les transferts de chaleur par convection dans le sous-sol a été développé selon la méthode des éléments finis. Des mesures en laboratoire de la conductivité thermique du roc ont permis de mieux définir ce paramètre dans le modèle numérique. Les trente-et-un forages géothermiques ont été représentés avec des éléments 1D, superposés aux éléments 3D qui constituent le sous-sol formé de shales et calcarénites de la Formation de Nicolet dans les Basses-Terres du Saint-Laurent. Le modèle numérique, calibré avec les données du test d'injection de chaleur, a été utilisé pour simuler des scénarios d'opération du système géothermique sous différentes conditions d'écoulement d'eau souterraine liées au pompage de la carrière avoisinante.

Le gradient hydraulique, imposé par le biais de charges hydrauliques constantes aux frontières du modèle, a un impact important sur la performance du système géothermique. Lorsque le débit spécifique dans l'aquifère est supérieur à $2 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, ce qui correspond à la situation actuelle où l'eau souterraine est pompée de la carrière avoisinante, la température minimale à la sortie des échangeurs de chaleur pour une durée de 20 ans se situe au-delà $5 \text{ }^\circ\text{C}$. Lorsque le débit spécifique dans l'aquifère est de $6 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, ce qui représente des conditions pour lesquelles le pompage de l'eau est arrêté ou diminué dans la carrière, la température minimale du fluide caloporteur à la sortie des échangeurs de chaleur s'approche toutefois de $-3 \text{ }^\circ\text{C}$ alors que le point de congélation du fluide caloporteur est $-10 \text{ }^\circ\text{C}$. L'écoulement d'eau souterraine accrue a présentement un effet bénéfique sur l'opération du système géothermique de l'école Carignan-Salières. Un suivi de la température d'opération du système géothermique est recommandé dans le cas où le pompage de l'eau dans la carrière avoisinante est arrêté définitivement.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	ii
RÉSUMÉ	iii
TABLE DES MATIÈRES	v
LISTE DES TABLEAUX	vii
LISTE DES FIGURES.....	ix
LISTE DE la nomenclature.....	xi
1 Introduction.....	14
2 Problématique.....	15
3 Objectifs.....	17
4 Historique et synthèse des travaux antérieurs.....	18
5 Caractéristiques du système de pompes à chaleur géothermique de l'école Carignan-Salières.....	21
6 Contexte géographique et géologique de la région	22
1 Premier Article	27
PERFORMANCE EVALUATION OF A GROUND-COUPLED HEAT PUMP SYSTEM WITH A HEAT INJECTION TEST ANALYSIS	27
1.1 Introduction.....	29
1.2 Site Setting	30
1.3 Methodology	31
1.3.1 Heat Injection Test.....	31
1.3.2 GCHP simulation	32
1.3.3 Building load simulation	34
1.4 Results.....	35
1.4.1 Simulation of the heat injection test and calibration of the model	35
1.4.2 Long term simulations of the GCHPs operation	36

1.5	Conclusions	40
2	Deuxième Article.....	42
	LONG-TERM EVALUATION OF the OPERATING TEMPERATURE in A LARGE-SCALE GROUND-COUPLED HEAT PUMP SYSTEM UNDER VARIABLE GROUND WATER FLOW CONDITIONS	42
2.1	Introduction.....	44
2.2	Description of the site	45
2.2.1	Geological and hydrogeological setting.....	46
2.2.2	Ground eat Exchangers Field characteristics.....	47
2.3	Methodology	49
2.3.1	Field work	49
2.4	GCHP System simulation.....	51
2.4.1	Governing equations.....	52
2.4.2	Model geometry and properties	54
2.4.3	Initial and boundary conditions.....	55
2.4.4	Model calibration.....	57
2.5	Results.....	58
2.5.1	Field data analysis	58
2.5.2	GCHP System simulation.....	62
2.6	Discussion and conclusions	70
	Références	78
	ANNEXE	85

LISTE DES TABLEAUX

Article 1

Table 1-1. Constant GHE parameters used for all simulations with HyGCHP.	34
Table 1-2. Range of subsurface and borehole parameters identified with calibration simulations.	36
Table 1-3. Scenarios used for GCHP simulations and saved energy.	40

Article 2

Table 2-1. Constant parameters used in simulations.....	58
Table 2-2. Scenarios considered to calculate the hydraulic gradient near the school site as a function of hydraulic conductivity and annual net recharge.	61
Table 2-3. Average thermal conductivity measured with a needle probe and the MTPS method	61
Table 2-4. Range of parameter uncertainty in the calibration simulations.....	63
Table 2-5. Scenarios considered for GCHP system simulation at the Carignan-Salières school building.	66

LISTE DES FIGURES

Introduction

Figure 1. Nombre de pompes à chaleur installées entre 1990 et 2013 au Canada (Raymond <i>et al.</i> , 2015, Tanguay, 2014).	15
Figure 2. Photo de l'école Carignan-Salières.	15
Figure 3. Localisation de l'école Carignan-Salières par rapport aux deux carrières.....	17
Figure 4. Plan d'aménagement des puits de l'école Carignan-Salières.	22
Figure 5. Carte géologique des Basses-Terres du Saint-Laurent et localisation de l'école Carignan-Salières (Comeau <i>et al.</i> , 2004, Globensky, 1987).....	24
Figure 6. Colonne stratigraphique des Basses-Terres du Saint-Laurent (Comeau <i>et al.</i> , 2004, Globensky, 1987).....	25

Article 1

Figure 1-1. Location of the Carignan-Salières School building with respect to the surrounding quarries.....	31
Figure 1-2. Fluid temperature and flow rate recorded during the heat injection test at the Carignan-Salières School.	32
Figure 1-3. Measured and simulated water temperature entering the heat pumps.	36
Figure 1-4. Heating and cooling loads for the Carignan-Salières school building.	37
Figure 1-5. Simulated water temperature at the entrance of the heat pumps for twenty years of operation under a) the basic, b) the pessimistic and c) the optimistic scenarios.	38

Article 2

Figure 2-1. Geological map of the area showing the position of the Carignan-Salières elementary school (Bédard <i>et al.</i> , 2016).	46
Figure 2-2. Satellite image of the Carignan-Salières school building and neighbouring quarries.	47
Figure 2-3. GHE field of the Carignan-Salières elementary school.....	48
Figure 2-4. Plan view of the triangular prismatic mesh with details on the discretization around the thirty-one GHEs. The red rectangle show the enlarge zone in Figure 16.....	55
Figure 2-5. Plan view of the triangle prismatic mesh with details on the discretization detail around two GHEs.....	55
Figure 2-6. 3D model showing the boundary conditions and initial temperature for each layer.	57
Figure 2-7. Conceptual model of the GHE field at the Carignan-Salières elementary school.....	59
Figure 2-8. Fluid temperature and flow rate recorded during the heat injection test.....	62

Figure 2-9. Simulated heating and cooling loads imposed to the GHE field of the school building calculated with eQuest from January (0 d) to the end of December (365 d).63

Figure 2-10. Best match between measured and simulated GHE outlet temperature.....64

Figure 2-11. Simulated GHE inlet and outlet temperatures for twenty years of operation at the Carignan-Salières school building according to different subsurface scenarios.....67

Figure 2-12. One-year propagation of thermal perturbation during the middle of the cooling season on mid-summer in the case of a low hydraulic gradient (Scenario G).68

Figure 2-13. One-year propagation of thermal perturbation during the middle of the cooling season on mid-summer in the case of a high hydraulic gradient (Scenario H).68

Figure 2-14. One-year propagation of thermal perturbation during the end of the heating season on March the 31st in the case of a low hydraulic gradient (Scenario G).69

Figure 2-15. One-year propagation of thermal perturbation during the end of the heating season on March the 31st in the case of a low hydraulic gradient (Scenario H).69

LISTE DE LA NOMENCLATURE

Nomenclature

c [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$] : capacité thermique spécifique

COP [-] : Coefficient de performance

C [-] : facteur de correction

d [m] : diamètre du tuyau

D [m] : diamètre du forage

h [m] : charge hydraulique

H [W m^{-3}] : source de chaleur

K [m s^{-1}] : conductivité hydraulique

P [W] : puissance

P [kW] : taux d'injection de chaleur

q' [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$] : débit volumique

q [m s^{-1}] : flux de Darcy

Q [m^3] : source d'eau externe

R [m K W] : résistance thermique

S_s [m^{-1}] : coefficient d'emmagasinement spécifique

S [m] : surface d'échange spécifique

T [$^{\circ}\text{C}$] : température

\mathbf{u} [kg m^{-1}] : vecteur de masse volumique

Symboles grecques

ε [-] : fraction volumique

ϕ [$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$] : coefficient de transfert de chaleur

ρ [kg m⁻³] : masse volumique

Λ [W m⁻² K⁻¹] : tenseur de dispersion hydrodynamique pour le transfert de chaleur

λ [W m⁻¹ K⁻¹] : conductivité thermique

Indices et exposants

EOB : Oberbeck-Boussineq approximation

f : fluide caloporteur

fig : interaction entre paroi interne du tuyau et matériaux de remplissage

fog : interaction entre parois externe du tuyau et matériaux de remplissage

g : matériaux de remplissage

gg : échange thermique au sein des matériaux de remplissage

gs : échange thermique entre le sol et les matériaux de remplissage

gw : eau souterraine

i : interne

o : externe

r : fluide caloporteur

s : surface

I. Synthèse et introduction générale

1 INTRODUCTION

Lors de la dernière décennie, les émissions croissantes des gaz à effet de serre et les coûts grandissants associés au chauffage et à la climatisation des bâtiments ont mené l'industrie à chercher des sources d'énergie autres que l'électricité et les hydrocarbures. L'énergie géothermique, emmagasinée dans le sous-sol, est devenue une alternative tangible pour le chauffage des bâtiments institutionnels, commerciaux et industriels, surtout en climat tempéré où les besoins en chauffage et climatisation sont importants.

Les systèmes de pompe à chaleur géothermique offrent un meilleur rendement énergétique que les systèmes conventionnels utilisés pour le chauffage et la climatisation des bâtiments. En effet, les systèmes géothermiques permettent d'extraire et d'injecter de l'énergie thermique dans le sous-sol. En hiver, le sous-sol fournit une partie de l'énergie thermique pour le chauffage et, en été, il est le récepteur de cette chaleur pour la climatisation. La pompe à chaleur géothermique, qui sert à déplacer cette énergie thermique, permet de réaliser des économies de chauffage et de climatisation de l'ordre de 50 à 60 %.

L'industrie géothermique a connu une croissance surprenante au cours des dernières années (Figure 1). Le marché de la géothermie au Canada s'est amplifié de 40 % entre 2006 et 2008. Un pic de 15 913 unités installées a été atteint en 2009 grâce à des subventions du gouvernement à un moment de forte augmentation du prix des hydrocarbures (Raymond *et al.*, 2015).

L'école Carignan-Salières (Figure 2) de la Commission scolaire des Patriotes en Montérégie est un exemple de bâtiment institutionnel utilisant cette technologie. Un système géothermique à boucle fermée avec des échangeurs de chaleur verticaux aménagés dans des forages a été installé en octobre 2013 afin d'assurer les besoins de chauffage et de climatisation du bâtiment. Ce système est toutefois opéré dans des conditions d'écoulement d'eau souterraine variables et les échangeurs de chaleur n'ont pas été scellés par un coulis géothermique.

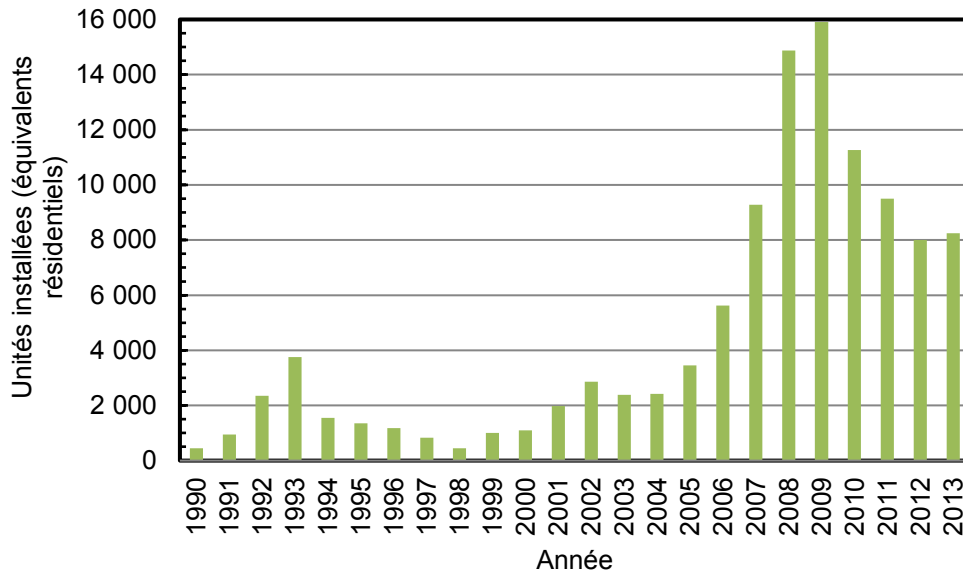


Figure 1. Nombre de pompes à chaleur installées entre 1990 et 2013 au Canada (Raymond et al., 2015, Tanguay, 2014).



Figure 2. Photo de l'école Carignan-Salières.

2 PROBLÉMATIQUE

Lors de la construction de l'école Carignan-Salières et de l'aménagement du système de pompes à chaleur géothermique, les forages ont intercepté des unités de roc fracturé qui laissaient entrevoir un écoulement d'eau souterraine important. Les ingénieurs de l'entreprise GBi, au moment de la conception du système, avaient prévu l'installation d'un

coulis géothermique pour sceller les forages. Celui-ci devait être formé de 84.6 % de sable, 15.4 % de bentonite et la balance d'eau afin d'obtenir une conductivité thermique de $1.64 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ($0.951 \text{ btu h}^{-1} \text{ ft}^{-1} \text{ }^\circ\text{F}^{-1}$).

Lorsque le foreur a essayé de remplir les forages avec le coulis, l'écoulement d'eau souterraine a entraîné les fines particules de coulis qui se sont dissipées dans les fractures des formations géologiques. Par conséquent, l'entrepreneur en forage chargé d'aménager les échangeurs de chaleur a décidé de remplir les forages avec du sable d'olivine de granulométrie grossière, ce qui n'était pas prévu. Les matériaux de remplissage peuvent avoir un impact sur la performance des échangeurs de chaleur. L'entreprise GBi et la Commission scolaire des Patriotes qui gère l'école désiraient connaître l'impact de cette modification apportée au remplissage des forages, notamment sur les économies d'énergie qui dépendent de la performance des échangeurs de chaleur.

Par ailleurs, l'école Carignan-Salières est construite à côté d'une première carrière abandonnée et d'une seconde carrière active où l'eau souterraine est pompée de façon irrégulière (Figure 3). Le régime d'écoulement souterrain variable pourrait aussi avoir une influence directe sur la performance du système géothermique responsable du chauffage et de la climatisation du bâtiment. L'écoulement d'eau souterraine a généralement un effet bénéfique sur la performance d'un champ de forages géothermiques, mais qu'arrivera-t-il au système si la carrière ferme et le débit d'écoulement d'eau souterraine diminuent à l'endroit des forages?

En outre, deux tests de réponse thermique (TRT) ont été réalisés par des firmes privées dans le but de mesurer la conductivité thermique du sous-sol. Un premier TRT a été achevé juste avant l'aménagement des échangeurs de chaleur et a indiqué une conductivité thermique globale égale à $2.58 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (Leblanc, 2012). Un deuxième TRT, réalisé après l'installation des forages géothermiques, a indiqué une conductivité thermique globale égale à $2.27 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (Renaud, 2013). La différence de conductivité thermique effective obtenue entre les deux essais pourrait être causée par l'écoulement d'eau souterraine dont l'intensité varie avec le pompage intermittent de l'eau dans la carrière active voisine de l'école.

Ce projet de recherche est important pour l'industrie géothermique, car il permettra d'améliorer la compréhension des phénomènes de transfert thermique qui affectent l'opération des systèmes et l'évaluation de leur performance dans des conditions d'écoulement d'eau souterraine variables. Ce type d'évaluation des performances est généralement effectué à l'échelle d'un seul forage, alors que cette fois il a été effectué pour l'ensemble du champ d'échangeurs de chaleur puisque le système est fonctionnel depuis 2013 et l'accès aux différentes composantes de façon séparée est restreint.

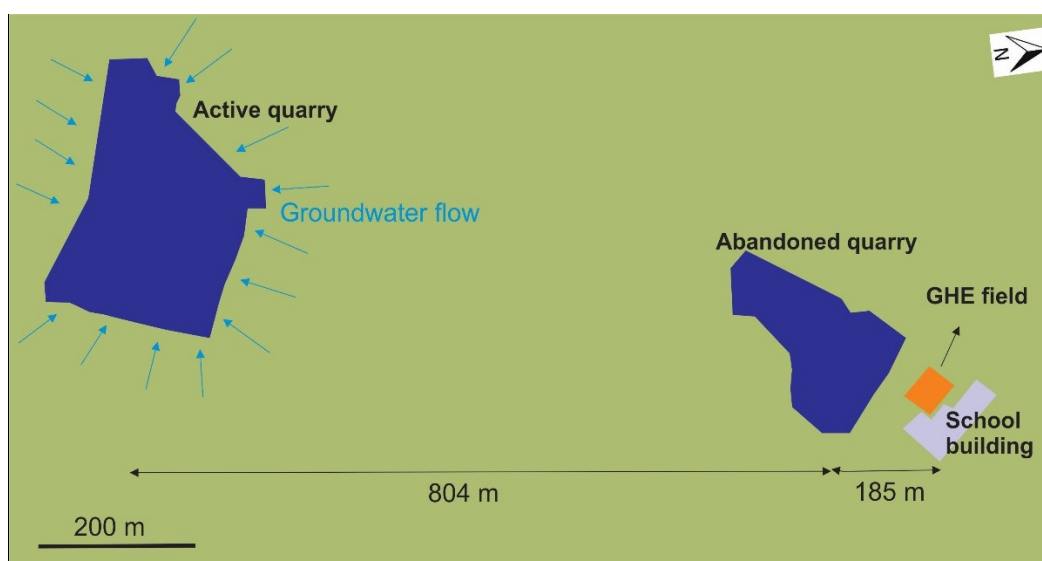


Figure 3. Localisation de l'école Carignan-Salières par rapport aux deux carrières.

3 OBJECTIFS

Ce projet de maîtrise a pour objectif général d'évaluer l'impact des matériaux de remplissage et de l'écoulement d'eau souterraine variable sur la performance du champ de forages géothermiques de l'école Carignan-Salières pour une période d'opération prolongée, soit 20 ans.

Pour cela, les objectifs spécifiques sont les suivants :

- Évaluer la réponse thermique de l'ensemble du champ de forages géothermiques sur une courte durée;

-Reproduire la température d'opération observée à l'aide d'un modèle simple de transfert thermique par conduction de chaleur dans le sous-sol afin d'évaluer l'impact de longue durée sur les économies d'énergie;

-Reproduire la température d'opération observée à l'aide d'un modèle numérique de transfert thermique par conduction et advection dans le sous-sol afin d'évaluer l'impact de longue durée sur la température d'opération du système;

-Recommander de meilleures pratiques d'opération pour les systèmes géothermiques soumis à un écoulement d'eau souterraine variable.

4 HISTORIQUE ET SYNTHÈSE DES TRAVAUX ANTÉRIEURS

L'installation des premiers systèmes de pompes à chaleur géothermique a débuté lors des années 1950 (Coalition canadienne de l'énergie géothermique, 2010). Un nombre sommaire de travaux réalisés sur les systèmes géothermiques et pertinents pour ce projet de maîtrise sont revus ici. Smith (1956) est l'un des premiers auteurs qui décrit des essais expérimentaux ayant permis de distinguer les facteurs qui influencent directement la performance des forages géothermiques, comme les caractéristiques thermo-physiques du sous-sol. Des travaux récents ont quant à eux mis en lumière l'impact de l'hétérogénéité du sous-sol et de l'écoulement d'eau souterraine sur la réponse thermique de champs d'échangeurs de chaleur (Barla *et al.*, 2015, Bauer *et al.*, 2009, Dehkordi *et al.*, 2014, Ferguson, 2015, Fujimoto *et al.*, 2011) et de forages simples lors de l'analyse des TRT (Raymond *et al.*, 2013).

Des développements importants au niveau de la simulation des systèmes de pompes à chaleur géothermique ont été réalisés par Hellström (1991) qui a étudié dans sa thèse de doctorat la réponse thermique des échangeurs de chaleur aménagés dans les forages. Il a, entre autres, développé des équations mathématiques qui permettent d'estimer la résistance thermique des forages et du sous-sol. Ces équations ont été utilisées dans la première partie du mémoire pour la simulation des systèmes géothermiques avec l'outil HyGCHP (Hackel *et al.*, 2011). Ce dernier fait appel à TRNSYS qui utilise le modèle DST (Duct Storage Model) développé par Hellström (1989). Le modèle implique la conduction

et le stockage de la chaleur dans le sous-sol et permet de simuler un nombre relativement large d'échangeurs de chaleur. La méthode des différences finies est utilisée pour résoudre le transfert de chaleur par conduction provenant d'une source linéaire dans un milieu en coordonnées cylindriques.

Le modèle DST a été largement utilisé pour la simulation des systèmes géothermiques, notamment par Beckman *et al.* (1994) qui ont effectué des simulations avec le programme TRNSYS dans le but de prédire et d'évaluer la performance de pompes à chaleur géothermique durant 5000 heures et considérant les paramètres physiques du sous-sol, des échangeurs de chaleur, du climat et du fluide caloporteur.

Plus de travaux considérant l'impact de l'écoulement d'eau souterraine face à la sensibilité de la performance des échangeurs de chaleur en fonction du débit d'écoulement d'eau souterraine ont été effectués par Bauer *et al.* (2009). Un modèle, qui couple le transfert de chaleur par conduction et advection causée par l'écoulement d'eau souterraine a été développé par ces auteurs dans le but de simuler l'influence de l'écoulement d'eau souterraine sur le stockage de l'énergie thermique dans le sous-sol. Ce modèle d'éléments finis a été développé en combinant des éléments unidimensionnels représentant les échangeurs de chaleur superposés aux éléments tridimensionnels du sous-sol. Le modèle de Bauer *et al.* (2009) a été utilisé pour évaluer la performance d'un système de quatre-vingt échangeurs de chaleur. C'est ce même type de modèle qui couple le transfert de chaleur par conduction et advection qui a été utilisé dans le but d'évaluer la performance des trente-et-un échangeurs de chaleur à l'école Carignan-Salières, bien qu'ici il ne s'agit pas d'un système de stockage thermique, mais bien d'un système conventionnel de pompes à chaleur. En effet, les simulations poussées qui ont été exécutées dans ce projet de maîtrise ont été entreprises avec le programme FEFLOW. Ce dernier utilise deux méthodes différentes pour la modélisation des échangeurs de chaleur, soit l'approche d'Al-Khoury *et al.* (2005) et l'approche d'Eskilson *et al.* (1988). Dans les deux cas, FEFLOW permet de superposer la température calculée le long d'éléments unidimensionnels représentant les forages à la température du milieu poreux 3D déterminée avec la méthode des éléments finis. La réponse des échangeurs de chaleur est représentée par une série de résistances thermiques. Ce concept de modélisation a été intégré dans le programme FEFLOW afin de simuler l'impact de

l'écoulement souterrain et d'un sous-sol hétérogène face au transfert thermique et à l'opération d'échangeurs de chaleur (Trefry *et al.*, 2007). Une représentation des échangeurs de chaleur par des éléments linéaires permet d'utiliser un maillage grossier et de réduire le temps de calcul lorsque comparé à une discrétisation en trois dimensions qui demande un maillage fin et un long temps de calcul.

La méthode d'Eskilson *et al.* (1988) est basée sur le transfert de chaleur local en régime permanent entre les deux tuyaux de l'échangeur et le sous-sol à travers le coulis dans un puits géothermique vertical. Cette approche est valide pour la prédiction à long terme de la température des échangeurs de chaleur, mais elle est non recommandée pour les simulations à court terme de quelques heures, car elle ne prend pas en considération les effets locaux transitoires internes des échangeurs de chaleur (Diersch *et al.*, 2010). Dans le cadre de cette maîtrise, la méthode utilisée pour les simulations numériques avec le programme FEFLOW est celle d'Eskilson *et al.* (1988) car cette dernière est appropriée pour la durée de modélisation considérée dans ce travail, soit 20 ans, et offre un temps de calcul plus rapide.

À titre d'exemple, l'approche implémentée dans FEFLOW a été utilisée par Fujimoto *et al.* (2011) qui ont modélisé la performance d'un système de pompes à chaleur géothermique et son effet à long terme sur la température du sous-sol. Le système était constitué de soixante-dix-huit forages verticaux utilisés pour le chauffage et la climatisation de serres. Les travaux ont d'abord été effectués à l'échelle d'un forage et ensuite à l'ensemble du système en développant deux modèles numériques avec FEFLOW. Le modèle de l'échangeur de chaleur unique avait pour but d'estimer les paramètres physiques utilisés dans le deuxième modèle de l'ensemble du système qui comprend les soixante-dix-huit puits. Le modèle a été calibré avec des mesures de température du fluide dans les tuyaux de l'échangeur de chaleur durant un test de réponse thermique. Raymond *et al.* (2015) ont réalisé ce même type d'essai de réponse thermique afin d'évaluer la performance d'échangeurs de chaleur uniques en comparant la résistance thermique des forages mesurée à celle calculée selon les paramètres de conception du système. Des approches analytiques (Claesson *et al.*, 2011) et empiriques (Remund, 1999) ont été utilisées pour calculer la résistance thermique théorique et comparer la valeur obtenue avec les essais de terrain. Les résultats de ce travail ont

permis de distinguer l'influence de la conductivité thermique des matériaux de remplissage et de l'espacement des tuyaux sur la résistance thermique des forages. Dans le cas du champ de puits de l'école Carignan-Salières, une méthodologie semblable a été utilisée, mais pour simuler l'ensemble du système d'échangeurs de chaleur afin d'identifier l'impact des propriétés thermo-hydrauliques du sous-sol et des matériaux de remplissage des forages sur la performance du système à long terme.

Un autre exemple d'intérêt concerne les travaux de Barla *et al.* (2015) qui décrivent une étude réalisée à Turin en Italie sur la Tour Intesa San Paolo dont les besoins énergétiques sont en partie comblés par des échangeurs de chaleur à boucle fermée. Une modélisation thermo-hydraulique d'essais de pompage à grande échelle ainsi que de simulations de forages géothermiques sous l'impact de l'écoulement d'eau souterraine a été réalisée avec le logiciel FEFLOW. Le couplage de l'écoulement d'eau souterraine et du transfert thermique ont permis une analyse prédictive du comportement du système géothermique en fonction du temps. Les résultats de cette étude sont un exemple pour le projet de maîtrise réalisé puisque les travaux ont un objectif commun d'effectuer une prédiction à long terme de la performance d'un système géothermique selon un modèle numérique qui couple le transfert de chaleur et l'écoulement d'eau souterraine.

5 CARACTÉRISTIQUES DU SYSTÈME DE POMPES À CHALEUR GÉOTHERMIQUE DE L'ÉCOLE CARIGNAN-SALIÈRES

Le champ de puits géothermiques de l'école Carignan-Salières est formé de trente-et-un forages verticaux installés sous la cour de l'école et espacés de 6 m l'un de l'autre (Figure 4). Chaque échangeur de chaleur a une profondeur moyenne de 152.4 m (500 pieds) et dispose d'un tuyau en U fait de polyéthylène haute-densité. Les tubes en U sont séparés par des entretoises géothermiques ayant la forme d'Oméga (Ω). Le fluide caloporteur est du propylène glycol ayant une concentration volumique de 25 %. Une cinquantaine de thermopompes sont distribuées dans les différentes pièces de l'école servant à chauffer et climatiser le bâtiment. Le système est fonctionnel depuis octobre 2013, assurant le chauffage et la climatisation de l'école.

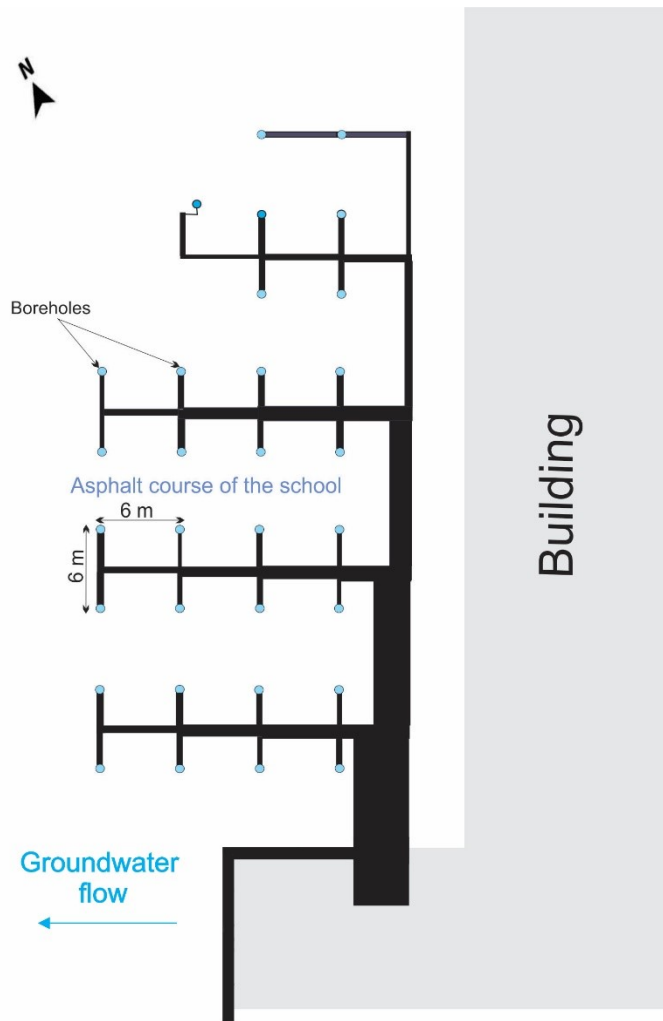


Figure 4. Plan d'aménagement des puits de l'école Carignan-Salières.

6 CONTEXTE GÉOGRAPHIQUE ET GÉOLOGIQUE DE LA RÉGION

L'école Carignan-Salières est située sur la rive sud de Montréal dans la ville de Carignan. Elle a comme coordonnées 45° 27'43,22" N et 73°29'38,1" O. L'école est construite à côté du site de l'entreprise Eurovia Vinci qui exploite une carrière active et gère une carrière abandonnée.

L'école Carignan-Salières se situe dans la province géologique du bassin sédimentaire des Basse-Terres du Saint-Laurent qui repose en discordance sur le socle précambrien du Grenville (Bédard *et al.*, 2011a). Les différentes formations géologiques des Basse-Terres du Saint-Laurent se sont déposées dans un bassin de rift évoluant vers une marge

passive puis un bassin d'avant-pays qui représentent un cycle complet de transgression et régression marine (Comeau *et al.*, 2004, Globensky, 1987, St-Julien *et al.*, 1975, Lavoie *et al.*, 2003, Williams, 1979). Les interprétations de levés sismiques indiquent que le bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent et le socle précambrien du Grenville ont été affectés par une série de failles normales s'étendant du SO vers le NE et inclinés vers le SE (Castonguay *et al.*, 2010, Comeau *et al.*, 2013, Konstantinovskaya *et al.*, 2009, Séjourné *et al.*, 2003). Ces dernières ont été associées à un régime tectonique en extension durant la séparation du supercontinent Rodinia et l'ouverture de l'océan Iapetus au Protérozoïque-Cambrien précoce (Carrier *et al.*, 2013, Cawood *et al.*, 2001, Hibbard *et al.*, 2007, Rankin, 1976, Thomas, 2006). Ces failles normales ont été réactivées suite aux événements tectoniques successifs de la formation de l'orogène Appalachien (Globensky, 1987, Julien *et al.*, 1975, Lavoie, 1994, Lemieux *et al.*, 2003). Elles ont affecté les turbidites du Groupe de Lorraine (Séjourné *et al.*, 2003), sur lequel l'école Carignan-Salières est construite.

Les séries sédimentaires des Basses-Terres du Saint-Laurent peuvent montrer une épaisseur totale dépassant 3000 m à 5000 m à certains endroits (Globensky, 1987, Lavoie, 1994). Les unités stratigraphiques d'importance pour ce projet sont ici décrites de la base vers le sommet (Figure 6). Le Groupe de Lorraine est observé sur la rive sud du fleuve Saint-Laurent, là où l'école Carignan-Salières est située. Il est formé des formations de Nicolet et Pontgravé. La Formation de Nicolet est formée essentiellement d'alternances rythmiques de shale et de grès quartzeux et des calcaires gréseux vers le sommet. Ces derniers sont exploités dans les carrières d'Eurovia Vinci, près de l'école Carignan-Salières. Ils forment des lits continus ou des lentilles selon des chenaux à laminations parallèles entrecroisés témoignant d'un milieu marin profond (Konstantinovskaya *et al.*, 2010b). La Formation Pontgravé n'est pas observée près du site à l'étude puisque c'est la Formation de Nicolet qui affleure à cet endroit.

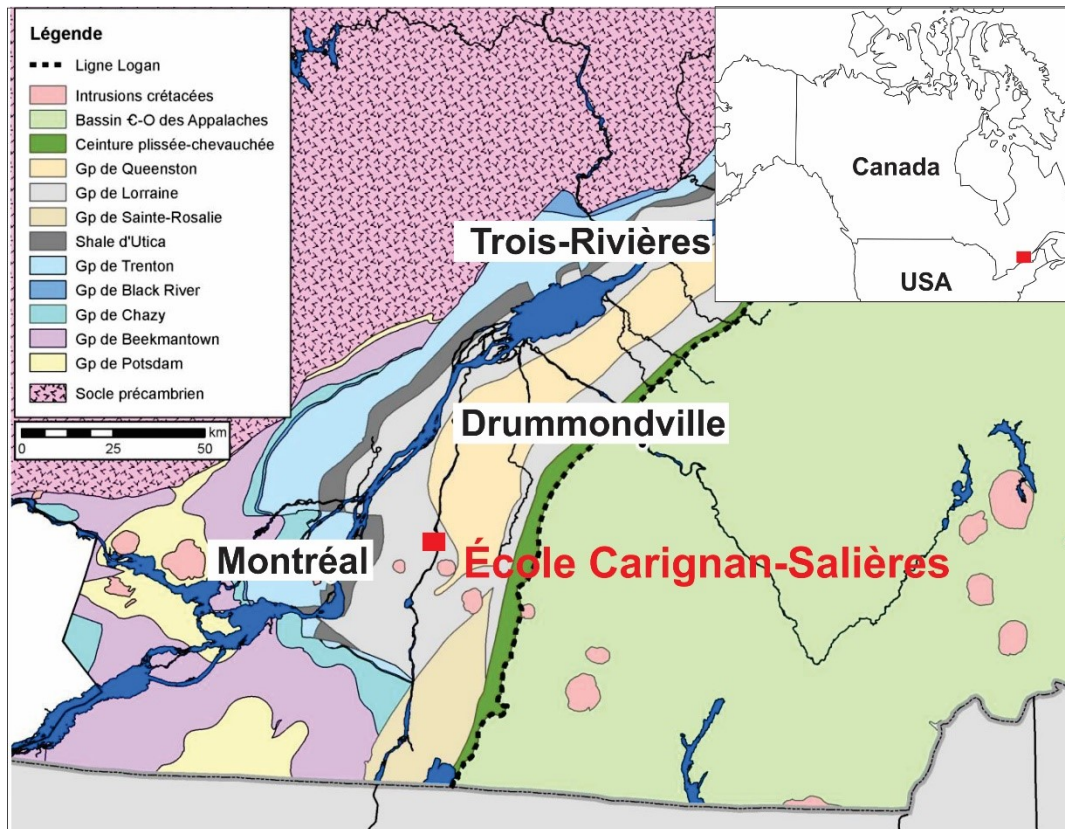


Figure 5. Carte géologique des Basses-Terres du Saint-Laurent et localisation de l'école Carignan-Salières (Comeau *et al.*, 2004, Globensky, 1987).

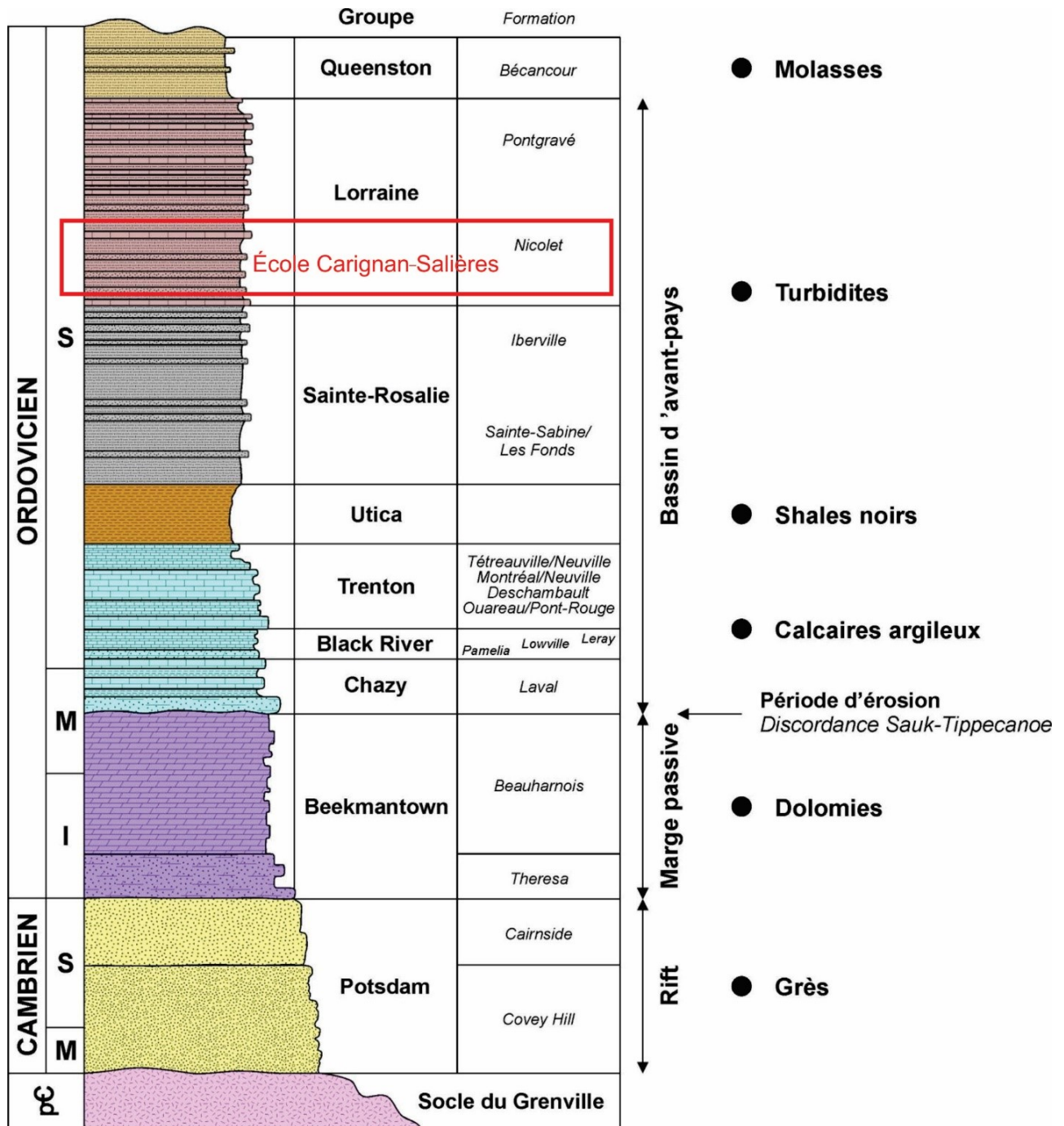


Figure 6. Colonne stratigraphique des Basses-Terres du Saint-Laurent (Comeau et al., 2004, Globensky, 1987).

II. Articles

1 PREMIER ARTICLE

PERFORMANCE EVALUATION OF A GROUND-COUPLED HEAT PUMP SYSTEM WITH A HEAT INJECTION TEST ANALYSIS

Titre traduit

Évaluation de la performance d'un système de pompes à chaleur couplées au sol selon l'analyse d'un test d'injection de chaleur

Auteurs

Nehed Jaziri¹, Jasmin Raymond¹ & Maxime Boisclair²

1- Centre Eau Terre Environnement – Institut national de la recherche scientifique, 490 de la Couronne, Québec, QC, Canada, G1K9A9

2- GBi, 17660, Mirabel, QC, Canada, J7J0C3

Publié

69th Canadian Geotechnical Conference – GeoVancouver, octobre 2016

Résumé

Les systèmes de pompes à chaleur géothermique offrent une meilleure efficacité énergétique et un faible coût d'opération par rapport aux systèmes de chauffage et de climatisation conventionnels. À l'école Carignan-Salières sur la Rive Sud de Montréal, un système géothermique à boucle fermée a été installé pour assurer le chauffage et la climatisation du bâtiment en opération depuis octobre 2013. Ce système est constitué par trente-et-un puits verticaux d'une profondeur d'environ 152 m. Les forages ont été remplis avec du sable d'olivine synthétique au lieu d'un coulis tel que prévu dans les plans de conception puisque les fines particules de coulis ont été lessivées par l'écoulement d'eau souterraine. Ce changement de matériaux de remplissage ainsi que les variations du régime d'écoulement d'eau souterraine pourraient avoir une influence sur les

performances du système à long terme. À l'aide d'un modèle calibré selon un test d'injection de chaleur réalisé sur l'ensemble du champ de puits, une étude a été effectuée dans le but de prédire la performance des échangeurs de chaleur et simuler numériquement la température de l'eau entrant dans les pompes à chaleur sur une période de vingt ans selon différents scénarios qui dépendent essentiellement des conductivités thermiques du sous-sol et des matériaux de remplissage. Les résultats ont montré que la conductivité thermique effective du sous-sol affectée par l'écoulement d'eau souterraine a plus d'impact sur la performance des échangeurs de chaleur que la conductivité thermique des matériaux de remplissage.

Abstract

Geothermal heat pump systems provide a better energy efficiency and a lower operating cost compared to conventional heating and cooling systems. Such a closed loop geothermal system was installed at the Carignan-Salières school on the south shore of the St-Lawrence River near Montreal to heat and cool the building in operation since October 2013. The system encloses thirty-one vertical ground heat exchangers having an approximate depth of 152 m. The boreholes were backfilled with synthetic olivine sand instead of a geothermal grout as specified in the design plans because the fine grout particles were washed out by groundwater flow. These changes in filling material and the variable groundwater flow setting can have an impact on the long-term performance of the system. A study was realized, using a model calibrated with a heat injection test conduct over the entire borehole field, to predict the performance of the ground heat exchangers and numerically simulate the water temperature entering the heat pumps for twenty years according to different scenarios, depending essentially on the thermal conductivity of the subsurface and the filling material. The simulation results have shown that the effective thermal conductivity of the subsurface affected by groundwater flow has a more important impact on the ground heat exchanger performance than the thermal conductivity of the filling material.

1.1 Introduction

Geothermal heating and cooling systems have increased in popularity in the institutional building sector. The Carignan-Salières Elementary School, located on the south shore of the St. Lawrence River near Montreal, is an example of such a building designed with a ground coupled heat pump system (GCHP). Thirty-one vertical ground heat exchangers (GHEs) equipped with a single U-pipe and fifty heat pumps distributed in the school building were installed in 2013.

The GCHP system of the school is located within a kilometer of two quarries, one of which is active and where groundwater is pumped. When grouting the GHEs upon installation, the fine particles of the grout mixture were lost in the subsurface and the boreholes could not be sealed. The boreholes have consequently been filled with olivine sand, which differed from the initial design, where it was planned to use thermally enhanced grout made of bentonite and quartz sand. This change in filling material and the varying groundwater conditions induced by the quarry operation may impact the GHE performances during the future operation of the heating and cooling system.

A heat injection test was carried out to evaluate the thermal response of the entire GHE field. The objective of this work was to evaluate the performance of the GCHP system affected by varying groundwater conditions. A simple modelling approach simulating conductive heat transfer in the subsurface and enclosing two secondary objectives was used as a first step. Those are to reproduce numerically the fluid temperature measurements recorded during the heat injection test by calibrating a model of the GCHP system, and then to predict the system operation over twenty years under different groundwater conditions affecting the effective thermal conductivity of the subsurface. This effective thermal conductivity is assumed to take into account advective heat transfer induced by groundwater flow. The development and calibration of a preliminary model for the GCHP system of the school building is described in this study. The subject links building to subsurface heat transfer processes and is believed to be of interest to geotechnical engineers involved in the construction industry.

1.2 Site Setting

The Carignan-Salières Elementary School is located in the city of Carignan, 24 km south of Montreal, and was built in 2013 above the Nicolet Formation in the St. Lawrence Lowlands sedimentary basin (Bédard *et al.*, 2011a, Brisebois *et al.*, 1994a). The Nicolet Formation belongs to the Lorraine Group and is constituted by sequences of fissile siliceous gray shale, mudstone and feldspathic sandstone. Calcareous sandstone marks the summit of the formation. The sediment beds of the Nicolet Formation are lens-shaped with a decreasing thickness toward the top depending on the presence of turbidity and channels, which are characteristics of a deep marine environment. The St. Lawrence Lowlands had been affected by a series of normal faults extending from southwest to northeast and tilted toward the southeast (Castonguay *et al.*, 2010, Konstantinovskaya *et al.*, 2010b, Séjourné *et al.*, 2003).

One of the two gravel quarries located beside the school is still in operation (Figure 1-1). During a visit to the site in July 2016, the water level was at the base of the active quarry located more than 3 m below the sea level while the inactive quarry was filled with water. The average hydraulic gradient between the two quarries was evaluated at 0.028 m m^{-1} , with the measurements of the water level in the two pits. The regional aquifer is confined and located in fractured rocks. The groundwater flow direction is oriented toward the west but may locally change due to pumping of water in the quarry. The annual net recharge of the aquifer is approximately 100 mm y^{-1} and the average hydraulic conductivity for the host rock is 10^{-5} m s^{-1} , varying from $10^{-6.5}$ to $10^{-3.8} \text{ m s}^{-1}$ (Carrier *et al.*, 2013).

Two thermal response tests (TRTs) were realized in different boreholes using a single GHE to measure the subsurface thermal conductivity. The first test was carried out before the geothermal borehole field installation on the 6th of September 2012. A subsurface thermal conductivity of $2.58 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ was identified (Leblanc, 2012). The second test, realized on the 3rd of June, 2013, after the installation of the borehole field with a different GHE, indicated a subsurface thermal conductivity of $2.27 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (Renaud, 2013). This difference between the two measured subsurface thermal conductivities may be due to varying groundwater flow conditions.

Carignan has a humid continental climate with an annual average temperature of 5.9 °C and an amplitude of 30 °C. This extended range of temperature requires heating and air conditioning for the school building.

The GCHP system has been in operation since October 2013 and has sufficient capacity to supply the entire heating and cooling loads of the building. The heating period is mostly from October to June while the cooling period is from July to September. The 31 vertical boreholes of the GCHP system are spaced by 6 m. Each borehole is 152.4 m deep (500 ft) and equipped with a single U-pipe made of high-density polyethylene. Omega (Ω) shaped spacers are used to separate the pipe legs. The boreholes were filled with olivine sand having a thermal conductivity of $1.75 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, which was measured in the laboratory (Côté *et al.*, 2012). The fifty heat pumps distributed in the building each have a net heating capacity of 2.9 to 33.6 kW (9.96 to 114.81 kbtu h⁻¹) and a net cooling capacity of 3.62 to 44.2 kW (12.38 to 150.81 kbtu h⁻¹).

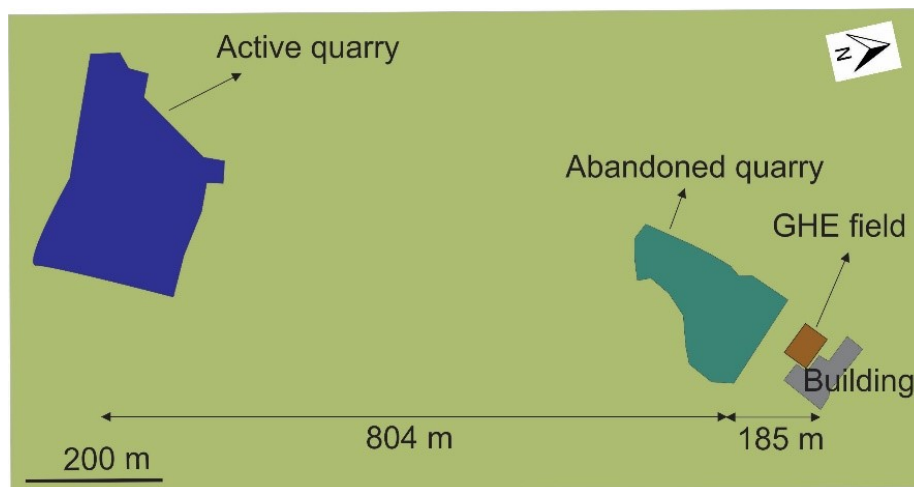


Figure 1-1. Location of the Carignan-Salières School building with respect to the surrounding quarries.

1.3 Methodology

1.3.1 Heat Injection Test

A heat injection test was realized during July 2015 to monitor the thermal response of the entire GHE field. The test was carried out by using the cooling system at its full capacity during hot summer days where windows had been opened for the outdoor heat to enter

the building. This resulted in the injection of heat in the GHE field at an average rate of 305 kW over 406 h. The cooling system of the building was then stopped and the heat carrier fluid was kept circulating in the GHE field to monitor the thermal recovery over 318 h. The temperature and the flow rate of the heat carrier fluid at the entrance and the exit of the GHE field were monitored during the test (Figure 1-2). The average heat injection rate was 9.8 kW per borehole and the average total flow rate was 39.3 L min⁻¹.

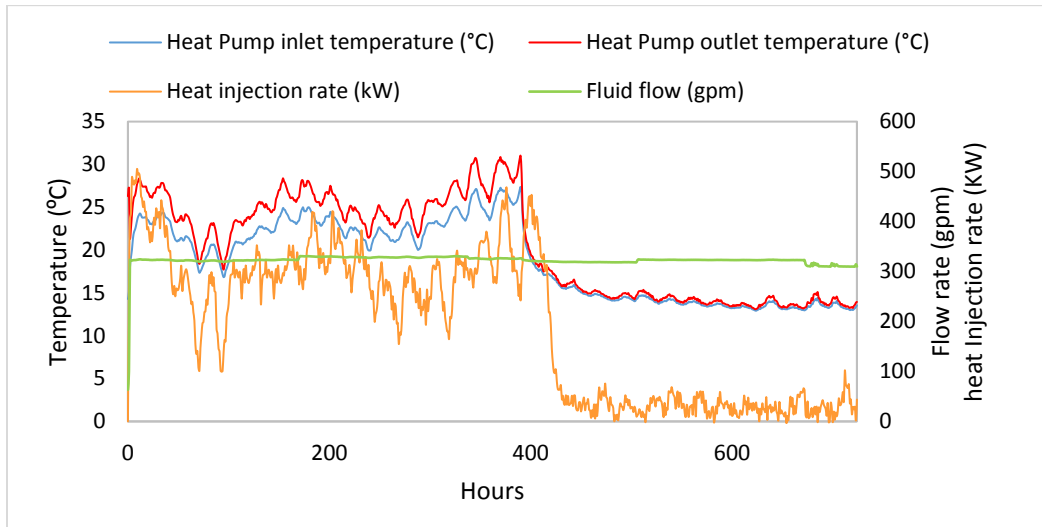


Figure 1-2. Fluid temperature and flow rate recorded during the heat injection test at the Carignan-Salières School.

1.3.2 GCHP simulation

Simulations of the Carignan-Salières GCHP system were first achieved to reproduce the temperature recorded during the heat injection test. The thermal properties of the subsurface and the borehole filling material were adjusted to calibrate the model. Subsequent simulations were performed to evaluate the impact of filling material properties and varying groundwater conditions on the long-term operation of the system to predict water temperatures.

The program Hybrid Ground Coupled Heat Pump (HyGCHP; Hackel *et al.*, 2011), which is a graphical interface to simulate GCHP systems with the Duct Ground Heat Storage (DST) model (Hellström, 1989) implemented in TRNSYS (Beckman *et al.*, 1994), was used in this study. The DST model involves the storage of heat in the ground and it allows the simulation of a large number of heat exchangers uniformly disposed to exchange heat

from the ground to the surface through a circulating heat carrier fluid. The model uses the finite difference method and solves heat transfer by conduction in cylindrical coordinates of a line source to reproduce the GHE field. The HyGCHP program utilized for this preliminary study cannot take into account advective heat transfer in the subsurface. An equivalent subsurface thermal conductivity having a higher value, as observed during thermal response tests influenced by groundwater flow (Bozdağ *et al.*, 2008), was used to mimic the effect of groundwater flow to dissipate heat or cold around the boreholes.

Hourly time steps were used for both the calibration and prediction simulations. Design parameters based on the installed GHE field and that were kept constant for all simulations are the drilling depth, the bore spacing, the header depth, the centre to centre half distance between the legs of the U-pipe, the borehole radius, the pipe size, the fluid type and the total GHE length (Table 1-1). The solution of water and 25 vol. % propylene glycol provides a freeze protection up to -9.62 °C in the GHE pipes.

Simulation of the water temperature entering the heat pumps during the heat injection test was achieved by imposing ground loads observed during the test, which were calculated with the measured temperatures and flow rate. Subsurface and borehole parameters remaining uncertain, which are the initial subsurface temperature, the thermal conductivity of the subsurface and the borehole filling material and the thermal diffusivity of the subsurface, were adjusted for simulated temperature to match observed temperature. A range of possible parameters were identified and used for long-term simulations to predict twenty years of operation. The unknown inputs for the subsurface thermal properties are assumed to reflect the varying groundwater conditions. The adjustment of the initial temperature is to account for a heat injection test that was performed during the cooling season of a system that has been operating for the past two years and likely changed the subsurface temperature.

Building loads determined hourly with an annual sum of heat gains and losses were used as an input for long-term simulations with HyGCHP under different scenarios. The heat pump nominal coefficient of performance (COP) in heating mode was 4.68 and the energy efficiency ratio (EER) in cooling mode was 14.11 for the long-term simulations. These two efficiency parameters were allowed to vary with the operating temperature of the water in

the GHE according to the performance curves specified in HyGCHP. The initial subsurface temperature was fixed to 11.5 °C for long-term simulations, which was determined according to the undisturbed temperature measured with the TRT in 2012 before the installation of the system. The beginning of operation simulations was October 2013, when the system was commissioned. Thermal conductivities of the subsurface and the filling material were varied to predict the long-term GHEs' performance under pessimistic and optimistic conditions according to constrain identified with the calibration simulations.

The Carignan-Salières School is classified as a medium-power customer for Hydro-Québec, the electricity distributor in the area. The school demands 50 kW or more at least once every year. The rate is 0.493 \$/kWh for the first 210 000 kWh, then 0.366 \$ (kWh)⁻¹ for the remaining consumption and a demand charge of 14.37 \$ kW⁻¹ (<http://www.hydroquebec.com/business/rates-and-billing/rates/electricity-rates-business-customers/rate-m/>). In the HyGCHP model, a rate of only 0.493 \$ kWh⁻¹ was considered because the monthly energy use of the school is not expected to exceed 210 000 kWh, considering the simulated loads. Simulation of a conventional heating and cooling system with a gas boiler and a dry cooling tower for the school building was considered for comparison purposes. A gas price of 7.58 \$ GJ⁻¹ was considered in that case.

Table 1-1. Constant GHE parameters used for all simulations with HyGCHP.

GHE Parameter	Value
Drilling depth	152.4 m
Bore spacing	6 m
Header depth	1.8 m
Centre to centre half distance	0.038 m
Borehole radius	0.076 m
Pipe size	32 mm (1.25")
Fluid type	Propylene glycol 25 vol. %
Total length	4114 m

1.3.3 Building load simulation

The building loads used as an input to simulate the long-term operation of the geothermal system at Carignan-Salières School with HyGCHP, were evaluated with the program

eQuest/DOE2 (Hirsch, 2004). This program sums heat gains and losses on an hourly basis according to the dimensions of the building, the insulation material, the interior and exterior construction material and the operation schedule. The geographic location, the orientation and the regional climate are also taken into account. The Granby meteorological station was chosen to represent the Carignan City annual temperatures because of its proximity. The eQuest simulation allowed quantifying hourly energy consumption for heating and cooling the school building over 8760 hours.

1.4 Results

1.4.1 Simulation of the heat injection test and calibration of the model

Water temperature measured at the exit of the GHE field or entering the heat pumps was at best reproduced within an average error of 1 % using HyGCHP (Figure 1-2). The range of unknown parameters, which are the thermal conductivity, diffusivity and initial temperature of the subsurface and the thermal conductivity of the filling material, were manually adjusted one at a time for the entering water temperature to have a maximum error of 15 % during the calibration simulations (Table 1-2). The thermal conductivity and diffusivity of the subsurface were linked according to its formula $\left(\alpha = \frac{\lambda}{\rho c}\right)$ and assuming a volumetric heat capacity equal to 2.15 MJ m³ K⁻¹.

As mentioned above, the boreholes were filled with olivine sand instead of a conventional grout made with bentonite and quartz sand. According to the design plans, the thermal conductivity of the thermally enhance grout should have been 1.64 W m⁻¹ K⁻¹. The calibration simulations indicated a filling material thermal conductivity that can possibly vary from 1.5 to 1.85 W m⁻¹ K⁻¹. The modification of filling material composition during the installation of the system has not significantly changed the thermal conductivity anticipated when designing the system. The range of thermal conductivity of the subsurface is within the results of both thermal response tests.

Table 1-2. Range of subsurface and borehole parameters identified with calibration simulations.

Calibration parameter	Value range	Best fit value
Subsurface temperature (°C)	10.5 – 12.0	11.5
Subsurface thermal conductivity ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	2.20 – 2.60	2.3
Subsurface thermal diffusivity ($\text{m}^2 \text{d}^{-1}$)	0.092 – 0.110	0.106
Filling material thermal conductivity ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	1.50 – 1.85	1.5

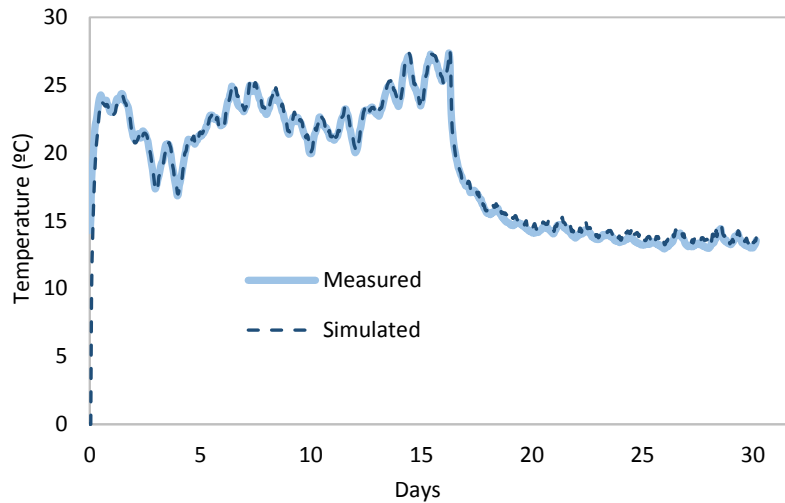


Figure 1-3. Measured and simulated water temperature entering the heat pumps.

1.4.2 Long term simulations of the GCHPs operation

Building simulations with eQuest revealed that the Carignan-Salières School has a total annual heating load of -1.71×10^5 kWh and a total annual cooling load of 1.19×10^5 kWh (Figure 1-4). The peak heating load occurred on January 16th and its magnitude was 494 kW, while the peak cooling load was on July 17th and its magnitude was 253 kW.

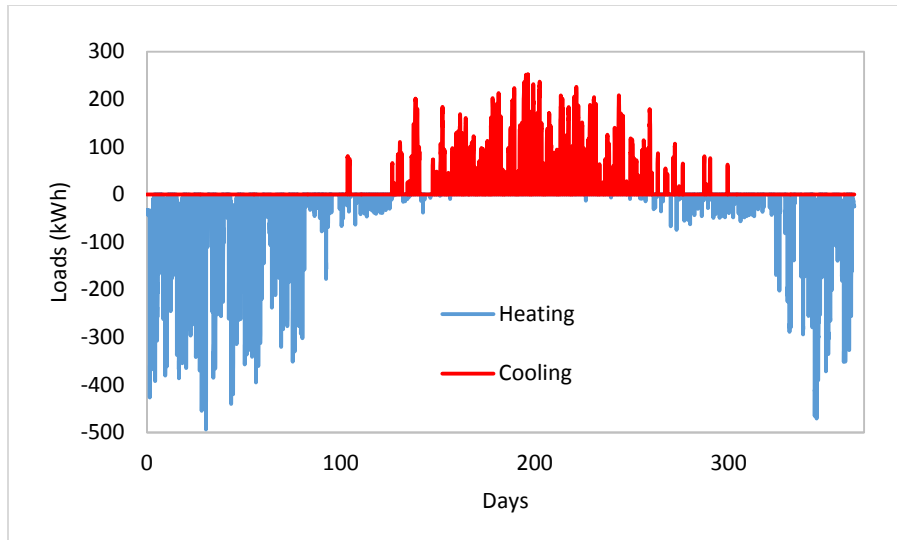


Figure 1-4. Heating and cooling loads for the Carignan-Salières School building.

Seven different scenarios were considered for long-term simulations (Table 1-3). The first scenario is the base case, where the filling material thermal conductivity is that measured in the laboratory (Côté *et al.*, 2012) and the subsurface thermal conductivity is close to that of the first TRT and the best fit value inferred with the calibration simulations. The second scenario is pessimistic and has the lowest possible values for the thermal conductivity of both the subsurface and the filling material. The third scenario is optimistic, and has the best possible values for these physical parameters. An effective subsurface thermal conductivity up to $3 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ has been considered for a case with strong groundwater flow. Scenarios four to seven are intermediate cases that have been used to evaluate separately the impact of the subsurface and filling material thermal conductivities.

According to the results for the base case scenario, the water temperature varies from less than $-5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ to more than $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ during the twenty years of simulation (Figure 1-5a). There is a continuous decreasing temperature since heating loads are greater than cooling loads. The water temperature leaving the GHE field becomes critical in the final eight years since it drops below $-5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ and begins to be close to the system minimum operation temperature that is equal to $-9.62 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

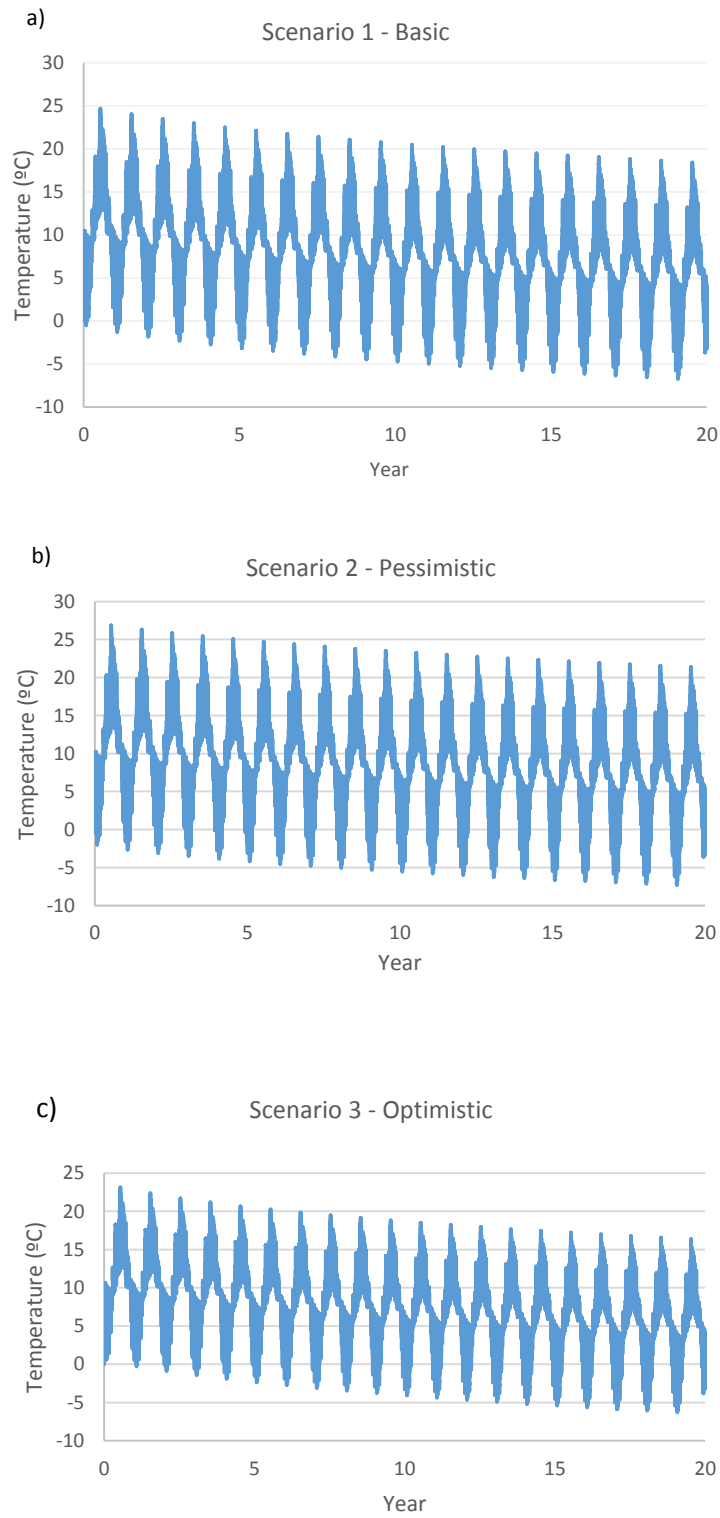


Figure 1-5. Simulated water temperature at the entrance of the heat pumps for twenty years of operation under a) the basic, b) the pessimistic and c) the optimistic scenarios.

The pessimistic scenario indicated a maximum water temperature declining from about 27.0 °C to 25.0 °C and a minimum water temperature declining from -2.8 °C to -8.0 °C, approximately (Figure 1-5b). The water temperature reached a value below -5 °C for the last twelve years.

The optimistic scenario showed the same trend, with decreasing water temperature, but it indicated higher maximums and minimums (Figure 1-5c). In the first year, the maximum water temperature leaving the GHE field is 23.1 °C and the minimum is 2.0 °C. A water temperature below -5 °C only occurs for the last six years.

The seven simulated scenarios indicate different total energy consumption for the twenty years of operation, which has been expressed as a percentage of energy saved when compared to a system using a gas boiler and an air-cooling tower (Table 1-3).

The optimistic scenario allowed reducing energy cost by 50.53 % compared to 47.50 % for the pessimistic scenario, when considering a system with a gas boiler and a dry cooling tower. The simulation results for scenarios 4 and 5 with varying thermal conductivity of the filling material showed a percentage of saved energy differing by only 0.41 %. This indicates a small impact of the filling material thermal conductivity on the operation of the system. The simulation results for scenarios 6 and 7 with varying subsurface thermal conductivity indicated a larger difference in percentage of saved energy near 2.6 %. The thermal conductivity of the subsurface has a more important impact on GHE performance and the system energy saving when compared to the thermal conductivity of the filling material of the previous cases.

Table 1-3. Scenarios used for GCHP simulations and saved energy.

	Subsurface thermal diffusivity (m ² d ⁻¹)	Subsurface thermal conductivity (W m ⁻¹ K ⁻¹)	Filling material thermal conductivity (W m ⁻¹ K ⁻¹)	Saved energy (%)
Scenario 1 - basic	0.116	2.5	1.75	49.37
Scenario 2 - pessimistic	0.093	2.0	1.65	47.50
Scenario 3 - optimistic	0.139	3.0	1.85	50.53
Scenario 4 - intermediate	0.116	2.5	1.60	49.00
Scenario 5 - intermediate	0.116	2.5	1.80	49.41
Scenario 6 - intermediate	0.093	2.0	1.75	47.71
Scenario 7 - intermediate	0.139	3.0	1.75	50.35

1.5 Conclusions

The operation of the GCHP system at Carignan-Salières School was simulated over twenty years with a heat conduction model using the DST approach and calibrated according to a heat injection test to evaluate the global response of the GHE field. The heat injection test, similar to a TRT but performed on the whole borehole field with the operating system, allowed to evaluate the short-term response and infer the possible subsurface and filling material thermal conductivities that can reproduce the water temperature leaving the GHE field. Unknown parameters were manually adjusted with a model developed using the program HyGCHP.

The calibration and operating temperature simulations showed that the filling material thermal conductivity has a small impact on the geothermal system performance when compared to the thermal conductivity of the subsurface.

The effective value used for the subsurface thermal conductivity in this modelling exercise is thought to be influenced by groundwater flow since the school is located within less than one kilometer from an active quarry. Water pumping in the quarry can impact the ability of the subsurface to dissipate thermal energy and consequently, the operating

temperature of the GHE field affecting to a lesser extent, the energy savings provided by the GCHP system. However, the modelling approach used in this preliminary study, for which an effective subsurface thermal conductivity mimics the effect of groundwater flow, cannot take into account the flow direction that can impact the propagation of heat or cold around the borehole field. Subsequent work will consequently be carried out to better evaluate the impact of groundwater flow.

A detailed field characterization is required to infer the groundwater conditions at the site and develop a GCHP model for the school building that can directly take into account advective heat transfer in the subsurface. The following steps are recommended to better assess the long-term performance of the Carignan-Salières GCHP system under varying groundwater flow conditions. A conceptual model of the borehole field should be initially developed, considering hydraulic and thermal characteristics of the geological units. The thermal conductivity could be measured on rocks sampled in the quarries. An advanced numerical model of the GHE system including convective heat transfer in the subsurface may then help to improve the performance and energy saving predictions that will be more representative of the operating environment of the GCHP system. The heat injection test can still be used to calibrate the model for subsequent long term simulations, similarly to the work presented in this manuscript. The heat injection test performed on the whole borehole field, typically carried out with a single GHE through a TRT, is a new approach to evaluate the global response of the GCHP system to ensure quality control of the installations.

2 DEUXIÈME ARTICLE

LONG-TERM EVALUATION OF THE OPERATING TEMPERATURE IN A LARGE-SCALE GROUND-COUPLED HEAT PUMP SYSTEM UNDER VARIABLE GROUND WATER FLOW CONDITIONS

Titre traduit :

Évaluation à long terme de la température d'opération d'un système à grande échelle de pompes à chaleur couplées au sol soumis à des conditions variables d'écoulement d'eau souterraine.

Auteurs

Nehed Jaziri¹, Jasmin Raymond¹, John Molson², Nicolò Giordano³

Article en vue de soumettre après l'évaluation du mémoire.

Abstract

A ground-coupled heat pump system has been installed at the Carignan-Salières elementary school located on the south shore of the St. Lawrence River near Montreal. The school is located near two quarries, one of which has water pumped irregularly to maintain dry working conditions. The heat pump system consists of thirty-one vertical ground heat exchangers (GHE), backfilled with olivine sand, coupled to fifty distributed heat pumps, and has been in operation since October 2013 for heating and cooling the school building. Pumping of water in the quarry induces variable groundwater flow conditions that can affect the GHE operating temperature and the system performance. The school operator has no control on the groundwater flow conditions and the quarry may stop pumping water in the future. A heat injection test was first carried out to evaluate the thermal response of the entire GHE field. Then, a numerical model was developed to predict and evaluate the long-term GHE operating temperature. Heat injection test results were used to calibrate the numerical model. Geological field investigations and laboratory measurements of thermal conductivity of rock samples were carried out to characterize

the subsurface with respect to thermal and hydrogeological parameters. Eight different scenarios were simulated to evaluate the impact of the main physical parameters affecting the system operating temperature, which are the thermal conductivity of the filling material, the thermal conductivity of the subsurface and the hydraulic gradient. The main purpose was to separately evaluate the impact of each parameter on the ground thermal response. Results have shown a small impact of the filling material thermal conductivity while the ground thermal conductivity had a more significant influence on the inlet and outlet temperature of the heat carrier fluid. However, the imposed hydraulic gradient has the greatest impact on operating temperature of the ground heat exchangers, which means that GHE performance is mostly dependent on the state of water pumping in the quarry. Constant water pumping in the active quarry will ensure a reliable performance of the GHE system at the Carignan-Salières elementary school.

Résumé

Un système de pompes à chaleur à boucle fermée a été installé à l'école de Carignan-Salières localisé sur la rive sud du fleuve Saint-Laurent près de Montréal. L'école est située à côté de deux carrières dont l'eau est pompée de façon irrégulière de l'une d'entre elles afin de maintenir des conditions de travail sèches. Le système de pompes à chaleur est constitué de trente-et-un forages géothermiques remblayés avec du sable d'olivine et couplés à une cinquantaine de pompes à chaleur en opération depuis octobre 2013 pour chauffer et climatiser le bâtiment de l'école. Le pompage de l'eau dans la carrière induit des conditions variables d'écoulement d'eau souterraine, ce qui peut affecter la température d'opération des échangeurs de chaleur donc la performance du système. L'opérateur de l'école n'a pas de contrôle sur les conditions d'écoulement souterrain et le pompage de l'eau dans la carrière pourrait être arrêté dans le futur. Un test d'injection de chaleur a été premièrement réalisé afin d'évaluer la réponse thermique de tout le champ de forages géothermiques. Ensuite, un modèle numérique a été développé dans le but de prédire et évaluer la température d'opération des échangeurs de chaleur à long terme. Les résultats du test d'injection de chaleur ont été utilisés pour la calibration du modèle. Des travaux de terrain et des mesures en laboratoire de la conductivité thermique d'échantillons de roche ont été réalisés pour la caractérisation de la sous-surface face à l'évaluation des paramètres thermo-hydrauliques. Huit différents scénarios

ont été simulés pour évaluer l'impact des paramètres physiques affectant la température d'opération du système, soit la conductivité thermique des matériaux de remplissage et de la sous-surface ainsi que le gradient hydraulique. Le but est d'évaluer séparément l'impact de chaque paramètre sur la réponse thermique du sous-sol. Les résultats ont montré que la conductivité thermique des matériaux de remplissage a un impact mineur alors que la conductivité thermique de la sous-surface a un impact plus significatif sur la température du fluide caloporteur à l'entrée et à la sortie des échangeurs de chaleur. Cependant, le gradient hydraulique imposé a l'impact le plus important sur la température d'opération, ce qui signifie que la performance des échangeurs de chaleur dépend du pompage de l'eau dans la carrière active. Un pompage constant de l'eau de la carrière active assurera une performance adéquate du système de pompes à chaleur géothermique de l'école Carignan-Salières.

2.1 Introduction

Groundwater flow can have a significant impact on the long-term performance of ground heat exchangers (GHE), especially when the Darcy flux is greater than $1 \times 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$ (Dehkordi *et al.*, 2014, Ferguson, 2015). Flow in the heterogeneous subsurface can actually improve heat exchange rates with the subsurface by dissipating heat injected into or extracted from the ground. Design of ground-coupled heat pump (GCHP) systems are, however, commonly based on the assumption of conductive heat transfer in the subsurface. Accurate prediction of GCHP system performance subject to groundwater flow remains problematic when systems are designed assuming thermal conduction only. Practitioners often assume that system performance can be better than expected when there is significant groundwater flow but neglect the fact that flow conditions may change. The Carignan-Salières elementary school is an example of such a building, which is heated and cooled with a GCHP system operating under varying groundwater flow conditions because of its location within a kilometer of two quarries, one of which is actively being dewatered. In addition, upon installation, the GHEs were backfilled with sand instead of using a geothermal grout because of significant groundwater flow, which is assumed to have dispersed the fine grout particles in the fractures of the geological

formations. This change of filling material from the initial design plans and the variable groundwater flow conditions are anticipated to affect the long-term performance of the GHEs. The objective of this study was, therefore, to better understand the effect of groundwater flow on the long-term operating temperature of the GHE to anticipate potential operational problems. Previous studies have been conducted to evaluate the impact of groundwater flow on the operating temperature of GHEs (Barla *et al.*, 2015, Bauer *et al.*, 2009, Trefry *et al.*, 2007), but most are based on theoretical modelling exercises and have not been validated with operational data of systems being used under significant groundwater flow conditions.

Numerical simulation of a GHE operation calibrated with a large-scale heat injection test was carried out in this study to evaluate the temperature of the heat carrier fluid circulating in the bore field. Long-term simulations of the system temperature under different field-based scenarios were subsequently carried out for a period of 20 years. A comparison between the simulation scenarios allowed a quantitative evaluation of the ground parameters affecting the system performance including the site hydraulic gradient.

2.2 Description of the site

The Carignan-Salières elementary school is located on the south shore of the St. Lawrence River near Montreal (Figure 2-1) and was built above the Nicolet Formation in the St. Lawrence Lowlands sedimentary basin (Bédard *et al.*, 2011a, Brisebois *et al.*, 1994a). From a structural perspective, the St. Lawrence Lowlands are characterized by a series of normal faults extending from the southwest to the northeast, and which dip toward the southeast (Castonguay *et al.*, 2010, Konstantinovskaya *et al.*, 2010a, Séjourné *et al.*, 2003). The Nicolet Formation belongs to the Lorraine Group. The numerical model of the GHEs field at the school was developed according to geological field observations.

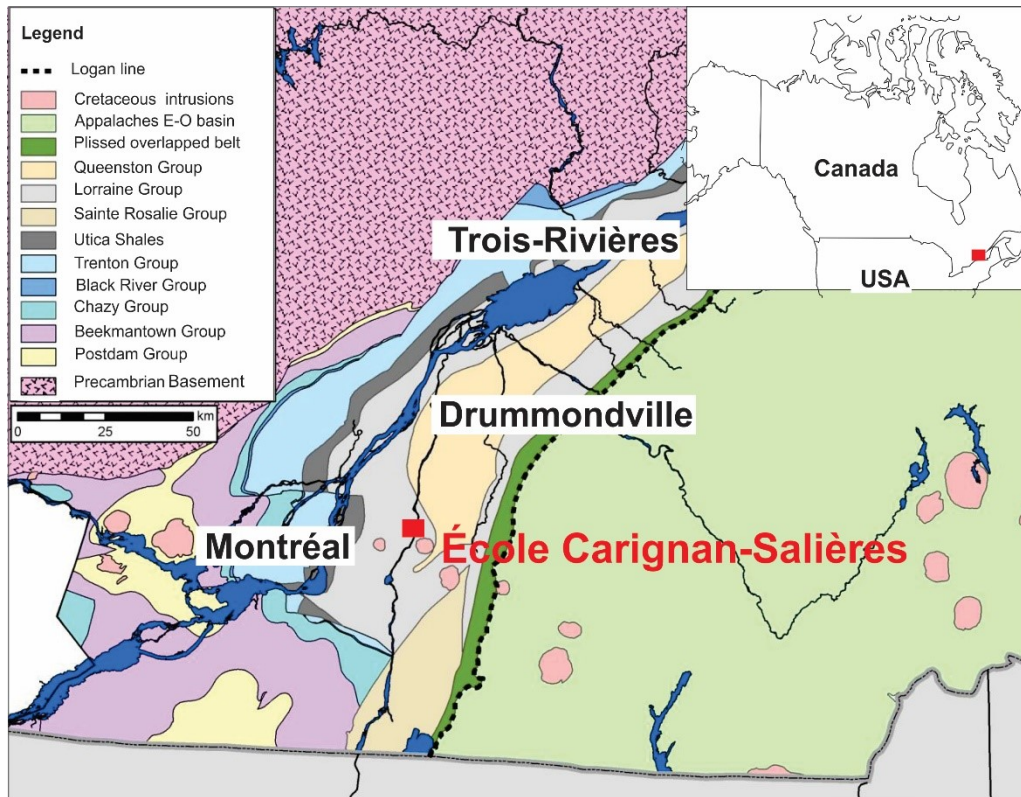


Figure 2-1. Geological map of the area showing the position of the Carignan-Salières elementary school (Bédard *et al.*, 2016).

2.2.1 Geological and hydrogeological setting

The Nicolet Formation, hosting the school GHE field, consists of sequences of gray shales, mudstones and sandstones and belongs to the Lorraine Group. The sedimentary layers are lens-shaped with a decreasing thickness toward the top according to the presence of turbidity and channels. This Nicolet Formation is in fact characteristic of a deep marine environment. Gabbro dykes, which are observed in the school area, are oriented EW and cut the stratigraphic sequences (Currie, 1987, Foland *et al.*, 1986, Foster *et al.*, 1979). Most of the dykes are sub-vertical and have a varying thickness from 0.5 to more than 20 m (Hodgson, 1969).

One of the two quarries near the school is currently active and water is pumped irregularly (Figure 2-2). Regional aquifers in this area of the south shore of the St. Lawrence River are believed to be hosted in fractured rocks. The direction of the regional groundwater flow is oriented toward the west (Carrier *et al.*, 2013), but is believed to be locally deviated near the active quarry. The average hydraulic conductivity of the host rock reported in the

area is 10^{-5} m s^{-1} , varying from $10^{-6.5}$ to $10^{-3.8} \text{ m s}^{-1}$ and the annual net recharge of the aquifer is approximately 100 mm y^{-1} (Carrier *et al.*, 2013).

The town of Carignan has a humid continental climate with an annual average air temperature of $5.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ and an amplitude of $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (Environment Canada, 2015). The heating period is mostly from October to June while the cooling period is from July to September.



Figure 2-2. Satellite image of the Carignan-Salières school building and neighbouring quarries.

2.2.2 Ground Heat Exchangers Field characteristics

The Carignan-Salières GCHP system consists of thirty-one GHEs connected to fifty heat pumps distributed in the school building. Each heat pump has a net heating capacity of 3.62 to 44.2 kW (12.38 to $150.81 \text{ kbtu h}^{-1}$). The system has sufficient capacity to supply the entire heating and cooling loads of the building.

The GHEs are spaced by 6 m and each borehole is $\sim 152 \text{ m}$ deep (Figure 2-3). A high-density polyethylene single U-pipe with omega-shaped spacers constitutes the GHEs. During the installation, the boreholes could not be sealed with grout because flow along the intersecting fractures flushed the fine particles from the grout mixture. The boreholes were consequently filled with olivine sand instead of a common thermally enhanced grout made of bentonite and sand. The olivine sand has a thermal conductivity of $1.75 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$, a value that was measured in the laboratory during a previous study (Côté *et al.*, 2012).

The heat carrier fluid is a mixture of water and propylene glycol at 25 vol. % and circulates in the closed loops with an average flow rate of $1016.61 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ within the entire GHE field. Two thermal response tests (TRT) were carried out in different boreholes, by injecting heat in order to evaluate in situ the thermal conductivity of the subsurface. The first TRT was carried out before the GHE installation and revealed a bulk subsurface thermal conductivity of $2.58 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (Leblanc, 2012). The second TRT was conducted after the GHE installation and indicated a lower value of $2.27 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (Renaud, 2013). The difference between the two tests can be due to water pumping in the neighbouring and active quarry, inducing changes in the groundwater flow regime near the school.

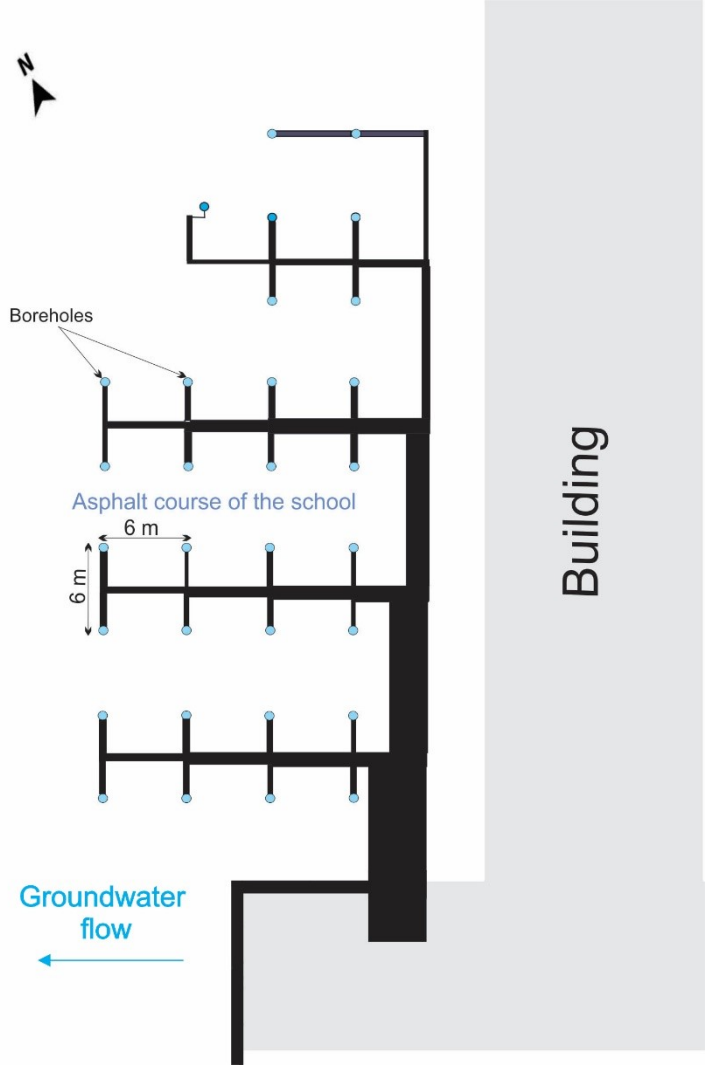


Figure 2-3. GHE field of the Carignan-Salières elementary school.

2.3 Methodology

2.3.1 Field work

Several field activities have been undertaken to evaluate the thermal conductivity of the subsurface and the groundwater flow conditions near the school site. The two quarries close to the school building were investigated and the main geological units outcropping in the quarries were described to identify facies and depositional environments. Twelve rock samples were collected in the quarries to evaluate their thermal conductivity in the laboratory. Six samples of dark and light shales and one calcarenite belonging to the Nicolet Formation of the Lorraine Group, as well as five gabbro dyke samples, were taken from outcropping surfaces of the active quarry. Water levels in the two quarry lakes were measured with a GPS antenna to evaluate the local hydraulic gradient.

2.3.1.1 Laboratory measurement of thermal conductivity

Thermal conductivity is a physical property describing heat conduction at equilibrium. It defines the amount of heat flowing across a unitary section per unit of temperature gradient (Clauser, 2014). The thermal conductivity measurements were made with two different methods: (1) a needle probe for hard rocks and (2) the modified transient plane source (MTPS) method for friable rocks. The KD2 Pro unit (Decagon Services, 2016), part of a standardized method under the ASTM D5334 norm, was used for the needle probe analysis with gabbro samples, while the C-Therm heating plate was used for the MTPS analysis with calcarenites and shales (C-Therm technologies, 2016). The samples were immersed for 24 h in distilled water before making the measurements to saturate the samples and obtain a value representative of subsurface conditions.

The needle probe encloses a single temperature sensor in the centre and allows a maximum heat injection rate of 6 W m^{-1} (Decagon Services, 2016). The samples were cut and a hole was drilled in each sample to insert the 6 cm long and 4 mm thick RK-1 needle, which was covered with thermal grease to reduce contact resistance. After completing a measurement with a reference polyethylene sample, each rock sample was analysed in a controlled temperature room with at least ten measurements, spaced by 1h for thermal equilibrium to be restored. A correction factor $C [-]$ was calculated as a function of the

thermal conductivity of the reference polyethylene sample. The correction factor can be written as (Decagon Services, 2016):

$$C = \frac{\lambda_{\text{rock}} - \lambda_{\text{reference}}}{\lambda_{\text{reference}}} \quad (1)$$

where λ_{rock} [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$] and $\lambda_{\text{reference}}$ are the thermal conductivity of the rock and the reference samples, respectively. The correction factor was then applied to all rock sample measurements as follows:

$$\lambda_{\text{rock-corrected}} = \lambda_{\text{rock}} \times (1 - C) \quad (2)$$

A polished rock surface of the soft rock samples was placed on the heating plate to evaluate its thermal conductivity according to the increase of temperature in a transient regime with the MTPS method, which follows the ASTM D7984 norm. The heating plate has a disk shape and the electric signal used for the heat source serves as a proxy for temperature. Thermal conductivity is determined by analyzing the temporal evolution of tension between the electrical resistance terminals of the thermostat (C-Therm technologies, 2016). The measurement pulse is between 0.8 to 3 seconds, with a heat injection rate equal to 6 W m^{-1} . Thermal conductivity of each sample was measured five times and an average was then calculated to obtain the final value.

2.3.1.2 In situ heat injection test

A heat injection test was carried out in July 2015 to evaluate the thermal response of the entire GHE field. The test was carried out during hot summer days by using the cooling system at its full capacity while the school windows had been opened to allow the outdoor heat to enter the building. The cooling system was then stopped and the heat carrier fluid was kept circulating in the loop to monitor the thermal recovery. The flow rate of the heat carrier fluid and the temperature at the inlet and outlet of the entire GHE field were measured during the test by using the temperature sensors and flowmeters installed in the mechanical room of the GCHP system. The temperature sensors have an accuracy of $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ and the flowmeters have an accuracy of $\pm 1.5 \%$ of the readings. The instruments allowed taking measurements every 30 seconds. The heat injection rate was calculated from the field measurements with:

$$P = q'(T_{in} - T_{out})\rho_f c_f \quad (3)$$

where P [W] is the heat injection rate, q' [$m^3 s^{-1}$] is the flow rate, T_{in} [$^{\circ}C$] and T_{out} [$^{\circ}C$] are the GHE inlet and outlet temperature, respectively, and ρ_f [$kg m^{-3}$] and c_f [$J kg^{-1} K^{-1}$] are the density and specific heat of the heat carrier fluid, respectively.

2.3.1.3 Building and ground load simulation

The school building loads were simulated using eQuest, a graphical interface for the DOE-2 program (Hirsch, 2004). These simulations were used to establish a thermal energy budget of the building, which depends essentially on the building dimensions, the construction and insulation materials, the size and number of windows and doors, the operation schedule as well as the internal and external temperature. Heat losses and gains of the indoor spaces were evaluated hourly to determine heating and cooling loads every hour over a full year. Simulated building loads, used as inputs in FEFLOW, were converted to ground loads according to:

$$P_{ground} = P_{building} \frac{COP_{heating} - 1}{COP_{heating}} \quad (4)$$

$$P_{ground} = P_{building} \frac{COP_{cooling} + 1}{COP_{cooling}} \quad (5)$$

where P_{ground} [W] and $P_{building}$ are the loads for the ground and the building, respectively, and $COP_{heating}$ [-] and $COP_{cooling}$ are the heat pump coefficient of performance in heating and cooling mode. An average and constant COP for all heat pumps of the building throughout the simulation time was assumed in this case.

2.4 GCHP System simulation

Numerical simulations to calibrate the model using the short-term heat injection test and to subsequently to evaluate the long-term operating temperatures of the GHEs over 20 years was carried out with the finite element program FEFLOW (Diersch, 2014). This

program was used because it allows transient heat transfer and groundwater flow modelling in 3D porous media hosting GHEs embedded as 1D elements. A general iterative finite element strategy is used to solve the overall flow and heat transfer problem coupling the ground with the GHEs (Diersch *et al.*, 2010). The numerical approach of Eskilson *et al.* (1988), which represents GHEs with equivalent resistances, was selected instead of the more general numerical approach of Al-Khoury *et al.* (2005; 2006); both being available in FEFLOW. This choice was made because the Eskilson approach takes less computational effort and was demonstrated to be accurate for long-term predictions (Diersch *et al.*, 2011).

2.4.1 Governing equations

The global fluid flow and heat transfer problem is solved in the form of fluid mass and thermal energy balances for the subsurface (s) and the groundwater (gw). The flow equation is described by (Diersch *et al.*, 2010):

$$S_s \frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q + Q_{\text{EOB}} \quad (6)$$

where S_s [m^{-1}] is the specific storage coefficient, h [m] is the hydraulic head, Q [m^3] is the source/sink term for flow and EOB refers to the Extended Oberbeck-Boussineq approximation. In equation 7, \mathbf{q} [m s^{-1}] is the Darcy flux in the porous medium and is expressed with Darcy's law:

$$\mathbf{q} = -\mathbf{K}(\nabla h) \quad (7)$$

where \mathbf{K} [m s^{-1}] is the hydraulic conductivity tensor. The heat transport equation with conductive and advective terms is described by (Rühaak *et al.*, 2010):

$$(\rho c)_s \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T - (\rho c)_{\text{gw}} \mathbf{q} T) + H \quad (9)$$

where λ [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$] is the thermal conductivity, ρc [$\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$] is the volumetric heat capacity and H [W m^{-3}] represents in this case heat sources and sinks that can be, for example, tied to GHEs.

The GHE equations used in the present model apply for single U-pipe heat exchangers, that, according to the thermal resistance and capacity model of Bauer *et al.* (2011), consist of four components, namely an in-pipe denoted with subscript il, an out-pipe with subscript ol and two filling material zones (grout) with exponent or subscript g (Diersch *et al.*, 2010), and can be written as:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho^r c^r T_{il}) + \nabla \cdot (\rho^r c^r \mathbf{u} T_{il}) - \nabla \cdot (\lambda^r \cdot \nabla T_{il}) = H_{il} \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho^r c^r T_{ol}) + \nabla \cdot (\rho^r c^r \mathbf{u} T_{ol}) - \nabla \cdot (\lambda^r \cdot \nabla T_{ol}) = H_{ol} \quad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_g \rho^g c^g T_{g1}) - \nabla \cdot (\varepsilon_g \lambda^g \nabla T_{g1}) = H_{g1} \quad (12)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_g \rho^g c^g T_{g2}) - \nabla \cdot (\varepsilon_g \lambda^g \nabla T_{g2}) = H_{g2} \quad (13)$$

where ρ [kg m⁻³] and c [J m⁻³ K⁻¹] are the density and the heat capacity of the heat carrier fluid r and grout g , T [K] is the pipe temperature, H [W m⁻³] is the thermal sink or source term, \mathbf{u} [m s⁻¹] is the vector of the heat carrier fluid velocity, λ^r [W m⁻² K⁻¹] is the tensor of thermal hydrodynamic dispersion for the heat carrier fluid, λ^g [W m⁻¹ K⁻¹] is the thermal conductivity of the grout and ε [-] is the volume fraction of grout. The relations are used to express the heat exchange between the 1U borehole and the subsurface.

The effect of the 1U components are lumped into effective heat transfer coefficients, which represent the sum of thermal resistances between the different components of the GHE elements (Diersch *et al.*, 2010). The following formulation is derived, with the analogy between Ohm's law for electric current and Fourier's law for heat transfer, to gather the effect of each GHE constituent to a unique effective coefficient. .

$$\phi_{fig}^{1U} = \frac{1}{R_{fig}^{1U}} \frac{1}{S_i} \quad \text{where} \quad S_i = \pi d_{il}^i \quad (14)$$

$$\phi_{fog}^{1U} = \frac{1}{R_{fog}^{1U}} \frac{1}{S_o} \quad \text{where} \quad S_o = \pi d_{oi}^i \quad (15)$$

$$\phi_{gg}^{1U} = \frac{1}{R_{gg}^{1U}} \frac{1}{S_{g1}} \quad \text{where} \quad S_{g1} = D \quad (16)$$

$$\phi_{gs}^{1U} = \frac{1}{R_{gs}^{1U}} \frac{1}{S_{gs}} \quad \text{where} \quad S_{gs} = \frac{1}{2} \pi D \quad (17)$$

where ϕ [$W m^{-2} K^{-1}$] is the heat transfer coefficient, R [$m K W$] is the thermal resistance, S [m] is the specific exchange surface, D [m] is the borehole diameter and d [m] is the pipe inner i and outer o diameter. The subscripts are fg for the in-pipe fluid and grout interaction, og for the out-pipe fluid and grout interaction, gg for the inter-grout and gs for the grout-subsurface heat exchanges.

2.4.2 Model geometry and properties

The surface area of the GHE model is $500 m \times 500 m$ and extends $300 m$ below the ground surface, divided into 6 layers of $50 m$ each. The same lithological characteristics of the subsurface, such as hydraulic conductivity, the thermal conductivity of both fluid and solids, as well as the porosity are assigned to the six layers that have a different initial temperature based on the geothermal gradient.

The model mesh consists of 3D triangular prismatic elements for a total of 195 720 elements and 114 450 nodes. A 2D horizontal-plane mesh was built and then extended in 3D to cover the entire domain (Figure 2-4). Each GHE was surrounded by 6 nodes. Thirty-one GHEs were added to the domain, in the same layout as they are at the Carignan-Salières elementary school. Each GHE is $152 m$ deep and surrounded by a finer discretization for a more accurate simulation. The mesh is coarser toward the boundaries of the domain. The triangular dimensions are up to approximately $4 m$ (Figure 2-4), which decrease to $0.06 m$ around each GHE (Figure 2-5).

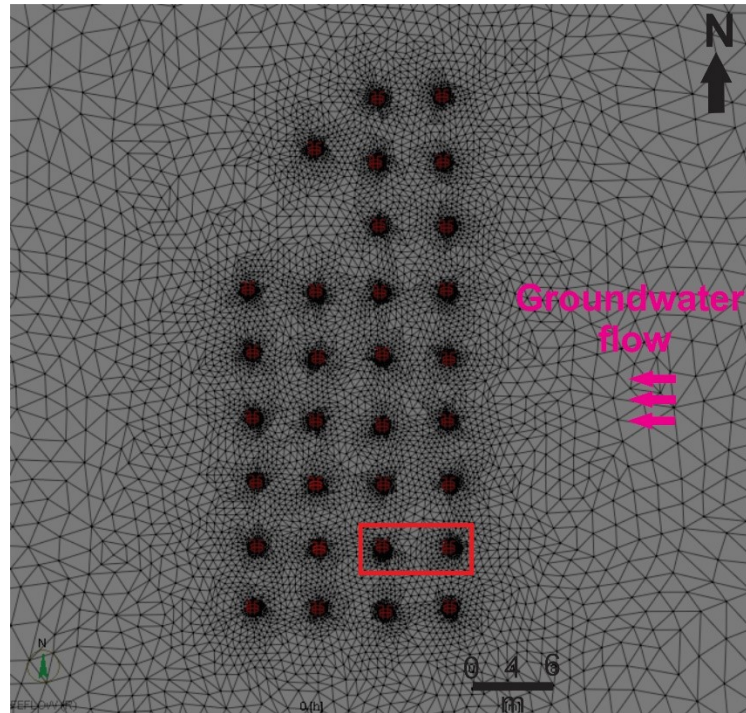


Figure 2-4. Plan view of the triangular prismatic mesh with details on the discretization around the thirty-one GHEs. The red rectangle shows the zone enlarged in Figure 2-5.

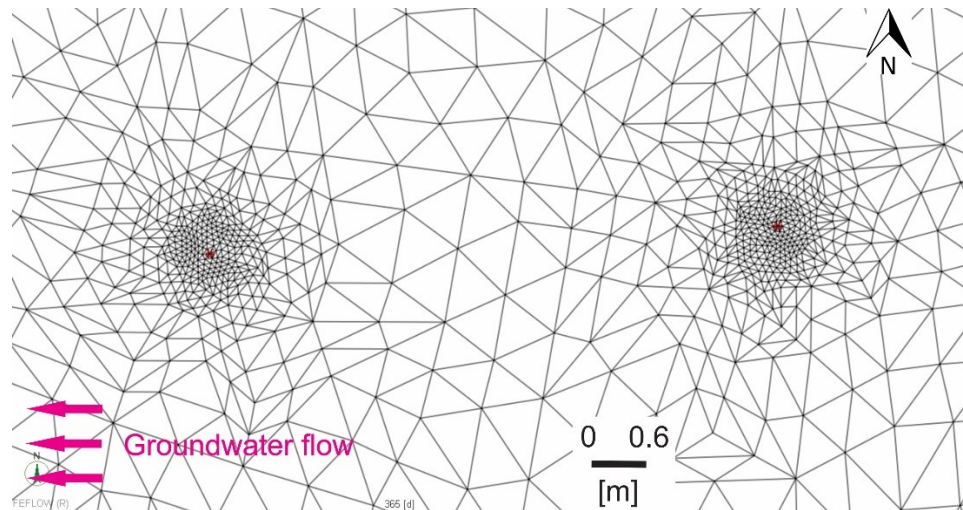


Figure 2-5. Planview of the triangle prismatic mesh with details on the discretization around two GHEs.

2.4.3 Initial and boundary conditions

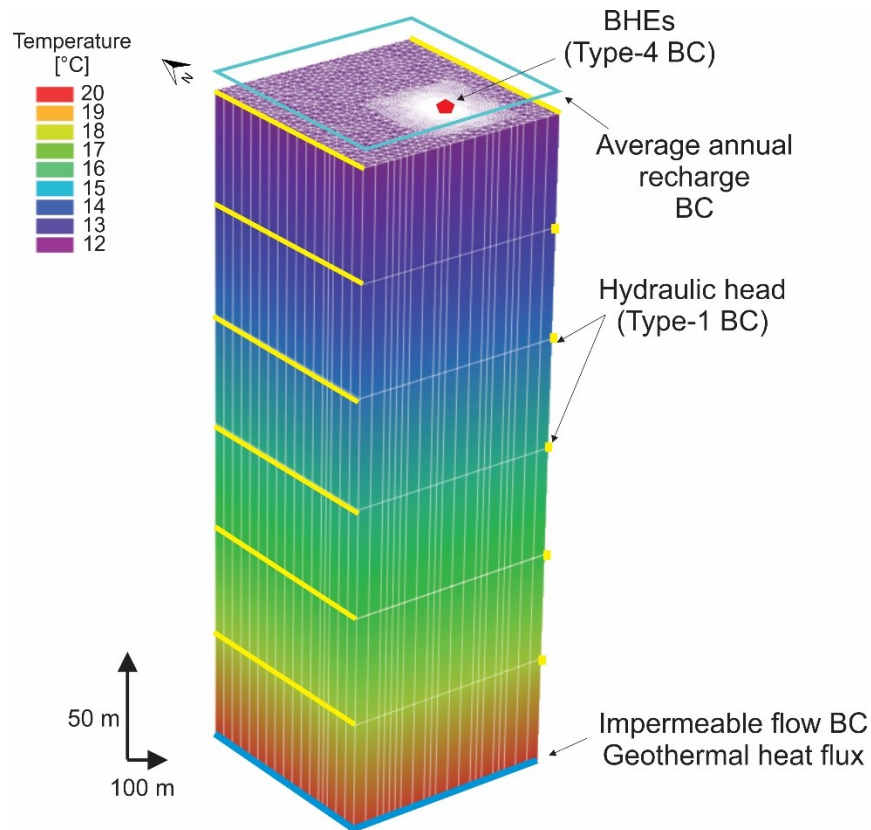
Constant hydraulic heads with different values according to chosen simulation scenarios were imposed on the eastern and western boundaries of the model. This head gradient is applied to represent local groundwater flow conditions due to pumping in the active

quarry, which is west of the school location (Figure 2-6). The bottom surface is set impermeable and an annual net recharge of 100 mm y^{-1} is imposed at the top surface (Carrier *et al.*, 2013).

The initial ground temperature was assigned to each layer according to the geothermal gradient of the area (Figure 2-6), which is equal to $23.1 \text{ }^{\circ}\text{C km}^{-1}$ (Bédard *et al.*, 2017). A fixed temperature boundary condition is used at the top of the model representing the average simulated surface temperature of $12 \text{ }^{\circ}\text{C}$ in the area. A constant heat flux is imposed at the bottom of the model in order to represent the geothermal heat flux in the St. Lawrence lowlands, which is assumed equal to 35 mW m^{-1} (Saulle *et al.*, 1962). The northern, southern, eastern and western boundaries were considered adiabatic for heat transfer.

The GHEs in FEFLOW are type-4 boundary conditions for which two approaches were used for the simulations. First, the inlet temperature was specified with an average flow rate of $1075.75 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ for the short-term calibration simulations to reproduce the heat injection test. Second, a total flow rate of $1016.61 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$, anticipated for the long-term operation of the system, and ground loads defined from the building simulation and the assumed heat pump COPs (Equations 4 and 5), were assigned to predict the operating temperature of the GHE field for twenty years.

For all numerical simulations, including model calibration, hourly time steps were used to ensure accurate results.



*BC = Boundary conditions

Figure 2-6. 3D model showing the boundary conditions and initial temperature for each layer.

2.4.4 Model calibration

The model was calibrated to reproduce the outlet temperature recorded during the heat injection test. Parameters with the highest uncertainty, which are the thermal conductivity of the subsurface solids and the material backfilling the boreholes as well as the subsurface hydraulic conductivity, were manually adjusted to provide the best match between measured and simulated data. The objective was to identify possible ranges for these uncertain parameters, which have an influence on the operating GHE temperature. All other parameters were kept constant during the calibration (Table 2-1), which are basically linked to the subsurface and the GHE entities. These parameters are the GHE pipe spacing, inlet and outlet pipe diameters, pipe thermal conductivity, pipe thickness, heat carrier fluid thermal conductivity and density, volumetric heat capacity of the both

fluid and subsurface solids, thermal conductivity of the fluid and specific storage of the subsurface.

Table 2-1. Constant parameters used in simulations.

Parameter	Value
Subsurface parameter	
Specific storage	10^{-4} m^{-1}
Volumetric heat capacity of water	$4.2 \times 10^6 \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-1}$
Volumetric heat capacity of subsurface solids	$2.52 \times 10^6 \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-1}$
Thermal conductivity of water	$0.65 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
GHE parameter	
Pipe spacing	0.10 m
Inlet and outlet pipe diameter	0.032 m
Pipe thermal conductivity	$0.39 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Pipe wall thickness	0.0038 m
Heat carrier fluid thermal conductivity	$0.48 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Heat carrier fluid density	1033 kg m^{-3}

2.5 Results

2.5.1 Field data analysis

2.5.1.1 Conceptual Model

Field measurements and observations combined with drilling reports allowed to define a geological cross-section used as a conceptual model (Figure 2-7). The 2800 m cross-section is bounded by the stream and the active quarry that are considered constant head hydraulic boundaries defining the water table. The thickness of the unconsolidated sediment cover was determined from well logs of the boreholes drilled for the GHE field (Leblanc, 2012).

The abandoned quarry closest to the school is 189 m down-gradient from the GHE field, while the active quarry is approximately 1 km down-gradient. The water level depth in the abandoned quarry is 21 m above sea level (asl). The host rock does not outcrop in the abandoned quarry and the excavation is surrounded by clayey soils. The active quarry is located in a cavity of massive rock. Water is pumped irregularly to maintain the

groundwater level below the excavation, which affects the local groundwater flow regime. The water level in the active quarry was measured at -3 m asl but can apparently vary by a few meters (see Annexe).

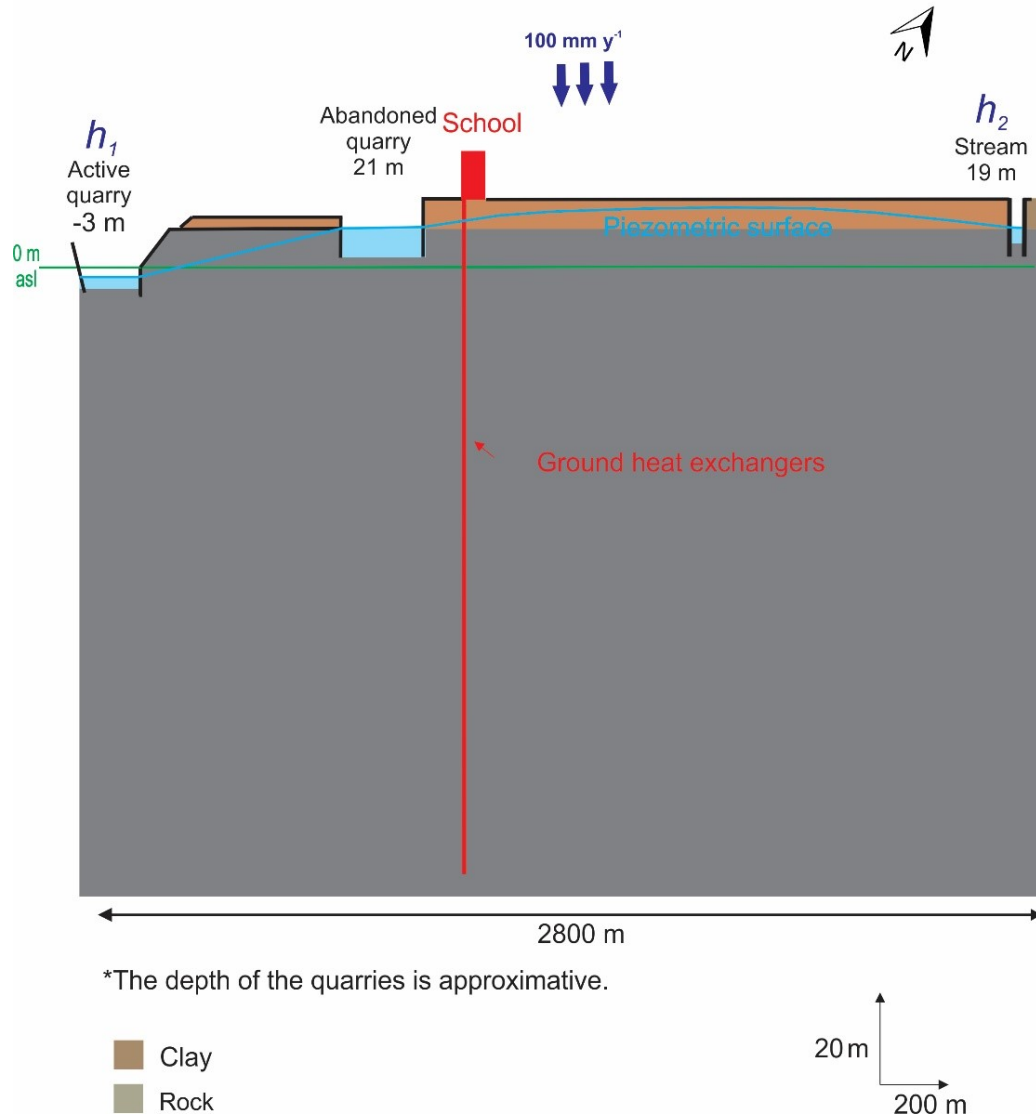


Figure 2-7. Conceptual model of the GHE field at the Carignan-Salières elementary school.

Steady-state groundwater flow in a simplified unconfined aquifer system with surface recharge was considered to calculate the level of the water table and the hydraulic gradient near the school site. A total distance of 2800 m separates the active quarry from the stream beyond the school in the NNE direction perpendicular to flow. Under an

assumed constant hydraulic head maintained in the quarry and the stream, the hydraulic head near the GHE field can be calculated with (Fetter, 2001):

$$h^2 = h_1^2 - \frac{h_1^2 - h_2^2}{L} + \frac{w}{K}(L - x) x \quad (23)$$

where h [m] is the hydraulic head between h_1 [m], the water level in the active quarry, and h_2 [m], the water level at the stream. The distance L [m] between the active quarry and the stream (2800 m), the average annual recharge w [m s⁻¹], the hydraulic conductivity of the subsurface K [m.s⁻¹] and the distance x [m] from the stream are considered to calculate the hydraulic head at location of the GHE field.

Hydraulic conductivity and recharge were thus manually adjusted in order to reproduce the hydraulic head measured in the abandoned quarry considered as an observation point. A mean hydraulic conductivity of 10⁻⁵ m s⁻¹ ranging from 10^{-3.8} to 10^{-6.5} m s⁻¹ and an average annual net recharge of 100 mm.y⁻¹ ± 9.4 % were considered (Carrier *et al.*, 2013). The calculation revealed that the horizontal hydraulic gradient near the GHE field is approximately 0.01 m m⁻¹. The calculation results indicated that the water level in the abandoned quarry can vary from 13 m asl to more than 24 m asl depending on the minimum and maximum values of both hydraulic conductivity and recharge given in the literature (Carrier *et al.*, 2013).

A sensitivity study was carried out to determine the influence of both hydraulic conductivity and recharge on the hydraulic gradient (Table 6). Scenario 1 represents the conditions that best match the water level measured in the abandoned quarry. Other scenarios are combinations of possible minimum and maximum values for hydraulic conductivity and recharge. The five scenarios have shown a similar hydraulic gradient near 0.01 m m⁻¹. Changes in both hydraulic conductivity and average annual net recharge have a major impact on water levels but only a minor impact on the hydraulic gradient at the school site, which remains close to 0.01 m m⁻¹ in all cases (Table 2-2).

Table 2-2. Scenarios considered to calculate the hydraulic gradient near the school site as a function of hydraulic conductivity and annual net recharge.

Scenario	Hydraulic conductivity (m s ⁻¹)	Hydraulic gradient at the school (m m ⁻¹)	Net recharge (mm y ⁻¹)	Calculated water level in the abandoned quarry (m)
Best	10 ^{-4.935}	0.0083	100.0	20.7
K ↘ R ↘	10 ⁻⁵	0.0085	90.7	21.2
K ↘ R ↗	10 ^{-4.94}	0.0088	109.5	21.7
K ↗ R ↗	10 ^{-4.5}	0.0063	100.3	13.5
K ↗ R ↘	10 ^{-4.5}	0.0063	95.0	13.7

2.5.1.2 Laboratory measurements of thermal conductivity

Gabbro samples taken from the dyke and analyzed with both the needle probe and the MTPS have a thermal conductivity below 2 W m⁻¹ K⁻¹, which is lower than the shales and calcarenites, due to the mineralogy of the intrusive rock containing abundant feldspars (Table 2-3). Thermal conductivity of gabbro was measured in another case study and ranged between 1.65 and 2.29 W m⁻¹ K⁻¹ (Pasquale *et al.*, 2015), which is consistent with our results. Massive dark shale samples have a thermal conductivity ranging between 1.9 and 2.9 W m⁻¹ K⁻¹ (Table 2-3), which is in agreement with a value of 2.79 W m⁻¹ K⁻¹ measured in the St. Lawrence lowlands (Bédard *et al.*, 2016, Nasr *et al.*, 2015, Nasr *et al.*, 2018). Clear interbedded shale samples have an average thermal conductivity of 2.9 W m⁻¹ K⁻¹. The sample of calcarenite has the highest thermal conductivity among all the collected samples, with a value of 3.5 W m⁻¹ K⁻¹.

Table 2-3. Average thermal conductivity measured with a needle probe and the MTPS method

Rock type	Measurement method	Number of samples analyzed	Thermal conductivity (W m ⁻¹ K ⁻¹)
Gabbro	Needle probe	3	1.87 ± 10%
Gabbro	MTPS	2	1.82 ± 0.4%
Calcarenites	MTPS	1	3.58 ± 0.5%
Dark shales	MTPS	3	2.42 ± 1.13%
Light shales	MTPS	3	2.85 ± 0.96%

2.5.1.3 In situ heat injection test

The heat injection test was carried out at an average heat injection rate of 305 kW or 9.8 kW per borehole (Figure 2-8). The total average flow rate was 39.9 L min⁻¹. The injection period lasted 406 h with temperatures fluctuating between 15 °C and over 35 °C; monitoring of the temperature recovery lasted 318 h and the temperature ranged between 0 °C and 5 °C.

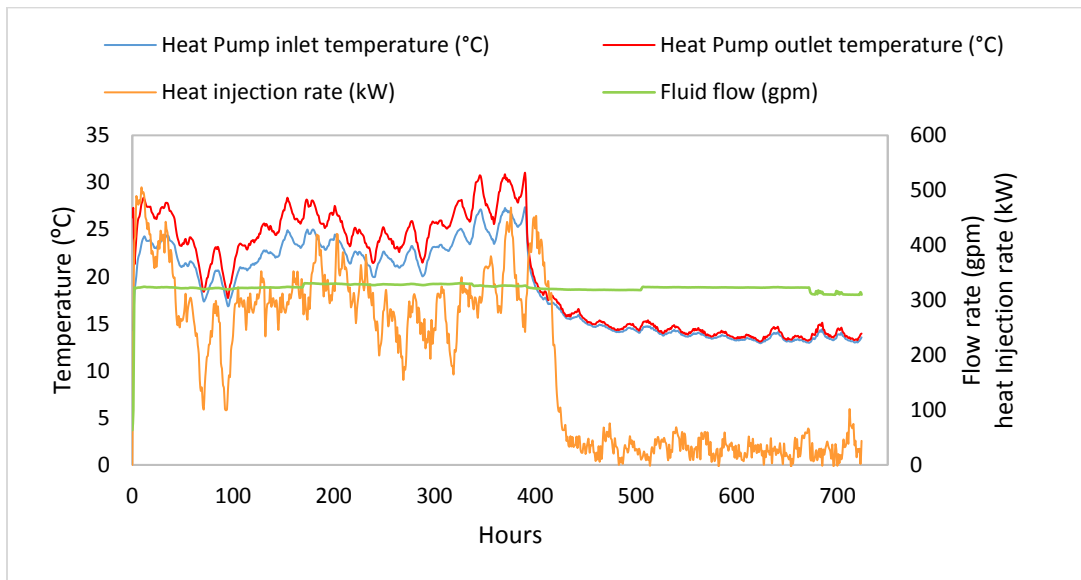


Figure 2-8. Fluid temperature and flow rate recorded during the heat injection test.

2.5.2 GCHP System simulation

2.5.2.1 Ground loads

The building simulation done with eQuest revealed that the total annual heating consumption of the school building is 171 MWh and the total cooling consumption is 119 MWh for a regular year of operation. The peak heating load 494 kW is on January 30th while the peak cooling load 253 kW is on July 17th. The building loads were converted to ground loads via equations 4 and 6 assuming a COP of 4.7 and 4.1 in heating and cooling mode, respectively (Figure 2-9). Energy stored in the ground is extracted in heating mode while returned to the ground in cooling mode. Heating loads are greater

than cooling loads, which makes ground loads unbalanced and can affect the long-term thermal response of the system.

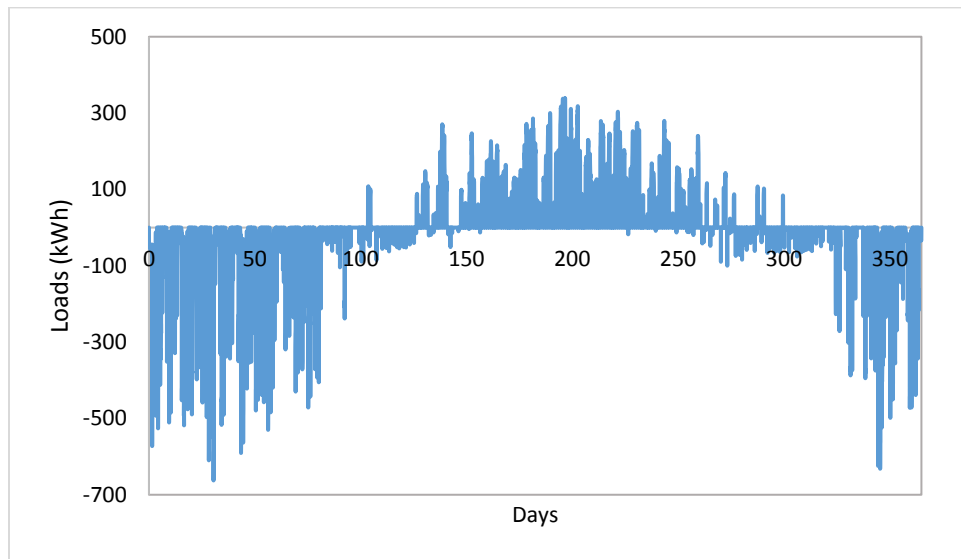


Figure 2-9. Simulated heating and cooling loads imposed on the GHE field of the school building calculated with eQuest from January (0 d) to the end of December (365 d).

2.5.2.2 Model calibration

The total duration for the calibration simulation was 724 h, which corresponds to the duration of the heat injection test, including the heat injection and the thermal recovery periods. Calibration parameters were adjusted one at a time (Table 2-4). The calibrated model reproduced the GHE outlet temperature with a maximum error of 2 % (Figure 2-10). Calculation time using a 6 GHz-core PC and 32Go RAM memory workstation was about 30 min for the calibration simulations.

Table 2-4. Range of parameter uncertainty in the calibration simulations.

Calibration parameter	Possible range	Chosen value
K_x ($m\ s^{-1}$)	$10^{-5} - 10^{-3}$	10^{-4}
K_y ($m\ s^{-1}$)	$10^{-7} - 10^{-3}$	10^{-4}
K_z ($m.s^{-1}$)	$10^{-9} - 10^{-3}$	10^{-6}
λ filling material ($W\ m^{-1}\ K^{-1}$)	1.5 – 1.9	1.75
λ host rock solids ($W\ m^{-1}\ K^{-1}$)	2.1 – 2.4	2.4
Porosity (%)	3 - 5	3

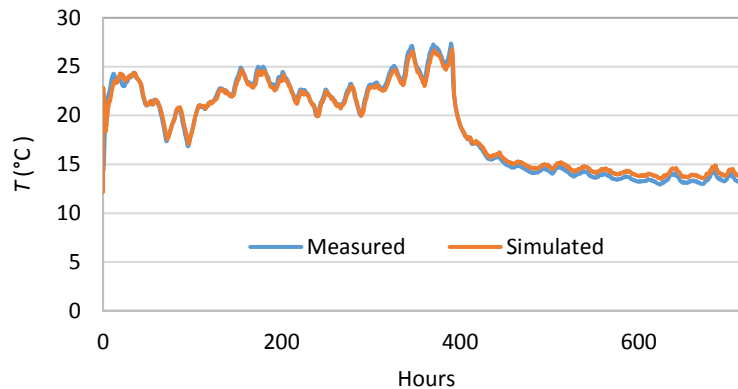


Figure 2-10. Best match between measured and simulated GHE outlet temperature.

2.5.2.3 System operation simulation: *Twenty-year predictions*

The eight simulation scenarios considered to evaluate the long-term operating GHE temperature at the Carignan-Salières elementary school were based on field observations and calibration results, varying key parameters one at a time to determine the impact of important subsurface parameters (Table 2-5). The start time of the simulation was the month of September, when the GHE system was put in operation. Each simulation took 5 days using the same workstation as reported above for the calibration simulations. Scenario A is a base case scenario, considering measured data for the thermal conductivity of the solids and the borehole filling material, hydraulic conductivity of the host rock reported in the literature (Carrier *et al.*, 2013) and a moderate hydraulic gradient, when compared to the hydraulic gradient measured during the field work. Scenario B was defined according to the best fit parameters identified with the calibration and has a small change of solids thermal conductivity when compared to scenario A. Only the thermal conductivity of the filling materials was changed in scenarios C and D with respect to the base case. Scenarios E and F focused on thermal conductivity of the host rock solids, while scenarios G and H were run to verify the influence of groundwater flow with a change of hydraulic head at the eastern and western boundaries of the model (Figure 2-6).

Simulation results for scenarios A and B do not show significant differences in the simulated GHE fluid temperature. Scenario B has less than 1 °C difference in the maximum and minimum fluid temperature at the GHE outlet and inlet when compared to

Scenario A (Figure 2-11). This small difference can be due to the decrease of the subsurface thermal conductivity in Scenario B. The results of Scenario D indicate a GHE fluid temperature that is 2 to 3 °C higher than the maximum and lower than the minimum temperature when compared to Scenario C, which is due to the decrease of the thermal conductivity of the backfill material. A low thermal conductivity of the subsurface (Scenario E) affects the maximum and the minimum GHE fluid temperature by 1 to 4 °C, respectively, when compared to the case with a high thermal conductivity (Scenario F).

Simulations with differences in hydraulic gradient imposed at the model boundaries show the most significant differences in GHE fluid temperature. In Scenario G, the GHE inlet temperature reaches 40 °C and drops to -5 °C and the GHE outlet temperature reaches more than 30 °C and drops to less than 3 °C. However, in Scenario H, the GHE inlet temperature reaches 33 °C and falls to only 3 °C while the GHE outlet temperature is between 23 °C and 7 °C. The maximum GHE fluid temperature of Scenario H is 7 °C lower than the maximum of Scenario G, while the minimum GHE fluid temperature is 8 °C higher than minimum of Scenario G. This trend can be explained by the higher hydraulic gradient of 0.008 imposed at the model boundaries, which was considered for Scenario H that represents conditions with significant pumping in the active quarry. This last scenario provides better heat exchange with the subsurface and therefore better GHE temperature or performance. The heat front caused by cooling the buildings is dispersed and follows the groundwater flow direction (Figures 2-13 and 2-15). The lower hydraulic gradient can represent a case where pumping in the active quarry is stopped or reduced, which has a negative impact on the GHE temperature and consequently a potential negative impact on the system performance. The heat front due to cooling in this case is local and restricted to the GHE field (Figures 2-12 and 2-14).

Overall, the thermal conductivity of the filling material has a small impact on the GHE inlet and outlet temperature. However, a higher thermal conductivity of the filling material allows having a better operation temperature. The thermal conductivity of the subsurface has a moderate impact on the maximum and minimum GHE temperature. The hydraulic gradient, which is thought to be affected by pumping water in the active quarry, has the greatest impact on heat exchange with the subsurface. Therefore, GHE performance

mostly depends on the local groundwater flow conditions. As the minimum GHE outlet temperature drops, the performance of the heat pump can decrease.

Despite the significant differences between the simulated temperature of the heat carrier fluid in Scenarios G and H, the twenty-year simulations show an adequate thermal response of the subsurface with constant temperature changes from year to year although ground loads are unbalanced. A low groundwater flow rate appears enough to reduce the effect of unbalanced loads that can potentially cool the subsurface since this is not noticed in the long-term simulation. The main impact of groundwater flow is on yearly temperature changes. The minimum GHE outlet temperature dropped to 3 °C in Scenario G, which is still far from the minimal operating temperature of the heat pump system recommended by the manufacturer (-9.62 °C). However, the minimum GHE inlet temperature dropped to -5 °C. The freeze protection provided by the 25 vol.% propylene glycol solution circulating in the GHE is -10 °C and geothermal system designers recommend a minimum fluid temperature 5 to 7 °C higher than the freezing point of the solution. Therefore, under low groundwater flow conditions, care should be taken to follow the system minimum operating temperature during winter periods to avoid potential freezing problems at the GHE inlet.

Table 2-5. Scenarios considered for GCHP system simulation at the Carignan-Salières school building.

Scenarios	Hydraulic head at lateral boundaries (m)	Hydraulic gradient (m m ⁻¹)	Thermal conductivity of subsurface solids (W m ⁻¹ K ⁻¹)	Thermal conductivity of filling material (W m ⁻¹ K ⁻¹)
A	26 - 24	0.002	2.5	1.75
B	26 - 24	0.002	2.4	1.75
C	26 - 24	0.002	2.4	1.9
D	26 - 24	0.002	2.4	1.5
E	26 - 24	0.002	2	1.75
F	26 - 24	0.002	3	1.75
G	26 - 25.7	0.0006	2.4	1.75
H	26 - 22	0.008	2.4	1.75

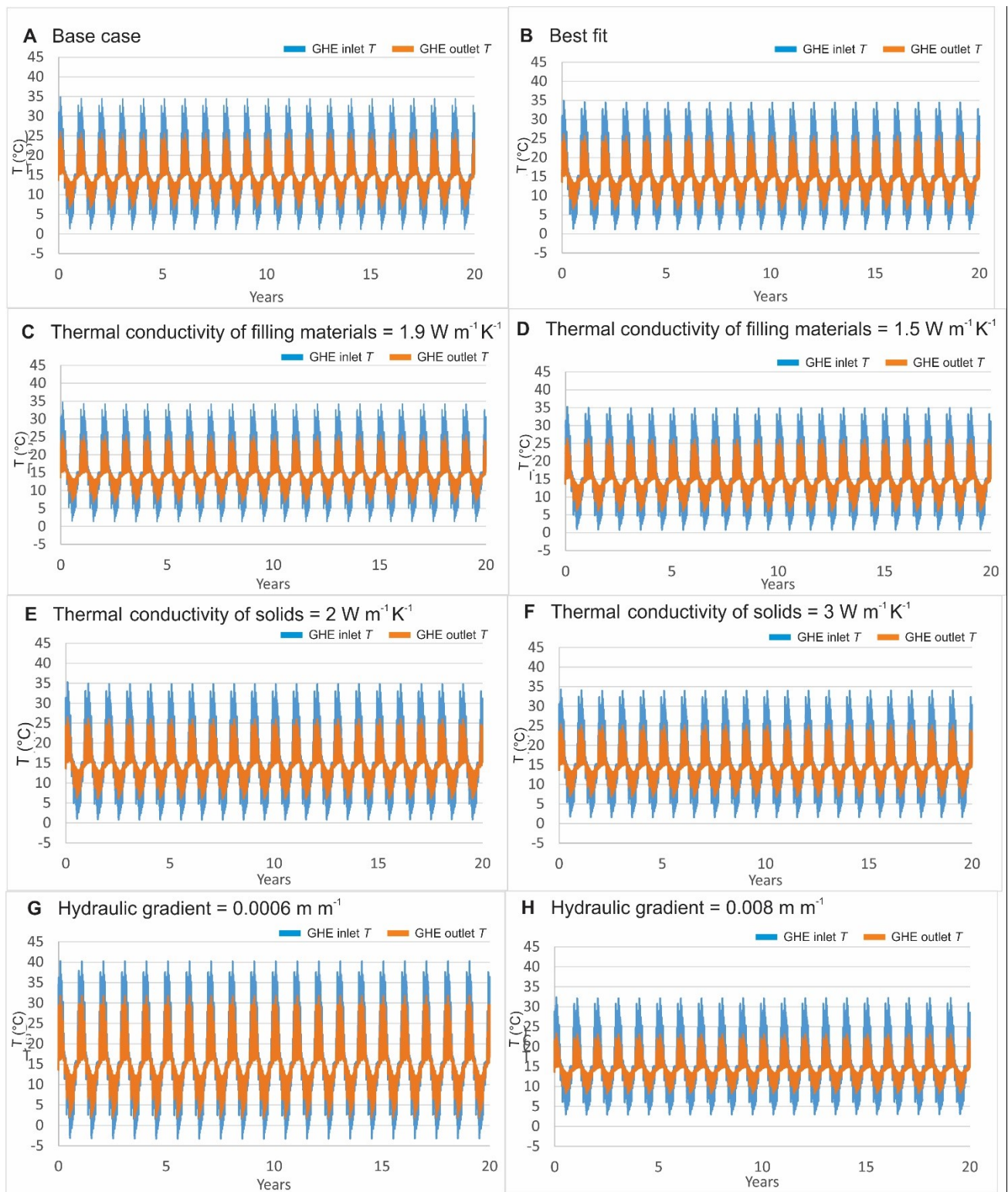


Figure 2-11. Simulated GHE inlet and outlet temperatures for twenty years of operation at the Carignan-Salières school building according to different subsurface scenarios.

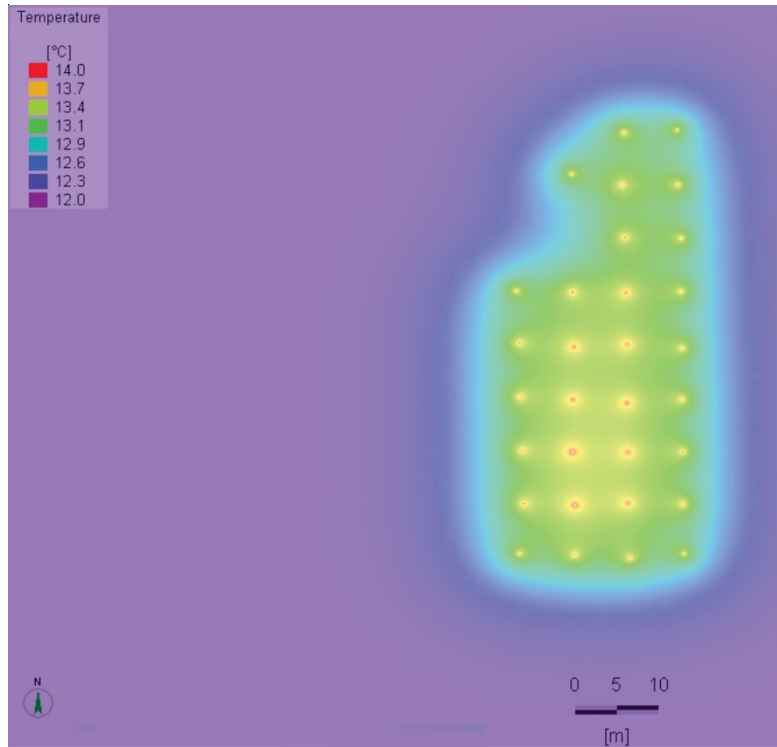


Figure 2-12. One-year propagation of thermal perturbation during the middle of the cooling season on mid-summer in the case of a low hydraulic gradient (Scenario G).

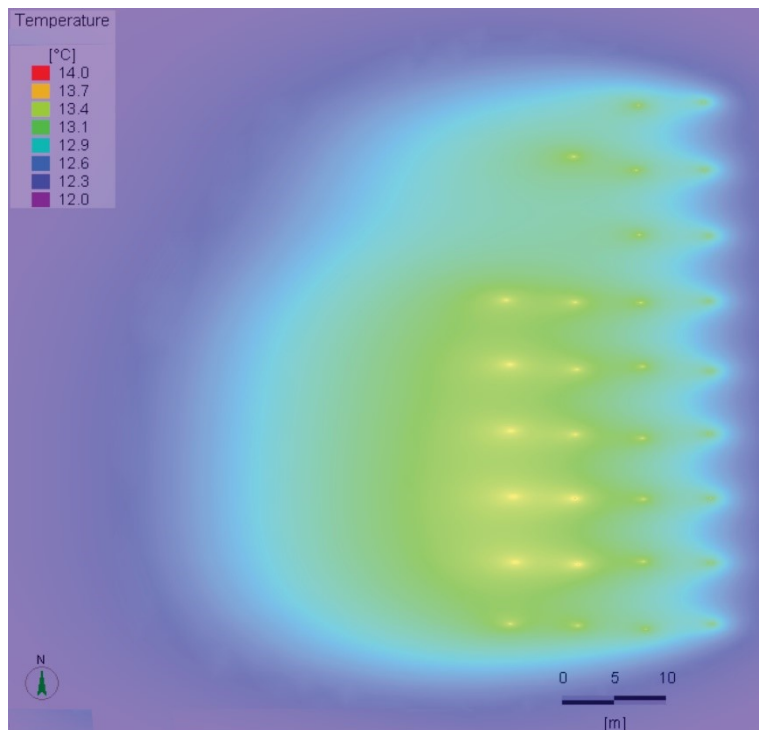


Figure 2-13. One-year propagation of thermal perturbation during the middle of the cooling season on mid-summer in the case of a high hydraulic gradient (Scenario H).

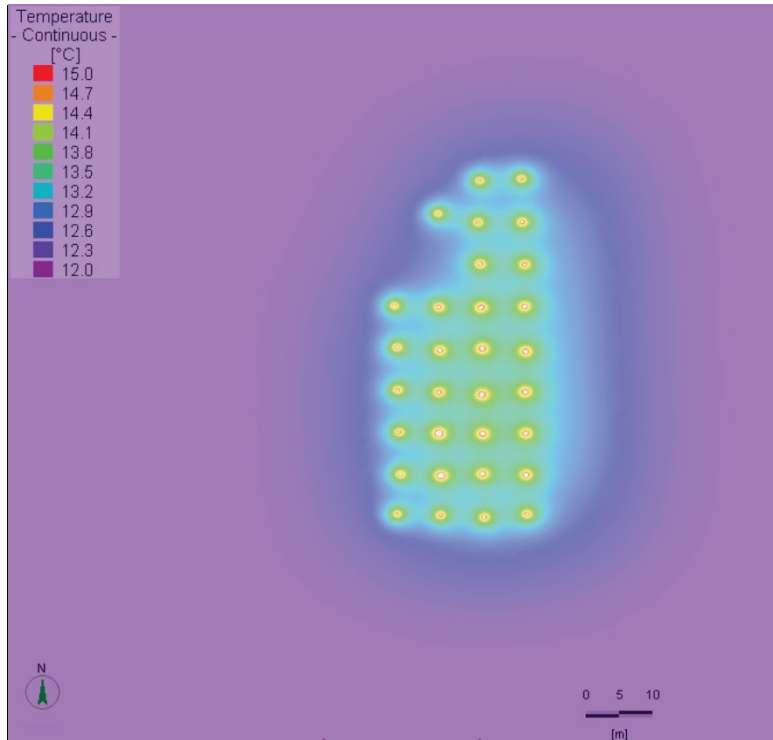


Figure 2-14. One-year propagation of thermal perturbation during the end of the heating season on March 31st in the case of a low hydraulic gradient (Scenario G).

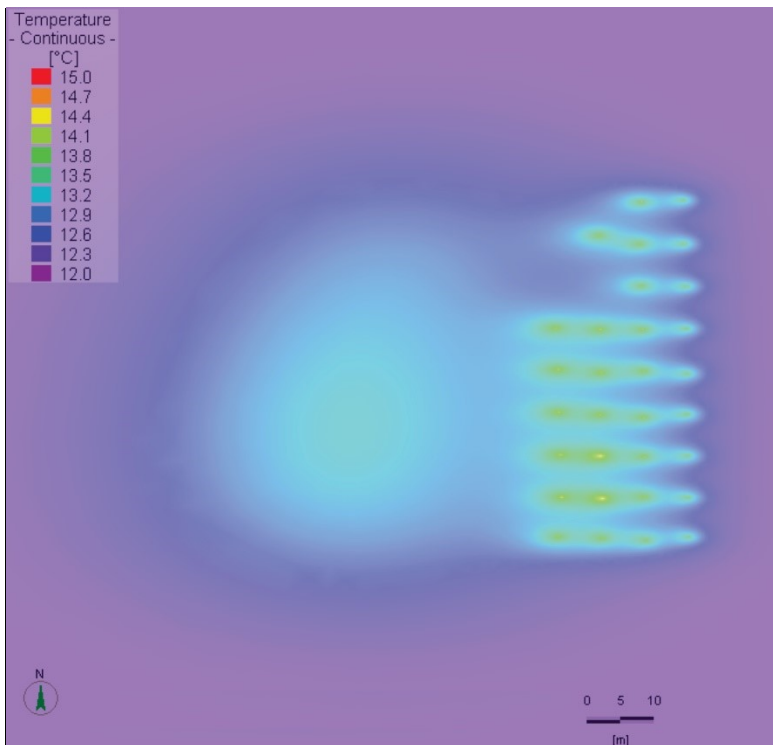


Figure 2-15. One-year propagation of thermal perturbation during the end of the heating season on March 31st in the case of a low hydraulic gradient (Scenario H).

2.6 Discussion and conclusions

Field and modelling work conducted at the Carignan-Salières school has shown that the installed GCHP system can be influenced by the varying groundwater flow conditions due to dewatering of a neighbouring quarry located at approximately 1 km from the borehole field. The specific groundwater Darcy flux in the host rock in which the GHE system is installed has been estimated to $3.3 \times 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$ at the moment of measuring the water level in the nearby quarries. The school building is constructed above fractured shale and limestone of the Nicolet formation in the Lorraine Group and the groundwater flow is oriented westward toward the active quarry. Measurement of thermal conductivity of the rock samples collected in the active quarry revealed that the most abundant rock types have a thermal conductivity ranging from 1.8 to $3.6 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. A TRT conducted at the site, which reported an equivalent subsurface thermal conductivity of $2.58 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (Leblanc, 2012), was likely affected by groundwater flow.

A heat injection test was therefore carried out with the purpose of evaluating the thermal response of the entire GHE field subject to groundwater flow. The data collected was used to calibrate a subsurface flow and heat transfer model built using the FEFLOW program to simulate the operating temperature of the GHEs. The numerical model was developed according to the characteristics of the subsurface and the GHE field to reproduce a heat injection test and predict the long-term response according to different scenarios to identify parameters that can impact the GHE operating temperature.

The long-term simulations allowed to evaluate the impact of the thermal conductivity of the backfilling material and the subsurface, as well as the groundwater flow conditions. Constant hydraulic heads imposed at lateral boundaries were varied to evaluate the long-term operating temperature of the GHE under specific Darcy fluxes varying at the GHE field from 6×10^{-8} to $8 \times 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$, which represented conditions with low to high pumping in the neighbouring active quarry. The impact of the thermal conductivity of the filling material and the subsurface on the inlet and outlet temperature of the GHEs was shown to be minor when compared to the possible change of groundwater conditions at the site.

The subsurface heat exchange capacity of the GCHP system is currently enhanced by groundwater flow, as a consequence of pumping in the active quarry. The simulation

carried out under the most likely operating conditions, assuming a thermal conductivity of the backfilling material and the subsurface solids of 1.75 and 2.4 W m⁻¹ K⁻¹, respectively, and with groundwater flow conditions that induce a Darcy flux of 2 x 10⁻⁷ m s⁻¹ at the GHE field, indicates reasonable operating GHE temperatures for the next twenty years. However, if pumping activity ceases in the active quarry and the specific groundwater flux drops below 6 × 10⁻⁸ m s⁻¹, the minimum GHE outlet temperature can become critical.

Results of this work are in accordance with other studies that involved numerical evaluation of GHE performance (Fujimoto *et al.*, 2011), where significant groundwater flow has been shown to affect the thermal response of a GHE system more than the ground thermal conductivity, even under different building load scenarios. In less permeable subsurface layers, which had a groundwater Darcy flux of 2 x 10⁻¹⁰ m s⁻¹, Fujimoto *et al.* (2011) evidenced that the operating temperature of GHE exhibits more changes than that of the permeable layer having a groundwater velocity of 6 x 10⁻⁷ m s⁻¹. In this case, groundwater enhanced the heat exchange rate with the subsurface due to the effect of advective heat transport. Another study that used numerical simulations (Dehkordi *et al.*, 2014) has shown that increasing the Darcy flux in a theoretical aquifer system from 10⁻⁹ to 10⁻⁷ m s⁻¹ resulted in a longer and narrower thermal plume propagating from the GHE. Further increasing the Darcy flux to 10⁻⁶ m s⁻¹ made the thermal plume dramatically smaller. Dehkordi *et al.* (2014) concluded that groundwater flow can substantially improve heat transfer by enhancing advection and dispersion and is the most important factor in thermal recovery of GHE systems. Chiasson *et al.* (2000) also concluded that groundwater flow can be expected to have a significant effect on closed-loop heat exchanger performance through finite element simulations of groundwater flow and heat transfer. In simulations made by Chiasson *et al.* (2000), increasing Darcy flux from 1.9 x 10⁻⁶ to 1.9 x 10⁻⁵ m s⁻¹ produced a higher minimum fluid temperatures. Similarly, the simulation results reported for our study have shown a reasonable thermal response of the GHE field enhanced by the operation of the system under varying groundwater conditions. In our case, the groundwater flow conditions were related to pumping in a nearby quarry and have been imposed on the numerical model according to field observations. Previous studies evaluating the impact of groundwater flow on GHE operation were mostly based on theoretical models. Our study confirms

previous findings by using a field case from which groundwater flow conditions and subsurface thermal properties were inferred with field and laboratory measurements rather than assumed hypothetical conditions.

III. Discussion et conclusions

Ce travail de maîtrise visait à évaluer les facteurs qui peuvent affecter à long terme la performance du champ de forages géothermiques de l'école Carignan-Salières. Pour y arriver, il a été proposé de reproduire les températures observées lors d'un essai d'injection de chaleur d'une durée de 406 jours, considérant le remplissage des forages géothermiques par du sable d'olivine et l'écoulement d'eau souterraine causé par le pompage de l'eau dans une carrière active située à moins de 1 km du site.

Deux modèles numériques ont été développés à cet effet. Le premier, utilisant l'outil HyGCHP (Hackel *et al.*, 2011) et la méthode DST (Hellström, 1991) a permis de simuler les températures d'entrée et de sortie du fluide des échangeurs de chaleur géothermique, le *COP* des pompes à chaleur et les économies d'énergie envisageables sur une période de vingt ans. Ce modèle simplifié supposait, au niveau du sous-sol, un transfert de chaleur par conduction seulement et les conditions d'écoulement d'eau souterraine étaient représentées par une conductivité thermique équivalente plus élevée. Le modèle a été calibré à l'aide des résultats du test d'injection de chaleur et les paramètres incertains, tel que la conductivité thermique des matériaux de remplissage et du sous-sol ont été manuellement ajustés. La température mesurée à la sortie des puits a été reproduite avec une erreur maximale de 1%. Bien que la méthode employée ne permet pas de considérer le transfert thermique par advection dans le sous-sol, le modèle peut bien reproduire les températures observées. L'impact des matériaux de remplissage et du pompage de l'eau souterraine dans la carrière avoisinante a été étudié en considérant trois scénarios de base, pessimiste et optimiste, affectant la conductivité thermique des matériaux de remplissage et la conductivité thermique effective du sous-sol. Les résultats de simulations prolongées ont montré que la conductivité thermique effective de la sous-surface, ou les conditions de sous-sol sont supposées influencées par l'écoulement d'eau souterraine, à un impact plus grand sur la performance des échangeurs de chaleur par rapport aux matériaux de remplissage.

Le deuxième modèle numérique développé dans FEFLOW (Diersch *et al.*, 2010) avec la méthode des éléments finis à quant à lui permis d'évaluer la température d'opération des échangeurs de chaleur sur une durée de vingt ans considérant les transferts de chaleur par convection dans le sous-sol. En effet, FEFLOW permet de simuler les transferts thermiques par conduction et advection au sein d'éléments 3D auxquels sont superposés

des éléments 1D qui représentent les échangeurs de chaleur par le biais de résistances thermiques équivalentes (Eskilson *et al.*, 1988). FEFLOW ne permet toutefois pas de simuler le *COP* des pompes à chaleur et il faut supposer des taux d'extraction et d'injection de chaleur qui ne changent pas année après année. Des données de terrain additionnelles et des mesures de conductivité thermique en laboratoire ont été compilées pour mieux contraindre le développement du modèle. Les conductivités thermiques de douze échantillons ramassés dans la carrière avoisinante ont été mesurées par les méthodes de la sonde à aiguille et de la plaque chauffante transitoire. Les résultats ont donné une conductivité thermique variant de 1.8 à 3.6 W m⁻¹ K⁻¹, pour les shales, calcaires et gabbros échantillonnés. Les résultats d'analyse des roches sédimentaires échantillonnées sont caractéristiques de la conductivité thermique des roches des Basses-Terres du Saint-Laurent (Bédard *et al.*, 2016, Bédard *et al.*, 2017, Raymond *et al.*, 2017). Le modèle 3D couvre la totalité du champ de puits géothermiques et un bloc de 500 m x 500 m x 300 m de la sous-surface du site examiné. Les conditions limites sont des charges hydrauliques constantes aux faces latérales, un flux de chaleur à la base ainsi qu'une infiltration nulle et une température constante à la surface. Ce deuxième modèle a été, encore une fois calibré, avec les résultats du test d'injection de chaleur. Des scénarios de simulation à long terme ont permis d'évaluer séparément l'impact de la conductivité thermique des matériaux de remplissage et du sous-sol face à l'écoulement d'eau souterraine. Les résultats démontrent toujours que la conductivité thermique des matériaux de remplissage a un impact mineur par rapport à la conductivité thermique du sous-sol lorsque la température d'opération des forages géothermiques est comparée. Cependant, le phénomène ayant le plus d'impact est l'écoulement d'eau souterraine. La simulation réalisée dans les conditions les plus plausibles montre une réponse thermique adéquate reflétant une performance fiable des échangeurs de chaleur sur 20 ans avec une température maximale de 25 °C en mode climatisation et une température minimale de 7 °C en mode chauffage au niveau du fluide caloporteur entrant dans les pompes à chaleur, qui pourrait toutefois diminuer si le pompage est arrêté dans la carrière avoisinante. Le pompage de l'eau souterraine aide à dissiper la chaleur dans le sous-sol et favorise l'opération du système géothermique.

Le modèle préliminaire, celui exécuté avec HyGCHP, considère un *COP* variable en fonction des courbes de performance des pompes à chaleur et permet donc de calculer les économies d'énergie. Cependant, il ne permet pas d'évaluer les transferts de chaleur par advection dans le sous-sol. Par contre, le deuxième modèle développé avec FEFLOW prend en considération les transferts de chaleur par convection dans le sous-sol, mais des charges au sol doivent être imposées sans possibilité de varier le *COP* des pompes à chaleur. FEFLOW ne permet donc pas de calculer directement les économies d'énergie. Les deux approches ont aussi une complexité et un temps de calcul bien différents. La première approche a permis d'obtenir des résultats rapides pour répondre aux questions de GBi et la Commission scolaire des Patriotes dans des délais courts. Bien que le premier modèle fut incomplet au niveau de la simulation des transferts de chaleur dans le sous-sol, il a permis de bien comprendre les enjeux entourant l'opération du système géothermique. Les résultats de simulations du premier modèle indiquent une baisse progressive de la température minimale des échangeurs de chaleur, soit une diminution d'environ 5 °C sur 20 ans causée par les charges du bâtiment qui sont débalancées vers le chauffage. Cet effet peut aussi être attribué à la façon de simuler le système qui ne considère pas les transferts de chaleur par advection dans le premier modèle. Le deuxième modèle était quant à lui plus représentatif des conditions souterraines, mais a pris beaucoup plus du temps à développer. Il a permis de confirmer les hypothèses émises avec le premier modèle avec des simulations plus réalistes des phénomènes de transfert de chaleur dans le sous-sol et de l'écoulement souterrain. Les résultats de simulations du deuxième modèle indiquent un maintien, année après année, de la température minimale d'opération des échangeurs de chaleur même si les charges imposées au sous-sol sont débalancées. L'écoulement d'eau souterraine simulée pour tous les cas considérés permet de maintenir l'inertie thermique du sous-sol.

Un modèle d'éléments finis considérant les transferts de chaleur par convection dans le sous-sol et un *COP* variable pour les pompes à chaleur représente l'étape suivante à réaliser pour évaluer plus précisément la performance à long terme des échangeurs de chaleur du système géothermique de l'école Carignan-Salières. Il pourrait être possible d'implémenter une fonction pour calculer le *COP* des pompes à chaleur dans FEFLOW selon la température du fluide caloporteur à la sortie des échangeurs de chaleur. Le but

serait d'avoir des charges au sol qui varient en fonction de la température simulée et donc un *COP* variable pour pouvoir calculer les économies d'énergies.

L'impact important des conditions d'écoulement d'eau souterraine sur les performances du système nécessite plus de suivi en cas d'arrêt définitif du pompage de l'eau dans la carrière active. En effet, un suivi de la température du fluide caloporteur entrant dans le système de pompe à chaleur pourrait être effectué, surtout durant les périodes hivernales lorsque la température du fluide peut devenir plus basse. Dans le cas où la température d'opération s'approcherait à 5 °C près du point de congélation du fluide caloporteur, soit -10 °C, une recharge thermique pourrait être envisagée en injectant plus de chaleur dans le sous-sol. Par exemple, la chaleur de l'air ambiant en été pourrait être transférée au sous-sol pour s'assurer de maintenir une température d'opération adéquate en hiver. Cette approche aiderait à balancer les charges de chauffage et de climatisation du bâtiment qui sont débalancées, bien qu'actuellement, c'est l'écoulement d'eau souterraine qui permet de retrouver l'équilibre thermique au niveau du sous-sol et d'opérer le système demandant plus de chauffage.

RÉFÉRENCES

- Al-Khoury R & Bonnier P (2006) Efficient finite element formulation for geothermal heating systems. Part II: transient. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 67(5):725-745.
- Al-Khoury R, Bonnier P & Brinkgreve R (2005) Efficient finite element formulation for geothermal heating systems. Part I: Steady state. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 63(7):988-1013.
- Barla G, Barla M, Bonini D, Debernardi D, Perino A, Antolini F & Gilardi M (2015) 3D thermo-hydro modelling and real-time monitoring for a geothermal system in Torino, Italy. *Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development*. Rapport ICE publishing, École polytechnique de Turin, Italie, 7 pages.
- Bauer D, Heidemann W, Müller-Steinhagen H & Diersch H (2009) Modelling and simulation of groundwater influence on borehole thermal energy stores. *Effstock 11th International Conference on Energy Storage*, Stockholm, Suède.
- Bauer D, Heidemann W, Müller-Steinhagen H & Diersch HJ (2011) Thermal resistance and capacity models for borehole heat exchangers. *International Journal of Energy Research* 35(4):312-320.
- Beckman WA, Broman L, Fiksel A, Klein SA, Lindberg E, Schuler M & Thornton J (1994) TRNSYS The most complete solar energy system modelling and simulation software. *Renewable energy* 5(1-4):486-488.
- Bédard K, Comeau F-A & Malo M (2011) Évaluation du potentiel de séquestration géologique du CO₂ des bassins sédimentaires du sud du Québec. Rapport interne, INRSCO2-2011-V1.2, Institut national de la recherche scientifique, Québec, Canada, 25 pages.
- Bédard K, Comeau F-A, Raymond J, Malo M & Nasr M (2017) Geothermal Characterization of the St. Lawrence Lowlands Sedimentary Basin, Québec, Canada. *Natural Resources Research*:1-24.

- Bozdağ Ş, Turgut B, Paksoy H, Dikici D, Mazman M & Evliya H (2008) Ground water level influence on thermal response test in Adana, Turkey. *International Journal of Energy Research* 32(7):629-633.
- Brisebois, D. et Brun, J. (1994) La plate-forme du Saint-Laurent et les Appalaches. Dans: *Géologie du Québec*. Ministère des Ressources naturelles, Québec, Canada, MM 94-01: 95-120.,
- C-Therm technologies (2016) TCi Thermal conductivity Analyzer. Manuel d'instructions, C-Therm technologies, Nouveau Brunswick, Canada, 6 pages.
- Environnement Canada (2015) Historical data-Station Results. Disponible sur l'internet :, http://climat.meteo.gc.ca/historical_data/search_historic_data_f.html, consulté le 01/02/2017.
- Carrier, M.-A., Lefebvre, R., Rivard, C., Parent, M., Ballard, J.-M., Vigneault, H., & Gloaguen, E (2013) Portrait des ressources en eau souterraine en Montérégie Est, Québec, Canada, Rapport interne, R-1433, Institut national de la recherche scientifique, Québec, Canada, 319 pages.
- Castonguay S, Dietrich J, Lavoie D & Laliberté J-Y (2010) Structure and petroleum plays of the St. Lawrence Platform and Appalachians in southern Quebec: insights from interpretation of MRNQ seismic reflection data. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology* 58(3):219-234.
- Cawood PA, McCausland PJ & Dunning GR (2001) Opening Iapetus: constraints from the Laurentian margin in Newfoundland. *Geological Society of America Bulletin* 113(4):443-453.
- Chiasson AD, Rees SJ & Spitler JD (2000) A preliminary assessment of the effects of groundwater flow on closed-loop ground-source heat pump systems. *ASHRAE Transactions* 106:380-393.
- Claesson J & Hellström G (2011) Multipole method to calculate borehole thermal resistances in a borehole heat exchanger. *HVAC&R Research* 17(6):895-911.
- Clauser C (2014) Thermal storage and transport properties of rocks: thermal conductivity and diffusivity. *Encyclopedia of Solid Earth. Geophysics.* :1431-1449.

- Coalition Canadienne de l'Énergie Géothermique (2010) The state of the Canadian geothermal heat pump industry 2010: industry survey and market analysis. Rapport interne, Coalition Canadienne de l'Énergie Géothermique, Montréal, Canada, 72 pages.
- Comeau F-A, Kirkwood D, Malo M, Asselin E & Bertrand R (2004) Taconian mélanges in the parautochthonous zone of the Québec Appalachians revisited: Implications for foreland basin and thrust belt evolution. *Canadian Journal of Earth Sciences* 41(12):1473-1490.
- Comeau F-A, Bédard K & Malo M (2013) Lithostratigraphie standardisée du bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent basée sur l'étude des diagraphies. Rapport interne, INRSCO2-2013-V1.4, Institut national de la recherche scientifique, Québec, Canada, 201 pages.
- Côté J, Masoumifard V & Noreau É (2012) Optimizing the thermal conductivity of alternative geothermal grouts. 65th Canadian Geotechnical Conference, Winnipeg, Canada.
- Currie K (1987) The Mont Saint Hilaire plutonic complex: occurrence of excess ^{40}Ar and short intrusion history: Discussion. *Canadian Journal of Earth Sciences* 24(2):380-381.
- Decagon Services (2016) KD2 Pro Thermal Properties Analyzer. Manuel d'instruction, Decagon Services, Pullman, États-Unis. Disponible sur l'Internet : http://manuals.decagon.com/Manuals/13351_KD2%20Pro_Web.pdf
- Dehkordi SE & Schincariol RA (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.
- Diersch, Bauer D, Heidemann W & Schatzl P (2010) FEFLOW- White papers. Vol V. DHI-WASY GmbH, Berlin, Allemagne, 5:5-94.
- Diersch. HJG, Bauer D, Heidemann W, Rühaak W & Schätzl P (2011) Finite element modelling of borehole heat exchanger systems. Part 2. Numerical simulation. *Computers & Geosciences* 38(8):1136-1147.

- Eskilson P & Claesson J (1988) Simulation model for thermally interacting heat extraction boreholes. *Numerical Heat Transfer* 13(2):149-165.
- Ferguson G (2015) Screening for heat transport by groundwater in closed geothermal systems. *Groundwater* 53(3):503-506.
- Fetter CW (2001) *Applied Hydrogeology*. Prentice Hall, 4th edition, Upper Saddle River, États-Unis, 621 pages.
- Foland K, Gilbert LA, Sebring CA & Jiang-Feng C (1986) ⁴⁰Ar/³⁹Ar ages for plutons of the Montereian Hills, Quebec: Evidence for a single episode of Cretaceous magmatism. *Geological Society of America Bulletin* 97(8):966-974.
- Foster J & Symons D (1979) Defining a paleomagnetic polarity pattern in the Montereian intrusives. *Canadian Journal of Earth Sciences* 16(9):1716-1725.
- Fujimoto M, Fujii H, Nagano K & Hiromatsu A (2011) Numerical modelling of large-scale cluster of vertical ground heat exchangers. *Geothermal Resources Council Transactions* 35:1101-1105.
- Globensky, Y. (1987) *Géologie des Basses-Terres du Saint-Laurent*. Ministère de l'Énergie et des Ressources. Rapport public, MM 85-02, Québec, Canada, 63 pages.
- Hackel S & Pertzborn A (2011) Effective design and operation of hybrid ground-source heat pumps: Three case studies. *Energy and Buildings* 43(12):3497-3504.
- Hellström G (1989) Duct ground heat storage model, manual for computer code. Thèse de doctorat, Department of Mathematical Physics, University of Lund, Lund, Suède, 89 pages.
- Hellström G (1991) Ground heat storage: thermal analyses of duct storage systems. Rapport interne, Lund University, Lund, Suède, 278 pages.
- Hibbard JP, Van Staal CR & Rankin DW (2007) A comparative analysis of pre-Silurian crustal building blocks of the northern and the southern Appalachian orogen. *American Journal of Science* 307(1):23-45.

- Hirsch J (2004) Building energy use and cost analysis program. Rapport public, Berkeley National Laboratory, Berkeley, États-Unis, 9 pages.
- Hodgson CJ (1969) Montereian dike rocks. Thèse de doctorat, McGill University, Montréal., Canada, 187 pages.
- Julien PS & Hubert C (1975) Evolution of the Taconian orogen in the Quebec Appalachians. *Am. J. Sci.* 275:337-362.
- Konstantinovskaya E, Claprood M, Duchesne MJ, Malo M, Bédard K, Giroux B, Massé L & Marcil J-S (2010a) Preliminary geological and geophysical study of a potential CO₂ storage site in deep saline aquifers of the Bécancour area, St. Lawrence Lowlands, Québec. GeoCanada Conference, Calgary, Canada.
- Konstantinovskaya E & Malo M (2010b) Lithostratigraphie et structure des Basses-Terres du Saint-Laurent dans les régions de Joliette, de Trois-Rivières et de Nicolet (Étude de terrain). Rapport interne, INRSCO₂-2010-V2.2, Institut national de la recherche scientifique, Québec, Canada, 77 pages.
- Konstantinovskaya E, Rodriguez D, Kirkwood D, Harris L & Thériault R (2009) Effects of basement structure, sedimentation and erosion on thrust wedge geometry: an example from the Quebec Appalachians and analogue models. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology* 57(1):34-62.
- Lavoie D (1994) Diachronous tectonic collapse of the Ordovician continental margin, eastern Canada: comparison between the Quebec Reentrant and St. Lawrence Promontory. *Canadian Journal of Earth Sciences* 31(8):1309-1319.
- Lavoie D, Burden E & Lebel D (2003) Stratigraphic framework for the Cambrian Ordovician rift and passive margin successions from southern Quebec to western Newfoundland. *Canadian Journal of Earth Sciences* 40(2):177-205.
- Leblanc, Y (2012) Analyse d'un essai de réponse thermique - Ville de Carignan. Rapport interne, Richelieu Hydrogéologie, Richelieu, Canada, 12 pages.

<

Canadian Journal of Earth Sciences 40(2):221-235.

- Pasquale V, Verdoya M & Chiozzi P (2015) Measurements of rock thermal conductivity with a Transient Divided Bar. *Geothermics* 53:183-189.
- Rankin DW (1976) Appalachian salients and recesses: Late Precambrian continental breakup and the opening of the Iapetus Ocean. *Journal of Geophysical Research* 81(32):5605-5619.
- Raymond J & Lamarche L (2013) Simulation of thermal response tests in a layered subsurface. *Applied Energy* 109:293-301.
- Raymond J, Malo M, Tanguay D, Grasby S & Bakhteyar F (2015) Direct utilization of geothermal energy from coast to coast: a review of current applications and research in Canada. *World Geothermal Congress, Melbourne, Australie.*
- Raymond J, Sirois C, Nasr M & Malo M (2017) Evaluating the geothermal heat pump potential from a thermostratigraphic assessment of rock samples in the St. Lawrence Lowlands, Canada. *Environmental Earth Sciences* 76(2):83.
- Remund CP (1999) Borehole thermal resistance: laboratory and field studies. *ASHRAE transactions* 105 (1999):439.
- Renaud B (2013) Évaluation de la conductivité du sol - École Carignan-Salières. Rapport interne, Géo-énergie, Boucherville, Canada, 21 pages.
- Rühaak W, Renz A, Schätzl P & Diersch H (2010) Numerical Modelling of Geothermal Applications. *World Geothermal Congress. Bali, Indonésie.*
- Saull V, Clark T, Doig R & Butler R (1962) Terrestrial heat flow in the St. Lawrence lowland of Quebec. *Can. Mining Met. Bull* 55(598):92-95.
- Séjourné S, Dietrich J & Malo M (2003) Seismic characterization of the structural front of southern Quebec Appalachians. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology* 51(1):29-44.
- Smith G (1956) Intermittent grounds grids for heat pumps. *Heating, Piping & Air Conditioning. ASHRAE journal section* 28(6):129.


Tanguay D (2014) The top 10 challenges of the Canadian ground source heat pump industry. Présentation, The 7th Geothermal Heat Pump Business and Policy Forum, Montréal, Canada.

Thomas WA (2006) Tectonic inheritance at a continental margin. *GSA Today* 16(2):4-11.

Trefry MG & Muffels C (2007) FEFLOW: A Finite-Element Ground Water Flow and Transport Modelling Tool. *Ground Water* 45(5):525-528.

Williams H (1979) Appalachian orogen in Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences* 16(3):792-807.

ANNEXE



**Rapport de terrain :
Observations
géologiques près de
l'École Carignan-
Salières.**

Remerciements

Je remercie en premier lieu mon professeur Jasmin Raymond, qui a encadré ce travail et a mené à ce résultat. Il a travaillé dur avec moi.

Je remercie également M. Michel Malo, professeur à l'INRS-ETE qui a passé une journée avec nous sur le terrain. Il nous a beaucoup aidés sur le plan tectonique et lithostratigraphique, il est l'expert de la région.

Je remercie également M. Serge Lefebvre et Mme. Sonia Lacroix, des personnels de la carrière Eurovia Vinci, pour leur collaboration et leur patience.

Table des matières

Liste des figures	89
Liste des tableaux.....	89
I. Introduction	90
I. Présentation de la région de Carignan	92
II.1. Situation géographique	92
II.2. Contexte géologique de la région	92
II. Observations sur le terrain.....	94
III. Analyse des données de terrain	99
IV.1. Mesure de la conductivité thermique des échantillons	99
IV.2. Calcul du gradient hydraulique	103
IV. Modèle géologique conceptuel.....	106
V. Synthèse et conclusion générale	108
VI. Références bibliographiques.....	109

I. Liste des figures

Figure 1. Une image de la cours et des puits géothermiques dans la salle mécanique de l'École Carignan-Salières.....	91
Figure 2. Situation géographique de l'école Carignan-Salières.....	92
Figure 3. Colonne stratigraphique des Basses Terre du Saint Laurent (Comeau <i>et al.</i> , 2004, Globensky, 1987).....	93
Figure 4. Localisation géographique de l'école Carignan-Salières.	94
Figure 5. Photo du lac artificiel dans la carrière active.....	96
Figure 6. Photo du bloc de sédiments à intercalations de shale et de calcarénite.....	96
Figure 7. Photo du bloc de sédiments à intercalations de shale et de calcarénite.....	97
Figure 8. Photo du bloc de shale affleurant dans la paroi Est de la carrière active.	97
Figure 9. Échantillon de shale gris foncé à crinoïdes.	98
Figure 10. Photo d'un dyke dans l'une des parois de la carrière composée de shale.	98
Figure 11. Schéma explicatif de la disposition de la sonde à aiguille pour l'analyse de la conductivité thermique(C-Therm technologies, 2016).	100
Figure 12. Image de la sonde à aiguille et des échantillons.....	100
Figure 13. Schéma explicatif pour analyse de la conductivité thermique avec la méthode de la plaque chauffante transitoire (C-Therm technologies, 2016).	102
Figure 14. Écoulement en nappe libre avec recharge (Fetter, 2001)	103
Figure 15. Surface piézométrique calculée entre le ruisseau et les carrières.....	104
Figure 16. Modèle géologique conceptuel.....	107

II. Liste des tableaux

Tableau 1. Les niveaux d'eau mesurés dans les lacs des carrières.	99
Tableau 2. Conductivité thermique des échantillons de dyke évaluée avec la sonde à aiguille.	101
Tableau 3. Conductivité thermique mesurée avec la méthode de plaque chauffante.	102
Tableau 4. Les scénarios de sensibilité du gradient hydraulique calculé en fonction des variations de la conductivité hydraulique et de la recharge.....	105

I. Introduction

Les travaux de terrain que résume ce rapport sont dans le cadre d'un projet de maîtrise en sciences de la Terre à l'Institut national de la recherche scientifique- Centre Eau Terre Environnement. Le projet concerne un système géothermique installé à l'école Carignan-Salières (Figure 1a) pour assurer les besoins du chauffage et de climatisation du bâtiment en opération depuis 2013. Ce système est formé de 31 puits verticaux forés sous la cours de l'école d'une profondeur d'environ 152 m. Chaque puits est conçu avec un tuyau en U tenu par des entretoises géothermiques et un fluide caloporteur circule dans la boucle fermée (Figure 1b).

Les forages ont intercepté des unités de roc fracturé qui laissait entrevoir un écoulement d'eau souterraine important et les puits ont été remplis par des sables d'olivine synthétique au lieu d'un coulis formé des sables de quartz et de bentonite. Cette conception n'était pas prévue dans les plans initiaux.

En plus de changement des matériaux de remplissage des puits, il s'est avéré que l'écoulement des eaux souterraines en dessous de l'école est variable à cause d'une carrière voisine qui pompe de l'eau dans l'un de ses lacs.

Le changement des matériaux de remplissage ainsi que l'écoulement souterrain variable rendent l'étude de sous-surface de l'école indispensable afin de mieux évaluer à court et à long termes la performance des échangeurs de chaleur du système géothermique.

A environ 500 m, la carrière d'Eurovia Vinci est installée à côté de l'école avec ses deux lacs artificiels et présente le meilleur endroit pour étudier la géologie de la subsurface.

Trois visites ont été faites sur le terrain au mois de juillet 2016. Les observations de terrain et les analyses associées sont développées dans ce rapport.



Figure 23. Une image de la cours et des puits géothermiques dans la salle mécanique de l'École Carignan-Salières.

I. Présentation de la région de Carignan

III. II.1. Situation géographique

L'école Carignan-Salière est située sur la Rive Sud de Montréal en Montérégie, dans la ville de Carignan. Ses coordonnées géographiques sont 45°27'44.83''N et 73° 20'35.86''O (figure 2).



Figure 24. Situation géographique de l'école Carignan-Salières.

IV. II.2. Contexte géologique de la région

L'école Carignan-Salières se situe dans les Basses-Terres du Saint-Laurent (BTSL) qui fait partie de la province géologique de la plate-forme du Saint Laurent (Bédard *et al.*, 2011, Brisebois *et al.*, 1994). Les séries sédimentaires des BTSL représentent un cycle complet de transgression/régression marine et est composée des séries de bassin de rift et de marge passive du Cambrien - Ordovicien inférieur à moyen et des séries de bassin d'avant pays de l'Ordovicien moyen à supérieur (Comeau *et al.*, 2004, Globensky, 1987, Julien *et al.*, 1975, Lavoie *et al.*, 2003, Williams, 1979). L'épaisseur totale des BTSL peut atteindre plus de 3000 m à certains endroits reposant sur le socle de Grenville.

L'école Carignan-Salières est construite sur la Formation Nicolet qui appartient au Groupe de Lorraine (Figure 3). Ce dernier est formé des formations de Nicolet et de Pontgravé d'âge Ordovicien moyen à tardif.

La Formation de Nicolet est constituée par des alternances d'argiles grises fissiles siliceuses, de silts argileux et de grès quartzeux feldspathiques à matrice calcareuse. Vers le sommet, on note la

présence des calcaires gréseux. Les sédiments sont en forme de lentilles avec une diminution d'épaisseur en fonction de la présence des chenaux et des turbidites témoignant d'un milieu marin profond (Konstantinovskaya *et al.*, 2010b).

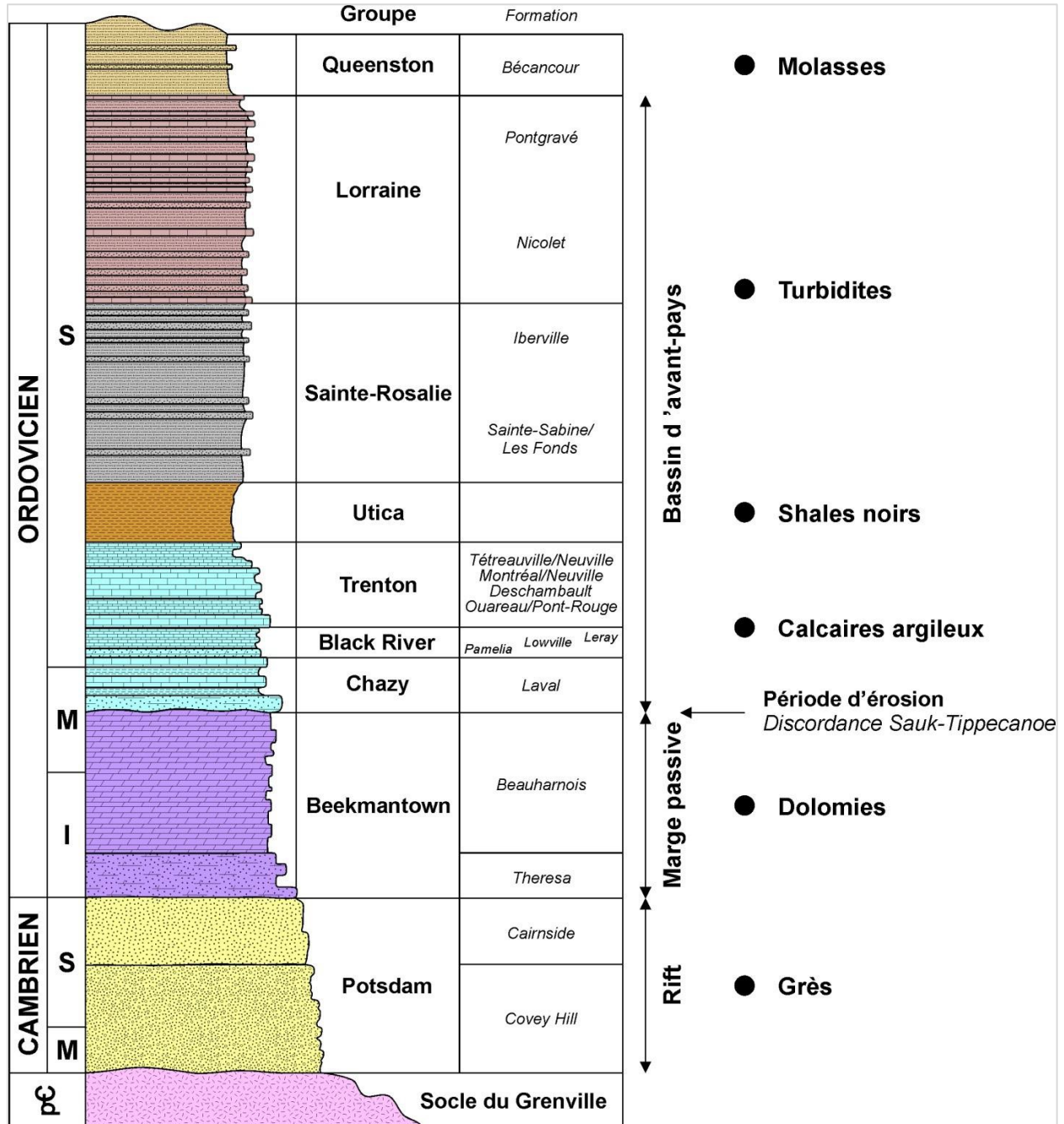


Figure 18. Colonne stratigraphique des Basses Terre du Saint Laurent (Comeau *et al.*, 2004, Globensky, 1987).

La région montérégienne a été affectée par une série de failles normales s'étendant du SW vers le NE et inclinées vers le SE (Castonguay *et al.*, 2010, Konstantinovskaya *et al.*, 2010a, Séjourné *et al.*, 2003). Ces failles se sont formées pendant l'ouverture de l'océan Iapetus au Protérozoïque-Cambrien précoce (Hibbard *et al.*, 2007, Rankin, 1976, Thomas, 2006). Les mesures effectuées sur le terrain ont mis en évidence une distension NW-SE responsable du jeu normal des failles bordant la région suivie par une compression responsable du jeu inverse des failles. En plus de la fracturation des séries sédimentaires, la Montérégie a subi des intrusions menant à une série de plutons reliés à des **dykes (gabbro)** orientés EW coupant les différentes séries litho stratigraphiques de la région (Currie, 1987, Foland *et al.*, 1986, Foster *et al.*, 1979). La majorité des dykes dans la région sont sub-verticaux ayant une épaisseur variant entre 0.5 et 2 m avec quelques dykes de 20 m d'épaisseur (Hodgson, 1986).

II. Observations sur le terrain

La carrière Eurovia Vinci, localisée à moins de 500 m de l'école Carignan-Salières, comprend deux excavations (Figure 4) : la première, juste à côté de l'école est issue d'une carrière abandonnée. La deuxième à environ 1 km est au fond et constitue une carrière fonctionnelle où on pompe l'eau qui s'infiltré.



Figure 19. Localisation géographique de l'école Carignan-Salières.

Le niveau d'eau de la carrière abandonnée (la plus proche de l'école) est proche du niveau du sol. Le roc n'affleure pas et l'excavation est entourée de sols argileux. La deuxième carrière est dans

une cavité de roc massif (Figure 5). Le niveau d'eau maintenue au fond de la carrière affecte l'écoulement d'eau souterraine.

Les parois de la carrière active montrent différentes lithologies :

- Dans la partie Ouest de la carrière, un bloc de shale massif déposé en intercalation avec des lits centimétriques (5 cm) de calcarénite faisant une épaisseur totale approximative de 5 m (Figure 6). Les shales ainsi que les calcarénites sont beiges en patine et gris clairs en cassure fraîche. Les shales ont l'aspect feuilleté, et sont très friables (figure 7). La rythmicité des shales et des calcarénites montrent un environnement de dépôt peu profond ayant subi des phases successives de régression et de transgression.
- Vers l'EST de la carrière, un bloc de shale massif affleure, mais cette fois-ci il s'agit des shales affleurant seuls en patine grise et de cassure fraîche gris foncé faisant une épaisseur totale approximative de 8 m (Figure 8). Les shales sont aussi friables et contiennent des crinoïdes (Figure 9). Ces derniers sont longs, atteignant une vingtaine de centimètres dans certains échantillons (Figure 9), ce qui témoigne d'un environnement de déposition dans une tranche d'eau calme et plus profonde par rapport à l'environnement de dépôt des autres shales à intercalations de calcarénite. Les shales à intercalations de calcarénite se sont déposés au-dessus des shales massifs, ce qui explique que les shales massifs se sont déposés dans une tranche d'eau plus profonde par rapport aux shales à intercalations qui se sont déposés sur le dessus dans une tranche d'eau moins profonde, ou de ce qui reste de la tranche d'eau initiale.

Dans les shales, on note l'intrusion du gabbro (Figure 10) qui est issu de la cristallisation du magma, voir II.2. Les gabbros sont de couleur grise foncée en patine et en cassure. Ils sont très durs, tels que le personnel de la carrière doit utiliser un concasseur spécial pour les broyer.



Figure 20. Photo du lac artificiel dans la carrière active.

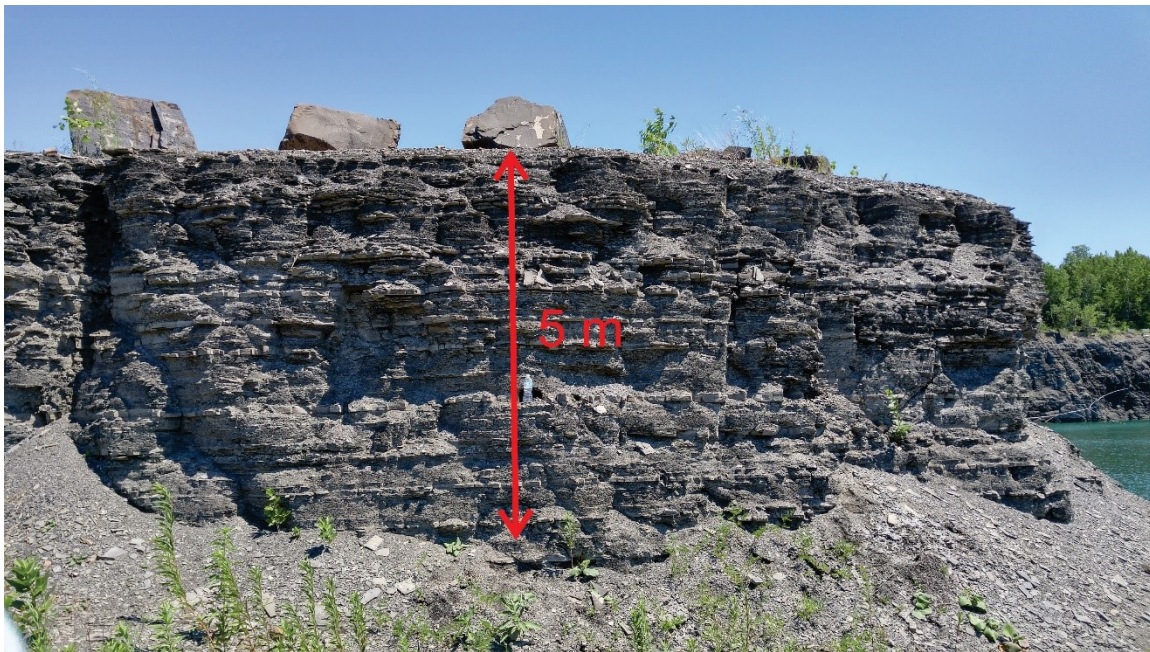


Figure 21. Photo du bloc de sédiments à intercalations de shale et de calcarénite.

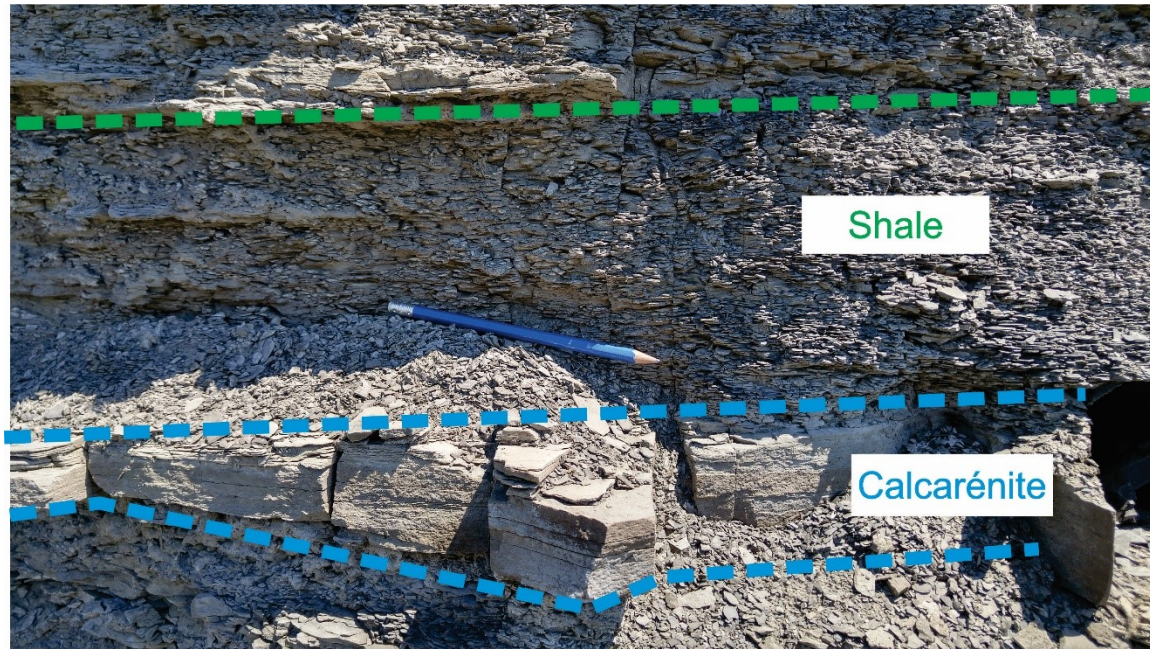


Figure 22. Photo du bloc de sédiments à intercalations de shale et de calcarénite.

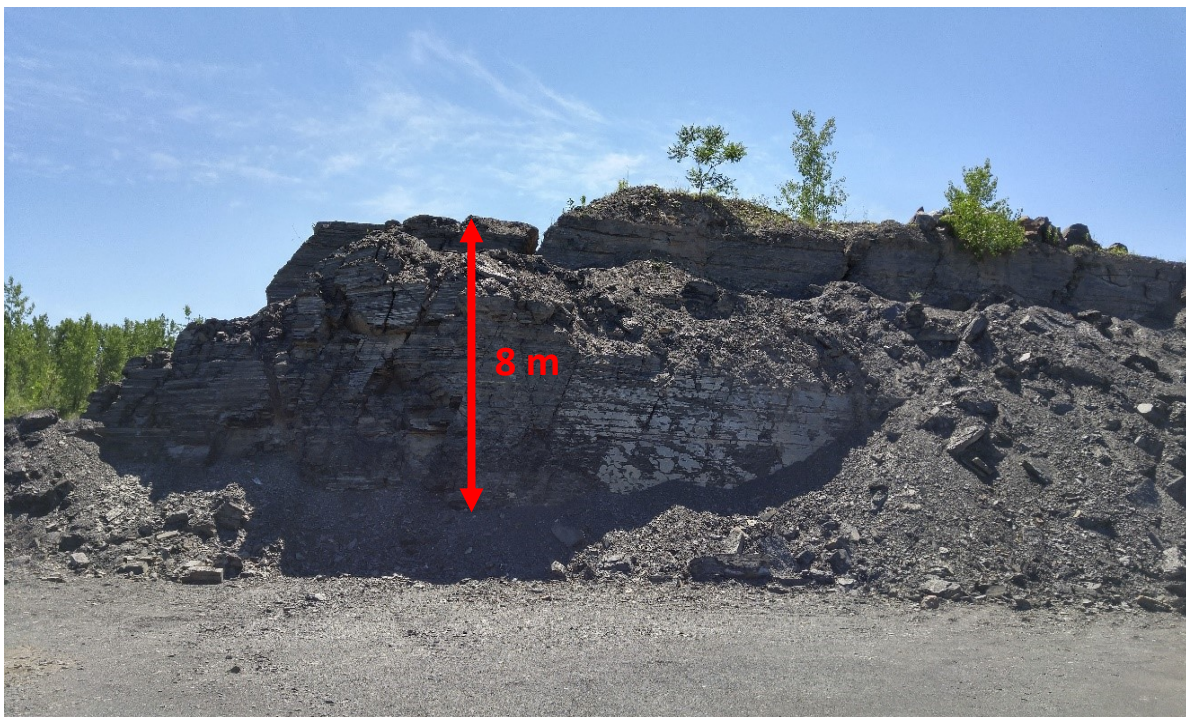


Figure 23. Photo du bloc de shale affleurant dans la paroi Est de la carrière active.



Figure 31. Échantillon de shale gris foncé à crinoïdes.

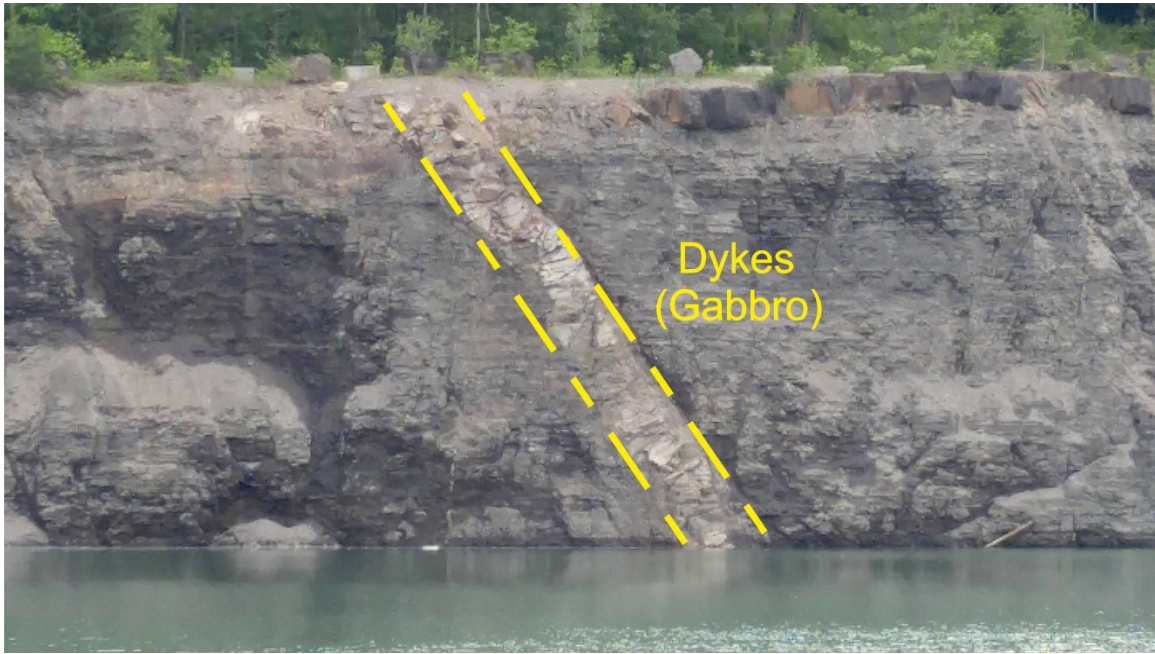


Figure 25. Photo d'un dyke dans l'une des parois de la carrière composée de shale.

Des mesures de niveau d'eau dans les deux lacs ont été réalisées à l'aide d'un GPS lors de la sortie de terrain dans le but d'évaluer le gradient hydraulique au site de la carrière et dans les environs (Tableau 1).

Tableau 1. Les niveaux d'eau mesurés dans les lacs des carrières.

	Lac 1*	Lac 2
Niveau d'eau (m au-dessus du niveau de la mer)	21	-3

* Le lac 1 est dans la carrière non exploitée à côté de l'école.

III. Analyse des données de terrain

V. IV.1. Mesure de la conductivité thermique des échantillons

Des mesures de conductivité thermique ont été réalisées avec deux méthodes différentes; celle de la sonde à aiguilles (Decagon services, 2016) et de la plaque chauffante transitoire (C-Therm technologies, 2016). La sonde à aiguille a été utilisée pour les échantillons de roc massif alors que la plaque chauffante a été utilisée pour les échantillons de roc friable.

Trois échantillons de roches provenant des dykes affleurant dans différentes localités de la carrière ont été analysés avec la sonde à aiguille. Les échantillons ont au préalable été coupés avec une scie et troués avec une perceuse pour y insérer l'aiguille (Figure 11) chauffante et immergés 24 h dans de l'eau avant d'entamer les mesures.

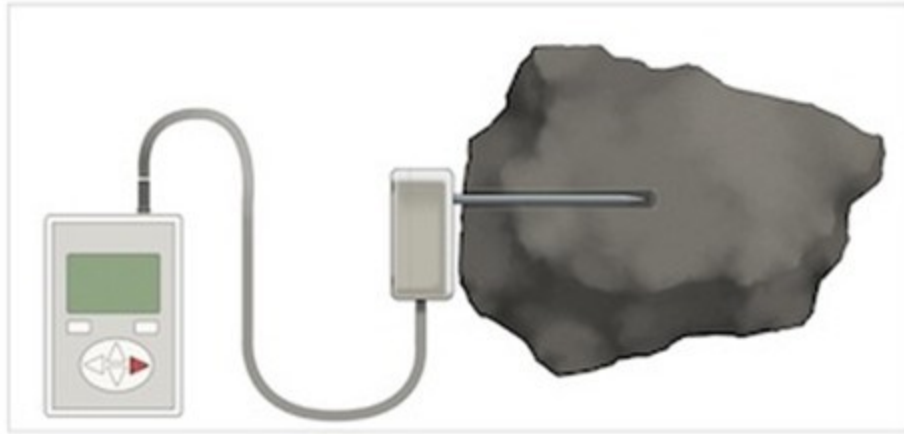


Figure 26. Schéma explicatif de la disposition de la sonde à aiguille pour l'analyse de la conductivité thermique(C-Therm technologies, 2016).

Une mesure de conductivité thermique avec la sonde à aiguille est d'abord effectuée sur un étalon dont on connaît exactement sa conductivité thermique (Figure 12). Une série de mesures consécutives à raison d'une mesure par heure est ensuite effectuée sur l'échantillon. Enfin, une mesure additionnelle de l'étalon est effectuée pour corriger les mesures effectuées sur l'échantillon de roc. Les mêmes étapes ont été répétées pour les trois échantillons de dyke.



Figure 27. Image de la sonde à aiguille et des échantillons

Les conductivités thermiques mesurées contiennent des erreurs mineures relatives dues généralement aux conditions de mesures (stabilité de la température, étalonnage de l'appareil, sensibilité de la sonde...) et qui devraient être corrigées à travers le calcul d'un facteur de correction, en fonction de la conductivité thermique de l'étalon fournie dans le manuel d'utilisation de la sonde à aiguille.

Le facteur de correction se calcule selon la formule suivante :

$$\frac{\lambda_{mesuré} - \lambda_{matériel}}{\lambda_{matériel}} = \text{facteur de correction}$$

Le facteur de correction est appliqué à toutes les mesures effectuées sur l'échantillon :

$$\lambda_{corrigé} = \lambda_{mesuré} * (1 - \text{facteur de correction})$$

Tableau 2. Conductivité thermique des échantillons de dyke évaluée avec la sonde à aiguille.

Conductivité thermique échantillon 1	1,93 (W/m K)
Conductivité thermique échantillon 2	1,84 (W/m K)
Conductivité thermique échantillon 3	1,86 (W/m K)

Les échantillons de dykes prélevés ont une faible conductivité thermique qui est probablement due à la minéralogie de ces roches intrusives : le gabbro.

Six échantillons de shale, un échantillon de calcarénite et deux échantillons de dykes ont été analysés avec la méthode de la plaque chauffante. Les shales sont très friables et leur mesure de conductivité thermique par la sonde à aiguille n'est pas possible. Les échantillons ont été coupés avec une scie en sections polies puis envoyés au laboratoire d'analyse Groupe CTT.

Les échantillons des dykes, des shales et de calcarénite prélevés lors des travaux de terrain ont été immergés 48 h dans de l'eau distillée avant de les placer sur la plaque chauffante. Le principe de l'analyse est de mettre une surface polie du roc sur la plaque chauffante (Figure 13) et d'évaluer la conductivité thermique du roc selon l'augmentation de température en régime transitoire. La plaque chauffante, sous forme d'un disque, joue le rôle de la source de chaleur et du thermostat. La conductivité thermique est déterminée en analysant l'évolution temporelle de la tension entre les bornes de résistance électrique du thermostat (C-Therm technologies, 2016).



Figure 28. Schéma explicatif pour analyse de la conductivité thermique avec la méthode de la plaque chauffante transitoire (C-Therm technologies, 2016).

Les résultats ont montré que les shales massifs (SM) ont une conductivité thermique moyenne variant de 1.9 à 2.9 W/m K (Tableau 3). Les shales clairs (SI) ont une conductivité thermique homogène avec une conductivité thermique moyenne de 2.9 W/m K. L'échantillon de calcarénite (CALC) a la conductivité thermique la plus élevée, soit 3.5 W/m K. Les deux échantillons de dyke ont montré une conductivité thermique faible semblable aux résultats obtenus avec la sonde à aiguille.

Tableau 3. Conductivité thermique mesurée avec la méthode de plaque chauffante.

	Numéro de l'échantillon	Conductivité thermique (W/m K)
SM*	1	2.321
	2	2.968

	3	1.972
SI*	1	2.791
	2	2.911
	3	2.851
CALC*		3.582
DYK*	1	2.185
	2	1.456

* Les échantillons SM représentent les shales gris foncés qui affleurent en banc massif dans l'une des parois de la carrière active (Figure 8 et 9). Les échantillons SI représentent les shales clairs (Figures 6 et 7) qui affleurent en intercalations avec des calcarénites (CALC). Les échantillons DYK représentent les échantillons de dykes prélevés dans l'une des parois de la carrière (Figure 10).

VI. IV.2. Calcul du gradient hydraulique

Un régime d'écoulement permanent dans une nappe libre avec recharge a été considéré pour calculer le niveau de la nappe et le gradient hydraulique au site de l'école Carignan-Salières (Figures 14 et 15).

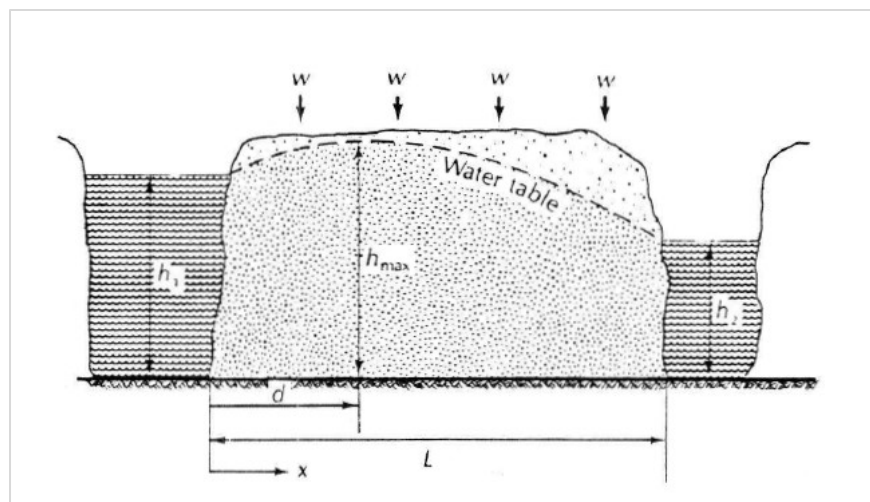


Figure 29. Écoulement en nappe libre avec recharge (Fetter, 2001)

Une distance L de 2800 m qui sépare la carrière active et un ruisseau au-delà de la ligne de partage des eaux souterraines a été considérée pour calculer l'élévation de la nappe entre ces deux points de mesure de charge hydraulique selon :

$$h^2 = h_1^2 - \frac{(h_1^2 - h_2^2)}{L} + \frac{w}{k}(L - x) x$$

Dans ce calcul, h_2 représente le niveau d'eau au fond de la carrière active alors que h_1 représente le niveau d'eau dans le ruisseau. Les paramètres de conductivité hydraulique et de recharge ont été ajustés de façon à reproduire la charge hydraulique mesurée au niveau de la carrière abandonnée. ; Une conductivité hydraulique de 10^{-5} m s^{-1} variant de $10^{-3.8}$ à $10^{-6.5} \text{ m.s}^{-2}$ ainsi qu'une recharge moyenne annuelle de $100.1 \text{ mm an}^{-1} \pm 9.4 \%$ sont prises en comptes selon les résultats dévoilés dans le rapport PACES (Carrier *et al.*, 2013). Les valeurs de conductivité hydraulique et de recharge ont été ajustées pour reproduire le niveau d'eau au niveau de la carrière abandonnée et ont été variées dans une étude de la sensibilité de ces paramètres et de leurs influences sur le gradient hydraulique. D'après le calcul, le gradient hydraulique horizontal au niveau du champ géothermique de l'école Carignan Salière est de l'ordre 0.01 m/m .

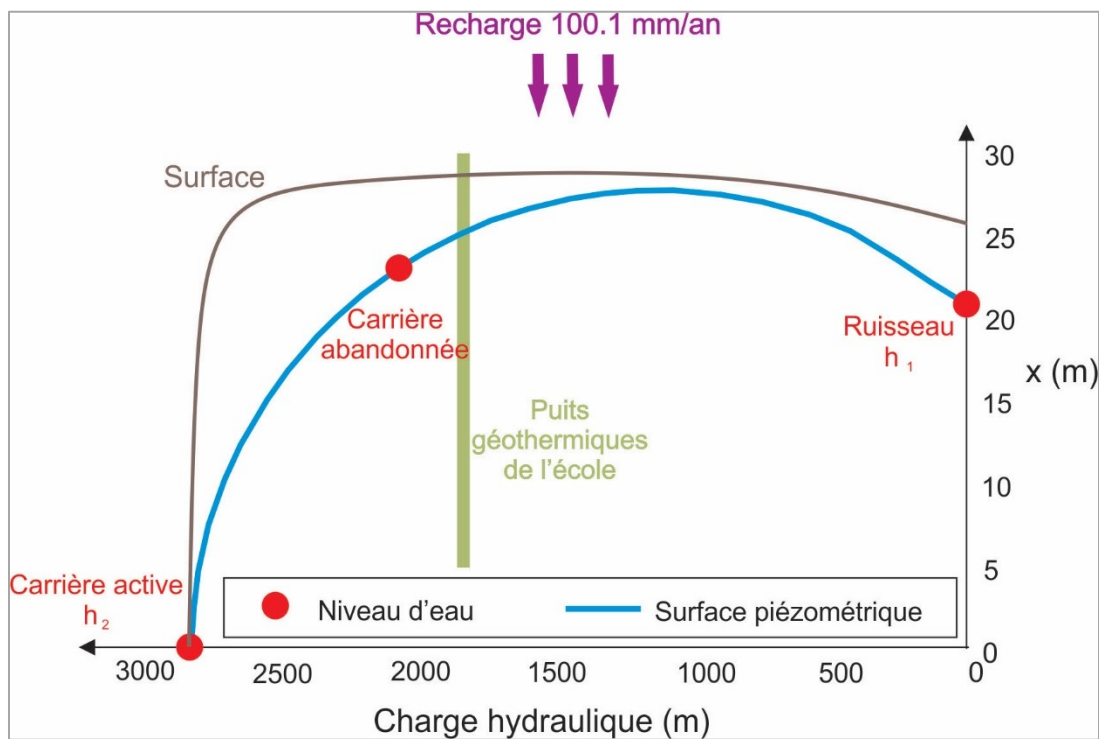


Figure 30. Surface piézométrique calculée entre le ruisseau et les carrières.

Une étude de sensibilité a été effectuée dans le but d'évaluer l'impact de la conductivité hydraulique et de la recharge sur la surface piézométrique et le gradient hydraulique. Les résultats de calcul ont montré que le niveau d'eau dans la carrière non exploitée peut varier de 13 m à plus de 24 m lorsque les conductivités hydraulique et recharges minimales et maximales proposées dans le rapport PACES sont utilisées.

En baissant significativement la recharge moyenne annuelle et légèrement la conductivité hydraulique, une chute approximative de 4 m est notée dans la carrière abandonnée par rapport au niveau d'eau dans le cas initial. Le gradient hydraulique est maintenu de 0.01 m m⁻¹.

Néanmoins, une baisse de la conductivité hydraulique et une élévation de la recharge moyenne annuelle entraînent une baisse de 3.8 m du niveau d'eau dans la carrière m et un gradient hydraulique de 0.01 m m⁻¹ aussi.

Cependant, la baisse de la conductivité hydraulique et de la recharge moyenne annuelle à la fois montrent une baisse significative de 10.97 m du niveau dans la carrière abandonnée avec un gradient hydraulique de 0.01 m m⁻¹ aussi. Par contre, l'élévation de la conductivité hydraulique et la diminution de la recharge moyenne annuelle donnent une baisse aussi du niveau d'eau dans le lac abandonné aussi, ce qui montre que la conductivité hydraulique a le plus grand impact sur les variations du niveau d'eau et moins sur le gradient hydraulique.

Les variations de la conductivité hydraulique ainsi que la recharge moyenne annuelle ont un impact majeur sur le niveau d'eau mais un impact mineur le gradient hydraulique qui demeure de proche de 0.01 m m⁻¹.

Tableau 4. Les scénarios de sensibilité du gradient hydraulique calculé en fonction des variations de la conductivité hydraulique et de la recharge.

Scénarios	Conductivité hydraulique (m s ⁻¹)	Recharge (mm an ⁻¹)	Niveau d'eau calculé à la carrière inactive (m)	Niveau d'eau observé à la carrière active (m)	Différence de niveau d'eau	Gradient hydraulique à l'école (m m ⁻¹)

Meilleur	$10^{-4.935}$	100.1	20.73	-3	23.73	0.0083
K ↘ R ↘	10^{-5}	90.7	21.21	-3	23.21	0.0085
K ↘ R ↗	$10^{-4.94}$	109.5	21.70	-3	21.70	0.0086
K ↗ R ↗	$10^{-4.5}$	100.3	14.53	-3	17.53	0.0063
K ↗ R ↘	$10^{-4.5}$	95	13.69	-3	16.69	0.0063

IV. Modèle géologique conceptuel

Un modèle géologique conceptuel à l'échelle a été élaboré à partir des données de terrain, des travaux antérieurs réalisés dans la région de Carignan et des données fournies dans les rapports de forage des puits géothermiques de l'école Carignan-Salières (Figure 16).

Le modèle est d'une longueur totale de 2800 m, représentant la distance entre le ruisseau et la carrière active, incluant l'école avec son champ de puits géothermiques ainsi que la carrière abandonnée. Les profondeurs des lacs artificiels et du ruisseau sont approximatifs parce que seulement des mesures du niveau d'eau par rapport au niveau zéro de la mer ont été réalisées.

Par ailleurs, les épaisseurs des dépôts meubles dans le modèle géologique conceptuel ont été définis selon le rapport de forage des puits géothermiques de l'école Carignan-Salières (Leblanc, 2012).

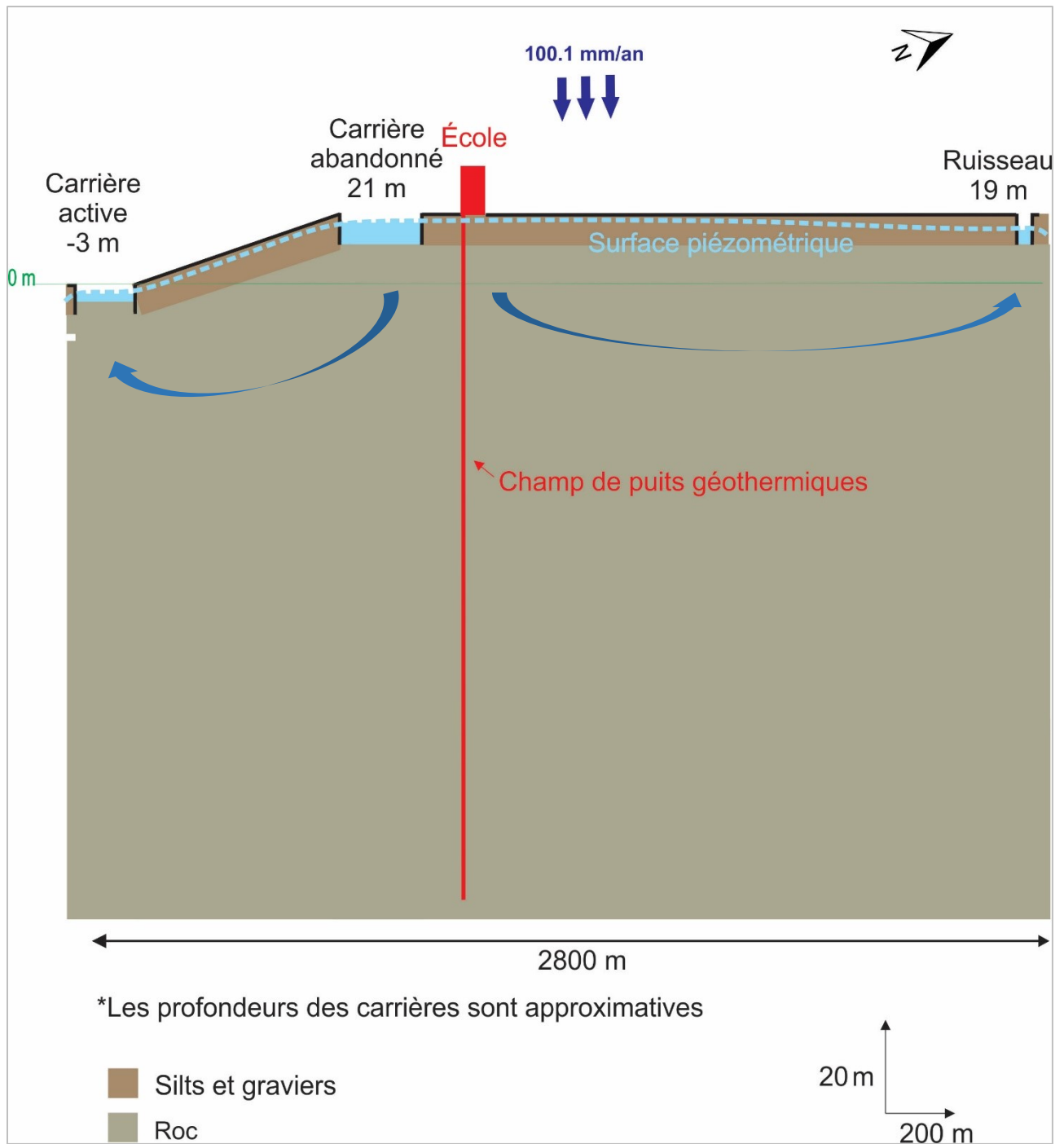


Figure 31. Modèle géologique conceptuel.

V. Synthèse et conclusion générale

Des visites à la carrière Eurovia Vinci ont permis d'étudier la stratigraphie du roc, les propriétés thermiques et le contexte hydrogéologique aux environs de l'École Carignan-Salières.

Les parois de la carrière ont montré l'existence de lithologies de shale. La première à des intercalations centimétriques de calcarénites déposés dans une tranche d'eau plus au moins profonde et plus récente que la deuxième qui est composée de banc de shales à crinoïdes déposés dans une tranche d'eau plus profonde. Des dykes sub-verticaux entrecoupent la séquence de roches sédimentaires.

Selon les mesures par la sonde à aiguille, les dykes ont une faible conductivité thermique.

Les analyses par la méthode de plaque chauffante ont montré que les shales clairs à intercalations avec des calcarénites ont une conductivité thermique assez homogène d'une moyenne de 2.85 W/m K alors que les shales foncés massifs ont une conductivité thermique moyenne de 2.644 W/m K. L'échantillon de calcarénite a montré une conductivité thermique de 3.58 W/m K au contraire des gabbros qui ont une conductivité thermique moyenne de 1.82 W/m K. En combinant les données de mesure de conductivité thermique par les méthodes de plaque chauffante et de la sonde aiguille, les dykes ont une conductivité thermique moyenne de 1.85 W/m K.

Un gradient hydraulique horizontal de 0.01 m/m a été évalué au niveau du champ de puits géothermiques au niveau de l'école Carignan-Salières entre la carrière active et un ruisseau définissant une ligne de partage des eaux souterraines sur une distance de 2800 m.

L'étude de sensibilité a montré que le niveau d'eau dans la carrière abandonnée est plus sensible à la conductivité hydraulique qu'à la recharge moyenne annuelle mais ces deux paramètres physiques n'ont pas un impact majeur sur le gradient hydraulique qui se maintient près de 0.01 m/m malgré les variations.

Le modèle géologique conceptuel illustre les conditions géologiques et hydrogéologiques au niveau de l'école Carignan-Salières. Ce modèle servira de base à l'élaboration d'un modèle numérique pour simuler le fonctionnement du système géothermique de l'École Carignan-Salières et évaluer la performance des échangeurs de chaleur à long terme considérant l'effet de l'écoulement d'eau souterraine.

VI. Références bibliographiques

- Bédard K, Comeau F-A & Malo M (2011) Évaluation du potentiel de séquestration géologique du CO₂ des bassins sédimentaires du sud du Québec. (INRS-ETE).
- Brisebois D & Brun J (1994) La plate-forme du Saint-Laurent et les Appalaches. *Géologie du Québec, Gouvernement du Québec*:95-120.
- C-Therm technologies (2016) TCi Thermal conductivity Analyzer. (C-Therm technologies Inc, North America), p 6.
- Carrier M-A, Lefebvre R, Rivard C, Parent M, Ballard J-M, Vigneault H & Gloaguen E (2013) *Portrait des ressources en eau souterraine en Montérégie Est, Québec, Canada*.
- Castonguay S, Dietrich J, Lavoie D & Laliberté J-Y (2010) Structure and petroleum plays of the St. Lawrence Platform and Appalachians in southern Quebec: insights from interpretation of MRNQ seismic reflection data. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology* 58(3):219-234.
- Comeau F-A, Kirkwood D, Malo M, Asselin E & Bertrand R (2004) Taconian mélanges in the parautochthonous zone of the Québec Appalachians revisited: Implications for foreland basin and thrust belt evolution. *Canadian Journal of Earth Sciences* 41(12):1473-1490.
- Currie K (1987) The Mont Saint Hilaire plutonic complex: occurrence of excess ⁴⁰Ar and short intrusion history: Discussion. *Canadian Journal of Earth Sciences* 24(2):380-381.
- Decagon services I (2016) *KD2 Pro Thermal Properties Analyzer*. Trademarks, Pullman, USA. 71 p http://manuals.decagon.com/Manuals/13351_KD2%20Pro_Web.pdf (Consulté le Date Accessed)
- Fetter CW (2001) *Applied hydrogeology (4th edition)*. 604 p
- Foland K, Gilbert LA, Sebring CA & Jiang-Feng C (1986) ⁴⁰Ar/³⁹Ar ages for plutons of the Montereian Hills, Quebec: Evidence for a single episode of Cretaceous magmatism. *Geological Society of America Bulletin* 97(8):966-974.
- Foster J & Symons D (1979) Defining a paleomagnetic polarity pattern in the Montereian intrusives. *Canadian Journal of Earth Sciences* 16(9):1716-1725.
- Globensky Y (1987) Géologie des basses-terres du Saint-Laurent. ([Ministère de l'énergie et des ressources], Direction générale de l'exploration géologique et minérale, Direction de la recherche géologique, Service de la géologie, Québec).
- Hibbard JP, Van Staal CR & Rankin DW (2007) A comparative analysis of pre-Silurian crustal building blocks of the northern and the southern Appalachian orogen. *American Journal of Science* 307(1):23-45.
- Hodgson CJ (1986) *Montereian dike rocks*. (McGill University, Montreal). 187 p
- Julien PS & Hubert C (1975) Evolution of the Taconian orogen in the Quebec Appalachians. *Am. J. Sci.* 275:337-362.
- Konstantinovskaya E, Claprod M, Duchesne MJ, Malo M, Bédard K, Giroux B, Massé L & Marcil J-S (2010a) Preliminary geological and geophysical study of a potential CO₂ storage site in deep saline aquifers of the Bécancour area, St. Lawrence Lowlands, Québec. in *GeoCanada 2010* Calgary), p 2.
- Konstantinovskaya E & Malo M (2010b) Lithostratigraphie et structure des Basses-Terres du Saint-Laurent dans les régions de Joliette, de Trois-Rivières et de Nicolet (Étude de terrain). *INRS report R-1151, Québec*.
- Lavoie D, Burden E & Lebel D (2003) Stratigraphic framework for the Cambrian Ordovician rift and passive margin successions from southern Quebec to western Newfoundland. *Canadian Journal of Earth Sciences* 40(2):177-205.

- Leblanc Y (2012) LBHA - Ville de Carignan Analyse d'un essai de réponse thermique. Richelieu), p 12.
- Rankin DW (1976) Appalachian salients and recesses: Late Precambrian continental breakup and the opening of the Iapetus Ocean. *Journal of Geophysical Research* 81(32):5605-5619.
- Séjourné S, Dietrich J & Malo M (2003) Seismic characterization of the structural front of southern Quebec Appalachians. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology* 51(1):29-44.
- Thomas WA (2006) Tectonic inheritance at a continental margin. *GSA today* 16(2):4-11.
- Williams H (1979) Appalachian orogen in Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences* 16(3):792-807.