

Développement d'une approche nouvelle pour les tests de réponse thermique en géothermie

par

François SIMON

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE MÉCANIQUE
M.Sc.A.

MONTRÉAL, LE 06 OCTOBRE 2016

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



François Simon, 2016



Cette licence Creative Commons signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette oeuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'oeuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE:

M. Louis Lamarche, Directeur de Mémoire
Département du génie mécanique, École de technologie supérieure

M. Jasmin Raymond, Co-directeur
Département Centre Eau Terre Environnement, INRS

M. Patrick Terriault, Président du Jury
Département du génie mécanique, École de technologie supérieure

M. Stanislaw Kajl, Examinateur
Département du génie mécanique, École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE "20 SEPTEMBRE 2016"

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

AVANT-PROPOS

Le présent mémoire rentre dans le cadre de l'obtention de la Maîtrise en Génie Mécanique de l'École de Technologie Supérieure. Mon désir étant d'avoir un pied dans le monde industriel tout en étudiant, ce joindre à un projet de recherche est un excellent moyen d'associer les deux. Ayant un cursus spécialisé dans la Thermique et l'Énergétique, et désirant approfondir mes connaissances dans ce domaine, j'ai approché Monsieur Louis Lamarche, professeur au département génie mécanique, spécialisé dans les domaines de la géothermie, des transferts de chaleur et de la simulation de systèmes énergétiques. Par la suite, je me suis joint au projet innovant de Monsieur Jasmin Raymond, professeur à L'INRS, développant une nouvelle approche pour les tests de réponse thermique en géothermie. Ce projet est né de la nécessité d'optimiser la réalisation des tests de réponse thermique trop coûteuse en termes de main-d'oeuvre et d'électricité. Ce mémoire présente le prototype construit afin de réaliser les tests de réponse thermique, les tests qui ont été conduits et la synthèse des résultats.

REMERCIEMENTS

Dans un premier temps, je tiens à remercier *M. Louis Lamarche*, Directeur de recherche et Professeur en génie mécanique, pour sa confiance tout au long de la réalisation de ce projet. Aussi, j'adresse mes remerciements à *M. Jasmin Raymond*, Co-Directeur de recherche pour sa disponibilité, son enthousiasme et pour m'avoir permis de réaliser ce mémoire en temps et en heure. Je remercie tout particulièrement *M. Mario Corbin* et *M. Alain Grimard* pour leurs conseils éclairés, et surtout, leur sympathie qui a contribué à la bonne réalisation de ce projet. J'adresse également mes remerciements à *M. Simon Asselin*, étudiant et collègue, sous la tutelle de *M. Jasmin Raymond* à l'INRS de Québec, qui a pris en charge l'analyse en laboratoire des échantillons recueillis sur le site. Je tiens aussi à remercier les autres membres du jury, soit les professeurs *M. Patrick Terriault* et *M. Stanislaw Kajl* pour le temps consacré à l'évaluation du présent travail. Ce travail est le fruit d'une collaboration étroite avec plusieurs personnes du Département génie mécanique. À ce titre, je remercie tous les membres du personnel que j'ai rencontrés, qui m'ont fait partager leurs expériences et qui m'ont accueilli chaleureusement. Je leur témoigne toute ma reconnaissance.

DÉVELOPPEMENT D'UNE APPROCHE NOUVELLE POUR LES TESTS DE RÉPONSE THERMIQUE EN GÉOTHERMIE

François SIMON

RÉSUMÉ

Ce mémoire présente l'étude d'un prototype et d'une méthode innovante permettant de déterminer la conductivité et la résistance thermique des sols. Une revue de littérature fait état des récents développements concernant les tests de réponse thermique distribués. Ensuite, un chapitre permet de savoir, si oui ou non, les tests de réponse thermique distribués permettent d'optimiser la longueur totale de puits géothermiques. Cette étude est basée sur le dimensionnement d'un champ de puits géothermiques verticaux en boucle fermée selon la méthode de l'ASHRAE. Un bâtiment à Montréal est utilisé à titre d'exemple. En basant les données extraites de plusieurs études issues de la littérature et en intégrant celles-ci au dimensionnement précédent, nous permet de répondre à la question évoquée au début du chapitre. Ensuite, une présentation du prototype et du site expérimental est proposée pour avoir une vue d'ensemble et bien comprendre l'envergure du projet. Ce prototype permet de réaliser des tests de réponse thermique à l'aide de câbles chauffants. Ce prototype a été développé afin de déterminer si les disques de plastique souple permettent bel et bien de bloquer l'influence de la convection et d'améliorer l'analyse des essais effectuée avec une solution analytique concernant la conduction de chaleur seulement. Le développement de ce projet repose sur une série d'essais expérimentaux à petite échelle. Dans un autre volet de cette étude, l'analyse des résultats issus des essais est faite, afin de répondre à la problématique citée précédemment. L'analyse réalisée démontre que l'installation de disques de plastique souple sur les sections de câble chauffant permet d'améliorer les résultats d'au moins 10% pour chacun des tests. Les analyses prouvent l'influence de la convection sur les résultats et permettent d'ouvrir sur certaines modifications qui permettront d'améliorer le prototype construit. Un dernier test démontre l'importance du nombre de disques de plastique souple sur la longueur chauffante considérée pour l'analyse et indique une différence de 1.2% entre la conductivité thermique évaluée de façon *in situ* et celle mesurée en laboratoire.

Mots clés: Pompe à chaleur, Test de réponse thermique, Câble chauffant, Échangeur de chaleur géothermique, Conductivité thermique

DEVELOPMENT OF A NOVEL THERMAL RESPONSE TEST IN GEOTHERMICS

François SIMON

ABSTRACT

This thesis presents the study of a prototype of an innovative method for determining the thermal conductivity and resistance of the soil. A literature review describes the recent developments in distributed thermal response tests. Then, a chapter presents whether or not the distributed thermal response tests optimize the total length of geothermal wells. This study is based on the design of a vertical geothermal well field closed loop method according to ASHRAE. A building in Montreal used as an example. Using the extracted data from the literature and integrating them with the previous design, allows us to answer the question mentioned at the beginning of Chapter. Then, a presentation of the prototype and experimental site is proposed to have an overview and understanding of the project scope. This prototype allows for thermal response tests using heating cables section. This prototype was developed to determine if the flexible plastic discs allow indeed to block the influence of convection and improve the analysis performed with an analytical solution describing conductive heat transfer only. The development of this project is based on a series of experimental tests on a small scale. In another part of this study, analysis of the results of the tests is made, to address the problems mentioned above. The analysis show that the installation of the flexible plastic discs along heating cable sections improves the results by at least 10%. The analyzes show the influence of convection on results and allowed to justify changes that will improve the built prototype. A final test emphasized the importance of the number of the flexible plastic discs the length of heating sections to consider for analysis and provided a difference of 1.2% between the In-situ thermal conductivity and that measured in the laboratory.

Keywords: Heat pumps, Thermal response test, Heating cable, Borehole heat exchangers, Thermal conductivity

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 GÉNÉRALITÉS	5
1.1 L'énergie géothermique	5
1.1.1 Introduction	5
1.1.2 Moyen de récupération de l'énergie géothermique	6
1.1.3 Sources d'énergie remplaçées	12
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	15
2.1 Introduction	15
2.2 L'évolution des tests de réponse thermique sur site	15
2.3 Mise en contexte	21
CHAPITRE 3 UN TEST DE RÉPONSE THERMIQUE MULTI NIVEAU PERMET-IL D'OPTIMISER LA LONGUEUR DE PUITS GÉOTHERMIQUE ?	23
3.1 Introduction	23
3.1.1 Données initiales du projet	24
3.2 L'équation d'ASHRAE	25
3.2.1 Les charges au sol	25
3.2.2 Les températures	26
3.2.3 Les résistances thermiques	29
3.2.4 Calcul de la longueur	31
3.3 Comparaison de la méthode avec d'autres essais issus de la littérature	32
3.3.1 Introduction	32
3.3.1.1 Étude N°1	34
3.3.1.2 Étude N°2	39
3.3.1.3 Étude N°3	42
3.3.1.4 Étude N°4	44
3.3.1.5 Étude N°5	46
3.4 Conclusion	50
CHAPITRE 4 DESCRIPTIF ET FONCTIONNEMENT DE LA NOUVELLE MÉTHODE ET DU PROTOTYPE	51
4.1 Introduction	51
4.2 Description de la nouvelle méthode et du prototype	51
4.3 Description de la procédure d'analyse	54
4.4 Description du site expérimental	60
4.5 Déroulement des expériences	61
4.5.1 Plan expérimental	62

CHAPITRE 5 ANALYSE DES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX	65
5.1 Détermination des caractéristiques du sol par analyse en laboratoire	65
5.1.1 Reproduction des sols de forage	65
5.2 Détermination des caractéristiques du sol par tests de réponse thermique multi niveaux	70
5.2.1 Données initiales	70
5.2.2 Analyse N°1 : Comparaison entre le test N°1 et le test N°6	73
5.2.2.1 Test N°1 : SANS rondelles de plastique souple	73
5.2.2.2 Test N°6 : AVEC rondelles de plastique souple	78
5.2.2.3 Analyse	80
5.2.3 Analyse N°2 : Comparaison entre le test N°2 et le test N°5	82
5.2.3.1 Test N°2 : SANS rondelles de plastique souple	82
5.2.3.2 Test N°5 : AVEC rondelles de plastique souple	83
5.2.3.3 Analyse	89
5.2.4 Analyse N°3 : Comparaison entre le test N°3 et le test N°4	90
5.2.4.1 Test N°3 : SANS rondelles de plastique souple	90
5.2.4.2 Test N°4 : AVEC rondelles de plastique souple	90
5.2.4.3 Analyse	96
5.2.5 Analyse N°4 : Comparaison entre le test N°6 et le test N°7	97
5.2.5.1 Test N°7 : AVEC rondelles de plastique souple percées	97
5.2.5.2 Analyse	97
5.2.6 Analyse N°5 : Influence des disques de plastique souple sur le transfert de chaleur	97
5.2.6.1 Analyse	101
5.2.6.2 Analyse de l'évolution de la température le long du câble chauffant	103
5.3 Conclusion	108
CHAPITRE 6 INFLUENCE DES ERREURS LORS DES ESSAIS	111
6.1 Introduction	111
6.2 Analyse de l'efficacité des Power Switching Supply	111
6.3 Calibration des capteurs de température	113
6.3.1 Détermination de l'incertitude d'étalonnage	113
6.4 Mesure de puissance	114
6.5 Mesure de l'efficacité E_{PSS}	115
6.6 Mesure du temps	115
6.7 Mesure de la longueur des puits	115
6.8 Mesure de la longueur du câble chauffant	116
6.9 Mesure de la capacité thermique du sol (C)	116
6.10 Combinaison des erreurs sur le résultat final	116
6.10.1 Combinaison des erreurs sur le calcul du taux d'injection de chaleur	116

6.10.2 Combinaison des erreurs sur le calcul de la conductivité thermique	118
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	121
ANNEXE I RAPPORT DES FORAGES	125
ANNEXE II PROGRAMME PYTHON : DIMENSIONNEMENT	129
ANNEXE III PROGRAMME PYTHON : ANALYSE DES RÉSULTATS	133
BIBLIOGRAPHIE	137

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 3.1 Caractéristiques du champ de puits géothermiques utilisés dans cette étude.....	24
Tableau 3.2 Besoins thermiques et charges au sol pour le calcul de longueur des puits géothermiques	27
Tableau 3.3 COP de la (ou des) pompes à chaleur et déséquilibre thermique du sol étudié	27
Tableau 3.4 Tableau récapitulatif des résultats de l'étude	32
Tableau 3.5 Répertoire des travaux de recherche utilisés dans cette étude.	33
Tableau 3.6 Caractéristiques des propriétés thermiques du sol utilisées dans cette étude.	38
Tableau 3.7 Caractéristiques des propriétés thermiques du sol utilisées dans cette étude.....	40
Tableau 3.8 Caractéristiques des propriétés thermiques du sol utilisées dans cette étude.....	43
Tableau 3.9 Caractéristiques des propriétés thermiques du sol utilisées dans cette étude.....	45
Tableau 3.10 Caractéristiques des propriétés thermiques du sol utilisées dans cette étude.....	49
Tableau 4.1 Plan expérimental	63
Tableau 5.1 Descriptif des matériels interceptés. Extrait du rapport de Asselin S. (2015)	66
Tableau 5.2 Données des moules.....	66
Tableau 5.3 Masse et volume d'eau à ajouter afin d'atteindre les densités voulues pour chaque échantillon.	68
Tableau 5.4 Masse et volume d'eau à ajouter à chaque couche.....	68
Tableau 5.5 Hauteur requise à chaque couche afin de respecter les densités visées.	69

Tableau 5.6	Caractéristiques des sols par analyse en laboratoire	71
Tableau 5.7	Données initiales des tests de réponse thermique multi niveaux	72
Tableau 5.8	Tableau récapitulatif des données issues des Tests N°1 et N°6	82
Tableau 5.9	Tableau récapitulatif des données issues des Tests N°2 et N°5	88
Tableau 5.10	Tableau récapitulatif des données issues des Tests N°3 et N°4	96
Tableau 5.11	Tableau récapitulatif des données issues des Tests N°6 et N°7	101
Tableau 5.12	Tableau récapitulatif des données issues du Test N°8	103
Tableau 6.1	Test de l'efficacité du PSS de la Ligne 1	112
Tableau 6.2	Test de l'efficacité du PSS de la Ligne 2	112
Tableau 6.3	Test de l'efficacité du PSS de la Ligne 3	112
Tableau 6.4	Tableau récapitulatif des points de mesure	113
Tableau 6.5	Tableau récapitulatif des écarts absolus et des écarts types.....	114
Tableau 6.6	Tableau récapitulatif pour le calcul d'erreur	117

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 Échangeur de chaleur souterrain vertical (boucle fermée). (Tirée de www.venmarces.com)	7
Figure 1.2 Échangeur de chaleur souterrain horizontal (boucle fermée). (Tirée de www.venmarces.com)	7
Figure 1.3 Système à eau souterraine (boucle ouverte). (Tirée de www.venmarces.com)	8
Figure 1.4 Système à pieux géothermique. (Tirée de www.salon-ecobat.com)	9
Figure 1.5 Système à boucle fermée d'eau de surface. (Tirée de www.venmarces.com)	10
Figure 1.6 Système DX à détente directe. (Tirée de www.guideperrier.com).....	10
Figure 1.7 Système à puits à colonnes permanente. (Tirée de www.ecohabitation.com)	11
Figure 1.8 Nombre de thermopompes géothermiques installées de 1996 à 2008. Tirée d' État de l'industrie canadienne de la géothermie 2010 (2010, p. 8).	13
Figure 1.9 Sources d'énergie remplacées par les systèmes de pompe à chaleur géothermique au Canada de 2008 à 2010. Tirée d' État de l'industrie canadienne de la géothermie 2011 (Février 2012, p. 8).	13
Figure 1.10 Sources d'énergie remplacées par les systèmes de pompe à chaleur géothermique au Canada de 2008 à 2010. Tirée d' État de l'industrie canadienne de la géothermie 2011 (Février 2012, p. 8).	14
Figure 2.1 1 ^{er} prototype réalisé pour les TRT avec sections de câbles chauffants. Données tirées de Raymond et Lamarche (2014)	20
Figure 3.1 g-functions d'un champ de 6 par 3 puits. Données tirées de Cimmino et al (2012)	29
Figure 3.2 Coupe stratigraphique et profil de température initiale du puits de 63m. Données tirées de Fujii, H., H. Okubo et K. Nishi et R. Itoi et K. Ohyama et K. Shibata (2009)	34

Figure 3.3	Conductivité thermique en fonction de la profondeur avec indication de la conductivité thermique maximale à 35m. Données tirées de Fujii, H., H. Okubo et K. Nishi et R. Itoi et K. Ohyama et K. Shibata (2009)	37
Figure 3.4	Moyenne de la conductivité thermique en fonction de la profondeur avec indication de la moyenne à 62m et 45m. Données tirées de Fujii, H., H. Okubo et K. Nishi et R. Itoi et K. Ohyama et K. Shibata (2009)	37
Figure 3.5	Conductivité thermique en fonction de la profondeur avec indication de la conductivité thermique maximale à 111m. Données tirées de Lanini, S., F. Delaleux et X. Py et R. Olivès et D. Nguyen (2014)	39
Figure 3.6	Moyenne de la conductivité thermique en fonction de la profondeur avec indication de la moyenne à 190m et 145m. Données tirées de Lanini, S., F. Delaleux et X. Py et R. Olivès et D. Nguyen (2014)	40
Figure 3.7	Conductivité thermique en fonction de la profondeur avec indication de la conductivité thermique maximale à 22m. Données tirées de Luo, J., J. Rohn et M. Bayer et A. Priess et W. Xiang (2014)	42
Figure 3.8	Moyenne de la conductivité thermique en fonction de la profondeur avec indication de la moyenne à 80m et 56m. Données tirées de Luo, J., J. Rohn et M. Bayer et A. Priess et W. Xiang (2014)	43
Figure 3.9	Conductivité thermique en fonction de la profondeur avec indication de la conductivité thermique à 91m. Données tirées de Soldo, V., L. Leposa et L. Boban et S. Borovic (2015)	44
Figure 3.10	Moyenne de la conductivité thermique en fonction de la profondeur avec indication de la moyenne à 100m et 50m. Données tirées de Soldo, V., L. Leposa et L. Boban et S. Borovic (2015)	45
Figure 3.11	Conductivité thermique en fonction de la profondeur avec indication de la conductivité thermique à 31m. Données tirées de Rohner, E., L. Rybach et U. Schärli (2005)	46
Figure 3.12	Moyenne de la conductivité thermique en fonction de la profondeur avec indication de la moyenne à 294m et 150m. Données tirées de Rohner, E., L. Rybach et U. Schärli (2005)	47

Figure 3.13	Profil de température initiale. Données tirées de Rohner, E., L. Rybach et U. Schärli (2005)	48
Figure 3.14	Sommaire des données caractéristiques du sol étudié. Données tirées de Rohner, E., L. Rybach et U. Schärli (2005)	48
Figure 4.1	Dispositif expérimental	52
Figure 4.2	Détails du câble chauffant	53
Figure 4.3	Description du prototype	54
Figure 4.4	Température simulée à différentes positions lors d'un TRT avec un câble chauffant. Extrait de Raymond, J., L. Lamarche (2014).....	55
Figure 4.5	Symétrie d'une source de chaleur centrale entre deux images de cette source de chaleur montrant la géométrie du problème décrit à l'équation 4.1. Extrait de Raymond, J., L. Lamarche (2014)	57
Figure 4.6	Détails des positions des disques de plastique souple (2 disques à chaque extrémité)	58
Figure 4.7	Carte de localisation des forages	60
Figure 4.8	Détails et vue en coupe des forages.	61
Figure 5.1	Tableau de sélection des densités en fonction des types de sols. Données tirées de Holtz, R.D., Kovacs, W.D. (1991)	67
Figure 5.2	Évolution de la température initiale en fonction de la profondeur.....	72
Figure 5.3	Évolution de la conductivité évaluée de façon <i>in situ</i> en fonction du nombre de Fourier ~ Sans rondelles de plastique souple ~ TestN°1 / Forage N°1	74
Figure 5.4	Évolution de la restitution de la température en fonction du temps ~ Sans rondelles de plastique souple ~ TestN°1 / Forage N°1	74
Figure 5.5	Évolution de la conductivité évaluée de façon <i>in situ</i> en fonction du nombre de Fourier ~ Sans rondelles de plastique souple ~ TestN°1 / Forage N°2	75
Figure 5.6	Évolution de la restitution de la température en fonction du temps ~ Sans rondelles de plastique souple ~ TestN°1 / Forage N°2	75

Figure 5.7	Évolution de la conductivité évaluée de façon in situ en fonction du nombre de Fourier ~ Sans rondelles de plastique souple ~ TestN°1 / Forage N°3	76
Figure 5.8	Évolution de la restitution de la température en fonction du temps ~ Sans rondelles de plastique souple ~ TestN°1 / Forage N°3	76
Figure 5.9	Évolution de la conductivité évaluée de façon in situ en fonction du nombre de Fourier ~ Avec rondelles de plastique souple ~ TestN°6 / Forage N°1	78
Figure 5.10	Évolution de la restitution de la température en fonction du temps ~ Avec rondelles de plastique souple ~ TestN°6 / Forage N°1	79
Figure 5.11	Évolution de la conductivité évaluée de façon in situ en fonction du nombre de Fourier ~ Avec rondelles de plastique souple ~ TestN°6 / Forage N°2	79
Figure 5.12	Évolution de la restitution de la température en fonction du temps ~ Avec rondelles de plastique souple ~ TestN°6 / Forage N°2	80
Figure 5.13	Évolution de la conductivité évaluée de façon in situ en fonction du nombre de Fourier ~ Avec rondelles de plastique souple ~ TestN°6 / Forage N°3	81
Figure 5.14	Évolution de la restitution de la température en fonction du temps ~ Avec rondelles de plastique souple ~ TestN°6 / Forage N°3	81
Figure 5.15	Évolution de la conductivité évaluée de façon in situ en fonction du nombre de Fourier ~ Sans rondelles de plastique souple ~ TestN°2 / Forage N°1	83
Figure 5.16	Évolution de la restitution de la température en fonction du temps ~ Sans rondelles de plastique souple ~ TestN°2 / Forage N°1	83
Figure 5.17	Évolution de la conductivité évaluée de façon in situ en fonction du nombre de Fourier ~ Sans rondelles de plastique souple ~ TestN°2 / Forage N°2	84
Figure 5.18	Évolution de la restitution de la température en fonction du temps ~ Sans rondelles de plastique souple ~ TestN°2 / Forage N°2	84
Figure 5.19	Évolution de la conductivité évaluée de façon in situ en fonction du nombre de Fourier ~ Sans rondelles de plastique souple ~ TestN°2 / Forage N°3	85

Figure 5.20	Évolution de la restitution de la température en fonction du temps ~ Sans rondelles de plastique souple ~ TestN°2 / Forage N°3	85
Figure 5.21	Évolution de la conductivité évaluée de façon in situ en fonction du nombre de Fourier ~ Avec rondelles de plastique souple ~ TestN°5 / Forage N°1	86
Figure 5.22	Évolution de la restitution de la température en fonction du temps ~ Avec rondelles de plastique souple ~ TestN°5 / Forage N°1	86
Figure 5.23	Évolution de la conductivité évaluée de façon in situ en fonction du nombre de Fourier ~ Avec rondelles de plastique souple ~ TestN°5 / Forage N°2	87
Figure 5.24	Évolution de la restitution de la température en fonction du temps ~ Avec rondelles de plastique souple ~ TestN°5 / Forage N°2	87
Figure 5.25	Évolution de la conductivité évaluée de façon in situ en fonction du nombre de Fourier ~ Avec rondelles de plastique souple ~ TestN°5 / Forage N°3	88
Figure 5.26	Évolution de la restitution de la température en fonction du temps ~ Avec rondelles de plastique souple ~ TestN°5 / Forage N°3	89
Figure 5.27	Évolution de la conductivité évaluée de façon in situ en fonction du nombre de Fourier ~ Sans rondelles de plastique souple ~ TestN°3 / Forage N°1	90
Figure 5.28	Évolution de la restitution de la température en fonction du temps ~ Sans rondelles de plastique souple ~ TestN°3 / Forage N°1	91
Figure 5.29	Évolution de la conductivité évaluée de façon in situ en fonction du nombre de Fourier ~ Sans rondelles de plastique souple ~ TestN°3 / Forage N°2	91
Figure 5.30	Évolution de la restitution de la température en fonction du temps ~ Sans rondelles de plastique souple ~ TestN°3 / Forage N°2	92
Figure 5.31	Évolution de la conductivité évaluée de façon in situ en fonction du nombre de Fourier ~ Sans rondelles de plastique souple ~ TestN°3 / Forage N°3	92
Figure 5.32	Évolution de la restitution de la température en fonction du temps ~ Sans rondelles de plastique souple ~ TestN°3 / Forage N°3	93

Figure 5.33	Évolution de la conductivité évaluée de façon in situ en fonction du nombre de Fourier ~ Avec rondelles de plastique souple ~ TestN°4 / Forage N°1	93
Figure 5.34	Évolution de la restitution de la température en fonction du temps ~ Avec rondelles de plastique souple ~ TestN°4 / Forage N°1	94
Figure 5.35	Évolution de la conductivité évaluée de façon in situ en fonction du nombre de Fourier ~ Avec rondelles de plastique souple ~ TestN°4 / Forage N°2	94
Figure 5.36	Évolution de la restitution de la température en fonction du temps ~ Avec rondelles de plastique souple ~ TestN°4 / Forage N°2	95
Figure 5.37	Évolution de la conductivité évaluée de façon in situ en fonction du nombre de Fourier ~ Avec rondelles de plastique souple ~ TestN°4 / Forage N°3	95
Figure 5.38	Évolution de la restitution de la température en fonction du temps ~ Avec rondelles de plastique souple ~ TestN°4 / Forage N°3	96
Figure 5.39	Évolution de la conductivité évaluée de façon in situ en fonction du nombre de Fourier ~ Avec rondelles de plastique souple ~ TestN°7 / Forage N°1	98
Figure 5.40	Évolution de la restitution de la température en fonction du temps ~ Avec rondelles de plastique souple ~ TestN°7 / Forage N°1	98
Figure 5.41	Évolution de la conductivité évaluée de façon in situ en fonction du nombre de Fourier ~ Avec rondelles de plastique souple ~ TestN°7 / Forage N°2	99
Figure 5.42	Évolution de la restitution de la température en fonction du temps ~ Avec rondelles de plastique souple ~ TestN°7 / Forage N°2	99
Figure 5.43	Évolution de la conductivité évaluée de façon in situ en fonction du nombre de Fourier ~ Avec rondelles de plastique souple ~ TestN°7 / Forage N°3	100
Figure 5.44	Évolution de la restitution de la température en fonction du temps ~ Avec rondelles de plastique souple ~ TestN°7 / Forage N°3	100
Figure 5.45	Évolution de la conductivité évaluée de façon in situ en fonction du nombre de Fourier ~ Avec rondelles de plastique souple ~ TestN°8 / Forage N°3	102

Figure 5.46	Évolution de la restitution de la température en fonction du temps ~ Avec rondelles de plastique souple ~ TestN°8 / Forage N°3	102
Figure 5.47	Évolution de la température le long du câble chauffant en fonction de la profondeur ~ Prise de données à la fin d'injection ~ Avec rondelles de plastique souple ~ TestN°8 / Forage N°3.....	104
Figure 5.48	Détails des positions des disques de plastique souple (4 disques à chaque extrémité)	105
Figure 5.49	Évolution de la température du capteur N°6 en fonction du temps ~ Avec rondelles de plastique souple ~ TestN°8 / Forage N°3	106

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

TRT	Test de Réponse Thermique
ÉTS	École de Technologie Supérieure
INRS	Institut National de la Recherche Scientifique
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers
COP	Coefficient de Performance
MDD	Maison du Développement Durable
DX	Direct Expansion
PACP	Puits à Colonnes Permanentes
PAC	Pompe à Chaleur
TRTD	Test de Réponse Thermique Distribué
PEHD	Polyéthylène Haute Densité
ETFE	Éthylène TétraFluoroEthylène
SDR	Standard Dimension Ratio
PWS	Power Switching Supply
GHE	Ground Heat Exchanger
USGPM	Gallons US Par Minute
SI	Système International
THP	Thermocouple Haute Précision
T	Thermocouple

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

α	Diffusivité thermique [$m^2/jour$]
L_U	Distance centre à centre des deux tuyaux du tube en U [m]
C_p	Chaleur spécifique [$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
ρ	Masse volumique [$kg.m^{-3}$]
B	Distance entre deux puits géothermiques [m]
$C_{j,i}$	Besoins thermiques de la zone i, à l'heure j [W]
H	Profondeur d'un puits géothermique [m]
h_{conv}	Coefficient d'échange thermique du coulis d'un puits géothermique [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]
k_{coulis}	Conductivité thermique du coulis d'un puits géothermique [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]
k_{tuyaux}	Conductivité thermique des tuyaux d'un puits géothermique [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]
k_{sol}	Conductivité thermique du sol [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]
c	Capacité thermique massique du matériau [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
C	Capacité thermique volumique du matériau [$J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$]
L	Longueur totale d'un échangeur géothermique [m]
L_c	Longueur d'un câble chauffant [m]
\dot{m}	Débit massique [$kg.s^{-1}$]
NB	Nombre de puits d'un système géothermique
q_a	Charge thermique moyenne annuelle au sol [W]
q_h	Charge thermique horaire maximale au sol [W]
q_j	Charge thermique rejetée (puisée) dans le sol à l'heure j [W]
$Q_{j,i}$	Charge thermique rejetée (puisée) dans la boucle géothermique par la zone i à l'heure j [W]
q_m	Charge thermique moyenne mensuelle au sol [W]

R_a	Résistance thermique équivalente du sol pour une impulsion thermique de 10 ans [$m \cdot K \cdot W^{-1}$]
R_b	Résistance thermique équivalente d'un puits géothermique [$m \cdot K \cdot W^{-1}$]
R_{conv}	Résistance thermique convective à l'intérieur des tuyaux d'un puits géothermique [$m \cdot K \cdot W^{-1}$]
R_g	Résistance thermique du coulis d'un puits géothermique [$m \cdot K \cdot W^{-1}$]
R_h	Résistance thermique équivalente du sol pour une impulsion thermique de 6 heures [$m \cdot K \cdot W^{-1}$]
R_m	Résistance thermique équivalente du sol pour une impulsion thermique de 1 mois [$m \cdot K \cdot W^{-1}$]
$r_{p,ext}$	Rayon extérieur des tuyaux d'un puits géothermique [m]
$r_{p,in}$	Rayon intérieur des tuyaux d'un puits géothermique [m]
r_{puits}	Rayon d'un puits géothermique [m]
$T_{entrée,sol}$	Température à l'entrée des puits géothermiques [°C]
T_g	Température non perturbée du sol [°C]
$T_{in,source}$	Température du fluide à l'entrée de la pompe à chaleur du côté de la boucle géothermique [°C]
$T_{in,charge}$	Température du fluide à l'entrée de la pompe à chaleur du côté du bâtiment [°C]
T_p	Pénalité de température du sol causé par le déséquilibre annuel [°C]
$T_{sortie,sol}$	Température à la sortie des puits géothermiques [°C]
T_b	Température à l'intérieur du puit géothermique [°C]
Indices	
ch	Chauffage
cl	Climatisation

INTRODUCTION

L'Agence Internationale de l'Énergie insiste depuis longtemps sur le fait que la production et la consommation d'énergie incompatibles avec les exigences internationales en matière d'environnement ne sont pas viables : elles ne répondent pas aux exigences de sécurité énergétique. Le besoin urgent d'accélérer le développement de technologies émergentes, qui sont finalement essentielles pour transformer le système énergétique mondial en un système cohérent avec les objectifs climatiques de la planète, se fait sentir. Afin de permettre la réussite de cet objectif, plusieurs axes de recherche ont été développés, dont la réduction de l'utilisation des centrales à charbon et l'interdiction de leur construction, l'augmentation des investissements dans le secteur des énergies renouvelables, la recherche de substitut à l'utilisation des énergies fossiles, la réduction des émissions de méthane provenant de la production d'huile et de gaz et, enfin, l'amélioration de l'efficacité énergétique dans les secteurs de l'industrie du bâtiment et du transport. Parmi les moyens de production d'énergie renouvelable utilisés, afin d'améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments, les systèmes géothermiques pour le stockage ou l'extraction de l'énergie thermique présente dans le sol sont de plus en plus communs. Au Canada, le nombre cumulatif des systèmes géothermiques a augmenté de plus de 550 % depuis 2002 (d'après la Coalition canadienne de l'énergie géothermique (2011)). Cette popularité croissante incite les manufacturiers à améliorer l'efficacité de leurs systèmes, notamment lors du dimensionnement de celui-ci. Pour un dimensionnement optimal d'un système géothermique, il est nécessaire de connaître les propriétés thermiques du sol. Celles-ci sont obtenues à l'aide de test de réponse thermique (TRT) permettant d'évaluer les propriétés thermiques du sol selon la profondeur de forage. L'une des clés pour améliorer le dimensionnement d'un système géothermique est d'optimiser la procédure d'évaluation des propriétés thermiques du sol.

PROBLÉMATIQUE

Le design et la conception des systèmes géothermiques sont intimement liés à la connaissance

précise des propriétés thermiques des sols. Ces propriétés sont déterminées à l'aide des tests de réponses thermiques. Les tests de réponse thermique conventionnels demandent énormément de main-d'oeuvre et sont énergivores. De plus ces tests ne donnent que des résultats moyennés, sur la longueur de forage testée, des caractéristiques thermiques évaluées. Ce projet s'appuie sur le prototype développé par Jasmin Raymond et de la méthode d'analyse développée par Louis Lamarche. Cette méthode innovante, beaucoup moins coûteuse en termes de prix et de main-d'oeuvre et moins énergivore, permet d'évaluer les propriétés thermiques des sols en fonction de la profondeur de forage. L'objectif de ce mémoire est de quantifier l'influence de la convection sur la mesure de la température et de mettre en place les moyens nécessaires qui permettront de la négliger. Les travaux de Raymond, J. (2010) ; Raymond, J., R. Therrien et L. Gosselin (2011) ; Raymond, J. L. Lamarche et M. Malo (2015) sont le point de départ de toutes les investigations.

OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

L'objectif général de ce projet est de participer au développement de la méthode des tests de réponse thermique par sections chauffantes en vue de valider la méthode d'analyse et de l'optimiser. Cet objectif consiste à répondre à ces questions et d'en faire le développement :

- *L'évaluation des propriétés thermiques multi niveaux permet-elle d'optimiser la longueur des systèmes géothermiques ?*
- *La méthode des tests de réponse thermique multi niveaux avec câbles chauffants permet-elle d'avoir des résultats exactes ?*
- *Comment quantifier l'influence de la convection autour des câbles chauffants sur la mesure de température ?*

ORGANISATION DU MÉMOIRE

Ce mémoire est divisé en 6 chapitres, le chapitre 1 présente quelques généralités et prérequis

concernant l'énergie géothermique afin de mieux comprendre les phénomènes détaillés par la suite. Le chapitre 2 présente une analyse permettant de déterminer si une évaluation des propriétés thermiques multi niveaux permet d'optimiser la longueur de puits géothermique, à partir d'une étude d'un bâtiment donné et selon la méthode présentée dans le ASHRAE Handbook (ASHRAE. (2003b)). Afin d'étudier les caractéristiques thermiques multi niveaux des puits créés pour le besoin de l'étude, il a fallu construire un prototype permettant l'acquisition de donnée (température et puissance électrique) sur trois lignes simultanément. Le fonctionnement du prototype et le site expérimental sont décrits au chapitre 4. Au chapitre 5, l'ensemble des résultats acquis à l'aide du prototype est analysé afin de répondre à la problématique du présent mémoire décrite précédemment. Finalement, le chapitre 6 analyse les résultats issus de l'expérimentation et les compare avec les résultats issus des analyses en laboratoire afin de déterminer si la méthode est viable.

CHAPITRE 1

GÉNÉRALITÉS

1.1 L'énergie géothermique

1.1.1 Introduction

Chaque cm³ de la Terre est en mouvement, et celle-ci l'est depuis sa formation, il y a 4.5 milliards d'années. En effet, selon l'échelle de temps géologique, des tremblements de terre se font sentir, des volcans naissent et grandissent, et les continents se réarrangent à la surface de la Terre. La source d'énergie à l'origine de tous ces phénomènes est la chaleur, on l'appellera par la suite : l'énergie géothermique. Cette source d'énergie est propre et est considérée comme renouvelable (à l'échelle macroscopique). Cette ressource peut avoir de nombreuses applications, telles que le chauffage et la climatisation résidentielle, la production d'électricité, etc. L'énergie géothermique est présente sur toute la surface du globe, chacune de ses applications peut être envisagée, peu importe l'emplacement. L'utilisation de cette ressource présente de nombreux avantages :

- son utilisation ne requiert d'investissement que lors de l'installation et l'entretien ;
- du point de vue environnemental, l'utilisation de cette énergie rejette très peu de CO₂ dans l'atmosphère ;
- elle permet de réduire la demande en électricité ;
- elle permet de remplacer les systèmes de production électrique utilisant l'énergie fossile par l'utilisation d'une énergie renouvelable ;
- enfin, la géothermie peut également être un moyen de stockage d'énergie.

Afin d'utiliser cette énergie de la manière la plus efficiente possible, nous allons comprendre quels sont les moyens de transfert de chaleur mis en jeu sous terre, quels sont les moyens d'extraire cette énergie et quelles sont les contraintes imposées par les caractéristiques du sol.

1.1.2 Moyen de récupération de l'énergie géothermique

Le choix du moyen de récupération d'énergie est tributaire des caractéristiques suivantes :

- le type de sol ;
- la présence d'eau en grande quantité ;
- les besoins énergétiques de la résidence ;
- le niveau d'entretien accepté ;
- l'espace de terrain disponible ;
- l'investissement disponible.

Il existe plusieurs systèmes de récupération de l'énergie géothermique dont les principaux sont :

ÉCHANGEUR DE CHALEUR SOUTERRAIN VERTICAL (BOUCLE FERMÉE)

Le système à circuit fermé (Figure 1.1) puise la chaleur dans le sol même ou dans un lac (ou un étang) et fonctionne à partir d'une boucle continue formée de tubes de plastique. Un mélange d'antigel (ex : Propylène Glycol, etc ...) et d'eau circule constamment dans la boucle et dans la thermopompe, transférant ainsi la chaleur du sol ou de l'étendue d'eau vers lui, selon le besoin en chauffage et en climatisation. Dans un système en circuit fermé, le fluide n'entre jamais en contact avec le sol. Il est scellé à l'intérieur de la boucle et de la thermopompe.



Figure 1.1 Échangeur de chaleur souterrain vertical (boucle fermée). (Tirée de www.venmarces.com)

ÉCHANGEUR DE CHALEUR SOUTERRAIN HORIZONTAL (BOUCLE FERMÉE)

Ce système (Figure 1.2) est similaire au circuit à boucle verticale. Il peut être envisageable lorsque l'on dispose d'un terrain d'une grande surface.



Figure 1.2 Échangeur de chaleur souterrain horizontal (boucle fermée). (Tirée de www.venmarces.com)

SYSTÈME À EAU SOUTERRAINE (BOUCLE OUVERTE)

Ce système (Figure 1.3) utilise l'eau souterraine, afin de réduire ou d'augmenter la chaleur de l'eau dans la boucle. Il est généralement utilisé dans les régions où les eaux souterraines sont abondantes et facilement accessibles. L'eau est habituellement réinjectée dans l'aquifère. L'avantage premier est que la température de l'eau du puits est constante, permettant ainsi un fonctionnement hautement efficace à un coût d'installation relativement faible. Un échangeur thermique intermédiaire est ajouté, dans de nombreux cas, afin d'isoler la boucle raccordée aux unités des eaux souterraines et ainsi réduire les coûts d'entretien. Le système ouvert est soumis à de l'eau souterraine contenant des solides dissous (fer, souffre, calcaire et autres minéraux), qui peut encrasser son échangeur de chaleur, diminuant donc son efficacité et requiert un entretien régulier.



Figure 1.3 Système à eau souterraine (boucle ouverte).
(Tirée de www.venmarces.com)

SYSTÈME À PIEUX GÉOTHERMIQUE

Les pieux géothermiques (Figure 1.4) servent à la fois de fondation et de puits géothermique. Ils intègrent un système d'échangeur thermique à la structure du bâtiment pour la production

de froid et/ou de chaleur.

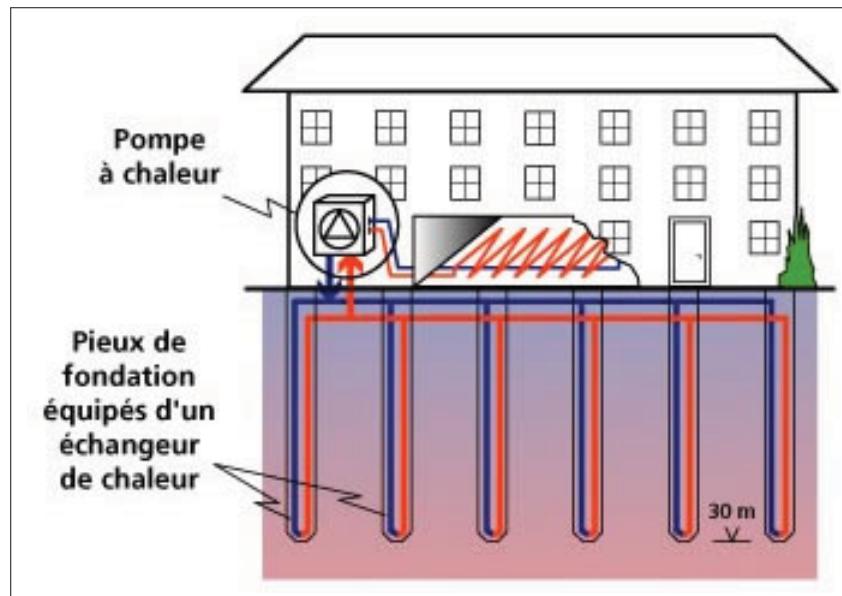


Figure 1.4 Système à pieux géothermique. (Tirée de www.salon-ecobat.com)

ÉCHANGEUR DE CHALEUR À EAU DE SURFACE

Les systèmes à échangeur de chaleur à eau de surface (Figure 1.5) sont souvent utilisés à proximité d'une étendue d'eau. Ce système profite de la stabilité de la température de l'eau à une certaine profondeur pour en extraire de l'énergie.



Figure 1.5 Système à boucle fermée d'eau de surface.
(Tirée de www.venmarces.com)

ÉCHANGEUR DE CHALEUR SOUTERRAINE À DÉTENTE DIRECTE (DX)

Le système à détente directe (Figure 1.6) fait circuler le réfrigérant de la pompe à chaleur directement dans le sol, dans de petits conduits de cuivre. Le sol absorbe la chaleur par changement de phase du fluide réfrigérant passant de l'état liquide à l'état gazeux.

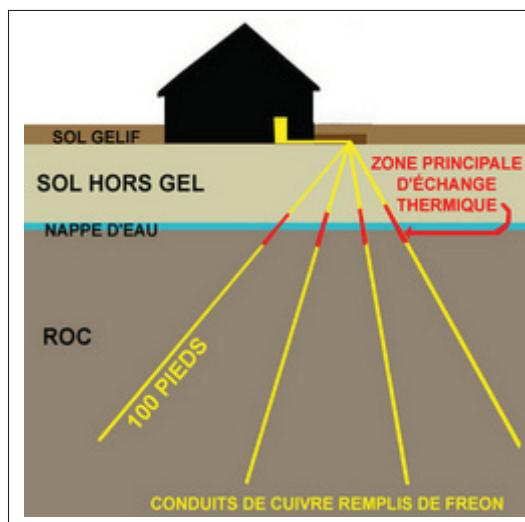


Figure 1.6 Système DX à détente directe. (Tirée de www.guideperrier.com)

SYSTÈME À COLONNES

Le système géothermique à colonnes permanentes (Figure 1.7) est un système à mi-chemin entre les systèmes ouverts et les systèmes fermés. Le Puits à Colonnes Permanentes (PCP), communément appelé « standing column well» par la communauté scientifique anglophone, est un type de puits géothermique utilisant l'eau souterraine comme fluide caloporteur. L'eau pompée à partir de la base du puits, généralement à l'aide d'une conduite de refoulement, est acheminée à un échangeur de chaleur avant d'être réintroduite au haut du puits, entre la conduite de refoulement et la paroi du forage. La performance thermique de ce genre de système est telle qu'elle permet d'importantes réductions des longueurs de forages totales requises pour une charge donnée. Le puits est rempli d'eau souterraine, il est donc soumis à des règles environnementales strictes. Au Québec, le règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection encadre la géothermie, autant à boucle ouverte que fermée (Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection, chapitre Q-2, r. 35.2, 2016). Le chapitre IV de ce règlement fait état de toutes les restrictions concernant les systèmes géothermiques.

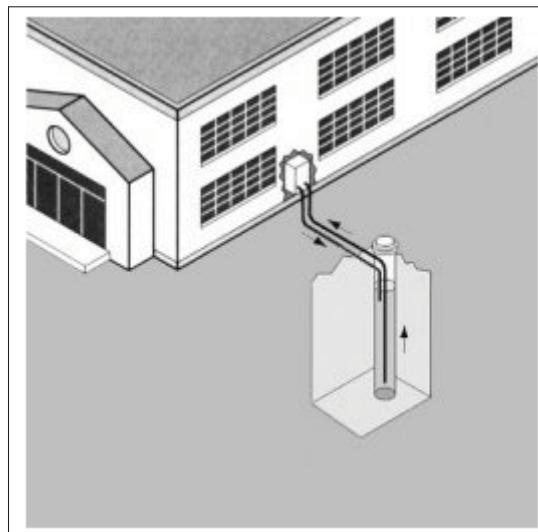


Figure 1.7 Système à puits à colonnes permanente. (Tirée de www.ecohabitation.com)

1.1.3 Sources d'énergie remplacées

Au Canada, les installations géothermiques ont permis de remplacer une multitude de sources d'énergie fossile. Leur utilisation permet d'économiser de l'énergie et de réduire significativement les émissions de gaz à effet de serre des bâtiments équipés. Globalement, les installations géothermiques pèsent au niveau des approvisionnements énergétiques globaux en déplaçant ou remplaçant d'autres formes d'énergie. Par exemple, au Canada, de 2008 à 2010, les installations géothermiques ont permis de remplacer l'utilisation de mazout et d'électricité à hauteur de 39,2% et 39,1% respectivement (d'après la Coalition canadienne de l'énergie géothermique (2011)), comme le montre la Figure 1.9. Dans des proportions moins importantes, les systèmes géothermiques ont permis de remplacer l'utilisation de propane, de gaz naturel, et enfin, une combinaison de bois, de granules de bois, de mazout et d'électricité ou de mazout et bois. Au fil de ces années, la proportion d'électricité a augmenté par rapport à l'utilisation du mazout, comme le montre la Figure 1.10. Cela n'est pas dû qu'à l'utilisation de système géothermique, mais la tendance générale remarquée vise à réduire l'utilisation d'énergie fossile. Le taux de pénétration des systèmes géothermiques dans le marché du chauffage et de la climatisation est toutefois faible et se compte en quelques milliers d'unités installées comme le montre la Figure 1.8.

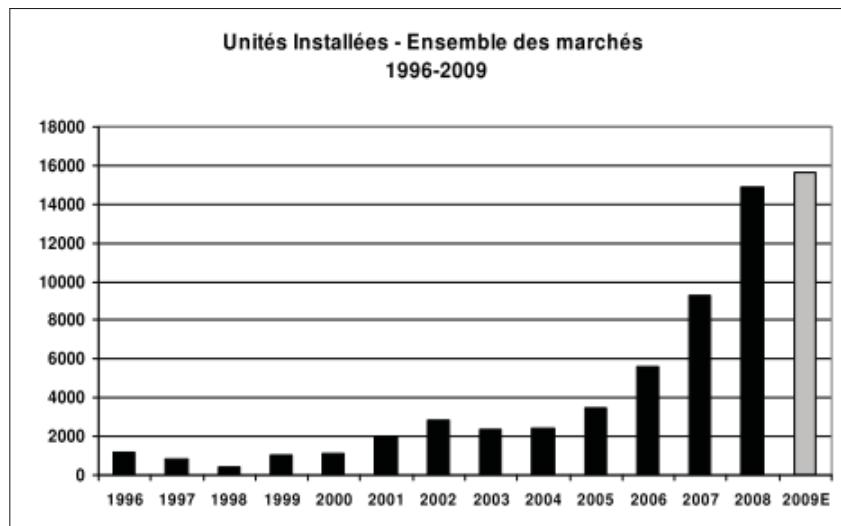


Figure 1.8 Nombre de thermopompes géothermiques installées de 1996 à 2008. Tirée d' État de l'industrie canadienne de la géothermie 2010 (2010, p. 8).

En 2008, la proportion d'électricité remplacée était d'environ 24%, alors que celle du mazout était de 56%. En 2010, l'inverse se produit, en effet, la proportion d'électricité remplacée était d'environ 50%, alors que celle du mazout était de 30%.

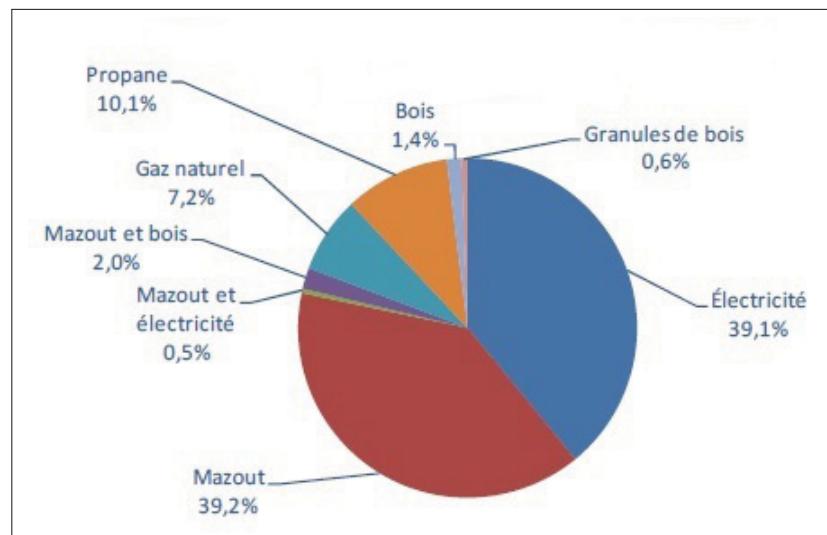


Figure 1.9 Sources d'énergie remplacées par les systèmes de pompe à chaleur géothermique au Canada de 2008 à 2010. Tirée d' État de l'industrie canadienne de la géothermie 2011 (Février 2012, p. 8).

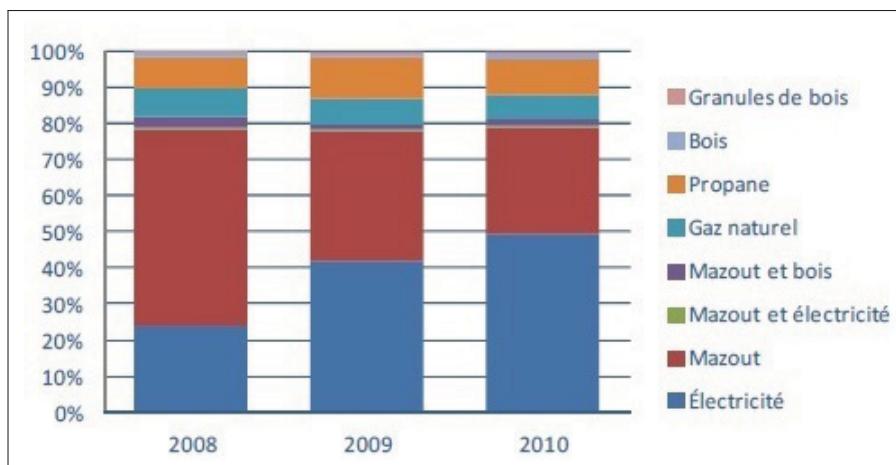


Figure 1.10 Sources d'énergie remplacées par les systèmes de pompe à chaleur géothermique au Canada de 2008 à 2010.
Tirée d' État de l'industrie canadienne de la géothermie 2011
(Février 2012, p. 8).

CHAPITRE 2

REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Introduction

L'utilisation de l'énergie géothermique comme substitut à l'utilisation d'énergie fossile pour le chauffage et la climatisation des bâtiments est de plus en plus importante ces dernières années. Les industriels optimisent donc leurs procédés afin de les rendre plus efficaces et de leur permettre d'être plus compétitifs sur le marché de la géothermie. L'optimisation des procédés porte sur le système en lui même, mais également sur les méthodes de design, sur les méthodes d'analyse, sur les procédés de mesure, sur lequel on se penchera par la suite. La revue de littérature balaye tous les progrès faits en matière d'optimisation des tests de réponse thermique réalisés sur le terrain.

2.2 L'évolution des tests de réponse thermique sur site

Lors du dimensionnement d'une installation géothermique, il est nécessaire de connaître la conductivité thermique du sol du lieu considéré, la capacité thermique volumétrique (Banks, D. (2008)) et la température non perturbée des sols. Plusieurs moyens sont disponibles, plus ou moins exact, pour y parvenir.

Lorsqu'il s'agit du secteur résidentiel, des tables de valeurs peuvent être trouvées dans des publications et logiciels de design, tel que Earth Energy Designer (Blomberg, T., J. Claesson et P. Eskilson et G. Hellström et B. Sanner (2008)). Les résultats issus des tables contiennent une incertitude importante et ne sont utiles que pour certaines applications dont l'incertitude sur la longueur de forage est faible, comme pour les systèmes géothermiques résidentiels.

En revanche, pour le secteur commercial nécessitant des installations plus lourdes, un TRT est requis.

Il existe plusieurs méthodes en laboratoire afin de mesurer la conductivité thermique du sol, comme le précise Farouki, O. (1981) et Mitchell, J.K. et T. Kao (1978) dans leurs travaux. Il

est possible de les classer en deux catégories : les méthodes en régime permanent ou en transitoire. Les méthodes de régime permanent consistent à appliquer un flux de chaleur constant et unidirectionnel à un échantillon prélevé du sol étudié et à mesurer la puissance et la différence de température à travers elle lorsque l'état d'équilibre est atteint. La conductivité thermique est alors calculée en utilisant directement la loi de Fourier. Les méthodes transitoires, quant à elle, consistent à appliquer une impulsion de chaleur unidirectionnelle à un échantillon et à mesurer l'évolution de la température dans le temps. Les données transitoires sont utilisées pour déterminer la conductivité thermique, généralement par application d'une solution analytique de l'équation de diffusion de chaleur. Certaines méthodes transitoires peuvent également être utilisées pour évaluer d'autres propriétés thermiques, telles que la diffusivité thermique et la résistance thermique du sol considéré.

Enfin, il existe également les tests de réponse thermique réalisés sur le terrain couramment utilisés par l'industrie géothermique pour déduire les propriétés du sous-sol (Mogensen, P. (1983)). Le TRT est une méthode transitoire analogue aux essais en laboratoire, décrits précédemment (sonde à aiguille), mais réalisés à une plus grande échelle. Dans les travaux de Low, J.E., F.A. Loveridge et W. Powrie et D. Nicholson (2014), ces deux méthodes sont comparées aux résultats issus des tests de réponse thermique sur un site. L'objectif étant de déterminer si les résultats issus des méthodes en laboratoire peuvent être une alternative intéressante aux tests de réponses thermiques conventionnels énergivores et coûteux en main d'œuvre. Plusieurs chercheurs ont essayé de réduire la consommation du système. Par exemple, Gehlin, S., J.D. Spitler (2002) ont utilisé une pompe à chaleur à air comme source de chaleur pour diminuer les besoins en énergie. Ce système a été utilisé aux Pays-Bas, et son utilisation limitée est peut-être due à la complexité de l'appareil, comme l'indique Raymond, J., L. Lamarche (2014). Certains ont également utilisé une alimentation triphasée afin de réduire la demande de courant (Witte, H.J.L., G.J. Van Gelder et J.D. Spitler (2002)). L'intérêt de cette revue de littérature est de montrer les récents développements qui ont été apportés au test de réponse thermique conventionnel. Sanner, B., G. Hellström et J. Spitler et S. Gehlin (2005) en a fait une revue détaillée des tests de réponse thermique conventionnels. Celui-ci y décrit la théorie derrière la pratique du test de réponse thermique conventionnel en passant par l'histoire de son développement et

l'utilisation mondiale de ce type de test. Cette revue en fera de même pour les récents progrès concernant les tests de réponse thermique distribués.

Le principe des tests de réponse thermique conventionnels est assez simple. Il est basé sur le principe que, lorsqu'on envoie une impulsion constante de chaleur dans le sol, la variation de température moyenne à l'intérieur d'un puits géothermique varie selon la relation suivante :

$$\Delta T = T_b - T_o = \frac{q'}{k_{sol}} g(t) \quad (2.1)$$

Où q' représente la quantité de chaleur par mètre rejetée dans le sol et $g(t)$ représente la réponse thermique à l'échelon du sol à une impulsion unitaire (Gehlin, S. (1998a); Austin III, W.A. (1998)). Le principe est donc de mesurer les variations de température dans le temps et d'en déduire la conductivité thermique en tentant d'optimiser les températures calculées avec le modèle aux mesures expérimentales. Il existe cependant plusieurs méthodes proposées pour réaliser ces tests. Ces méthodes diffèrent en fonction de :

- la façon dont l'on injecte la chaleur dans le sol ;
- la façon dont l'on mesure les températures ;
- le modèle théorique utilisé pour prédire la variation de température.

Il existe plusieurs méthodes pour estimer la conductivité thermique du sol nécessaire aux applications géothermiques. Talaboulma, T. A. (2013) détaille et répertorie de façon exhaustive chacune des méthodes pratiquées sur le terrain, de l'identification du sol et de la roche, de l'essai expérimental des déblais de forage, en passant par les tests avec des sondes et finir avec les essais sur le terrain. Il est cependant utile de revenir sur la méthode la plus classique utilisée.

Le principe de cette méthode est le suivant :

- a. On utilise un puits géothermique standard avec un tube en U dans lequel on fait circuler de l'eau ;
- b. On chauffe cette eau à l'aide d'éléments chauffants dont la puissance est fixe et connue ;
- c. On mesure la température moyenne du fluide en fonction du temps ;

- d. On utilise le modèle de la ligne source infinie (LSI) pour simuler la réponse à un flux de chaleur.

Le modèle de la LSI est donné par :

$$T_b - T_o = q' \left[\frac{1}{4\pi k_{sol}} \int_{r_b^2/4\alpha t}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \right] \quad (2.2)$$

L'intérêt de ce modèle est que pour des temps assez longs, l'expression précédente se simplifie par :

$$T_b - T_o = q' \left[\frac{1}{4\pi k_{sol}} \ln \left(\frac{4\alpha t}{r_b^2} - \gamma \right) + R'_b \right] \quad (2.3)$$

On remarque que si on trace la courbe de la variation de température en fonction du log du temps, on trouve facilement que la conductivité est donnée par :

$$k_{sol} = \frac{q'}{4\pi m} \quad (2.4)$$

Où m est la pente mesurée. D'autres méthodes utilisent le principe de superposition de courbes, ce qui permet d'utiliser le modèle de la ligne source infinie et d'autres solutions analytiques. Dans tout les cas, cette méthode mesure une variation de température globale tout au long du puits ce qui permet d'avoir une valeur moyenne de la conductivité représentative de la longueur interceptée par le forage. C'est une simplification, car le sol est rarement homogène et peut être très variable en fonction de la profondeur. En effet, les propriétés thermiques du sol sont influencées par la composition minéralogique du sol et de la roche, le taux d'humidité et les mouvements d'eau souterraine. Luo, J., J. Rohn et M. Bayer et A. Priess et W. Xiang (2014) mettent également en lumière l'incertitude existante sur l'évaluation des propriétés thermiques du sol. À l'aide de modèle numérique, ils ont étudié l'influence des propriétés thermiques et hydrauliques des différentes stratifications géologiques sur l'échange thermique entre le sol et le forage géothermique. Améliorer la détermination des propriétés thermiques du sol, tel qu'ils le suggèrent, introduisent parfaitement notre sujet d'étude et prouvent l'intérêt de celui-ci sur le design d'un système géothermique. C'est pourquoi bon nombre de chercheurs ont optimisé la mesure des propriétés thermiques des sols sur site de manière à avoir une idée locale de la

conductivité thermique. Certains ont également réussi à diminuer les coûts d'un test de réponse thermique en modifiant la source de chaleur et utilisant un courant électrique de basse tension. Nous détaillerons leurs travaux par la suite. Fujii, H., H. Okubo et R. Itoi (2006) proposent un nouveau test de réponse thermique en utilisant des capteurs de température à fibre optique. La méthode et l'exploitation de la mesure sont basées sur le travail de Jinguuji (2002), ce procédé est identique au procédé conventionnel, à la différence de la mesure de température. En effet, des capteurs de température à fibre optique sont installés le long du tube en U (Acuña, J., P. Mogensen et B. Palm (2011); Acuña, J., B. Palm (2010); Acuña, J., B. Palm (2013); Fujii, H., H. Okubo et R. Itoi (2006); Fujii, H., H. Okubo et K. Nishi et R. Itoi et K. Ohyama et K. Shibata (2009)). Basés sur l'effet de Raman qui explique la dépendance entre la longueur d'onde d'un matériel et la température, les thermomètres à fibre optique permettent de mesurer la température le long du puits à n'importe quelle profondeur et intervalle de temps dans les limites de résolution spatiale. Soldo, V., L. Leposa et L. Boban et S. Borovic (2015) ont utilisé la méthode de Fujii, H., H. Okubo et R. Itoi (2006) dans leurs travaux dans différentes régions de la Croatie dans le but de mesurer la conductivité thermique des sols. La stratégie énergétique de la Croatie a placé les énergies renouvelables comme l'une des priorités afin d'atteindre leurs objectifs d'ici 2020. Rohner, E., L. Rybach et U. Schärli (2005) ont développé une petite sonde sans fil composé d'un mini-enregistreur / microprocesseur programmé étanche à l'eau jusqu'à 100 Bar de pression. Ce capteur permet l'acquisition de la pression et de la température de l'eau circulant dans le puits géothermique préalablement chauffé par la circulation de l'eau. Ce type d'instrument est idéal pour les applications géothermiques, tel que les tests de réponse thermique. Martos, J., À. Montero et J. Torres et J. Soret et G. Martinez et R. Garcia-Olcina (2011), quant à eux, ont optimisé ce capteur le rendant autonome, sans-fil et d'une exactitude élevée. Une nouvelle méthode de TRT, qui est potentiellement moins cher que le TRT conventionnel parce qu'il fonctionne avec une source de chaleur de faible puissance, qui permet également de déterminer un profil vertical de la conductivité thermique du sous-sol et qui peut être déployée partout dans le monde, a été développé. Cette nouvelle méthode utilise des câbles chauffants insérés dans un seul tuyau du puits géothermique pour injecter la chaleur dans le sous-sol et est basée sur le travail de Raymond, J. (2010); Raymond, J., R. Therrien et L. Gosselin (2011).

La nouvelle méthode consiste à insérer une chaîne de section de câble chauffant dans le puits géothermique, comme le montre la Figure 2.1. Des câbles chauffants en sections permettent la réduction de la demande d'énergie électrique requise par rapport à un TRT conventionnel. La température est mesurée en profondeur le long des sections chauffantes pendant l'injection de chaleur et la restitution thermique, ce qui nécessite un temps de contrôle plus long que celui des TRT conventionnels. L'analyse de la température a été améliorée par l'utilisation de la solution de la ligne source finie. Cette solution prend en compte les effets axiaux des transferts de chaleur.

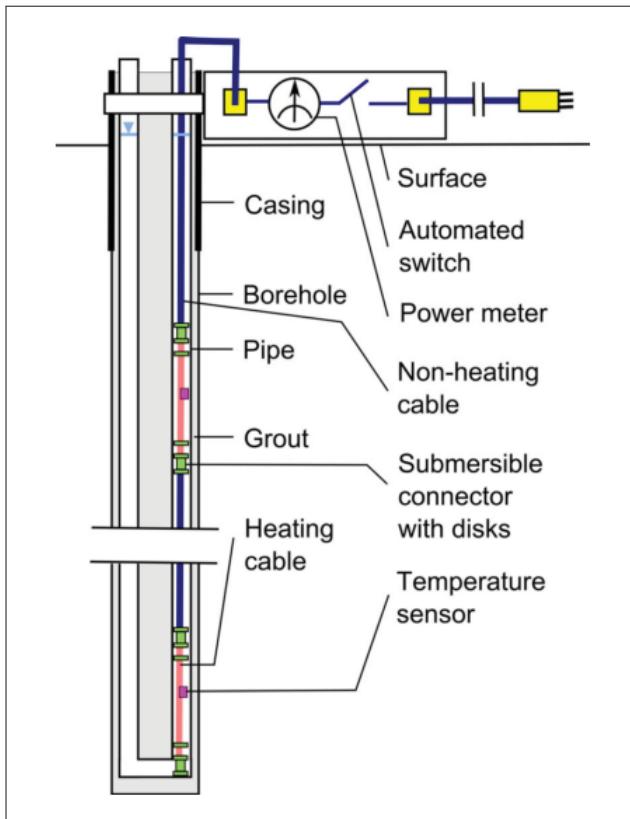


Figure 2.1 1^{er} prototype réalisé pour les TRT avec sections de câbles chauffants.
Données tirées de Raymond et Lamarche (2014)

Depuis Raymond, J., L. Lamarche (2014) ont suggérés que la convection naturelle induite par les éléments chauffants influençait la mesure de température qui fera l'objet d'investigation

future. Outre le fait que l'on puisse déterminer le profil de conductivité thermique, le test de réponse thermique distribué offrirait d'autres avantages que le simple fait d'optimiser la longueur de forage. En effet, Zhang, S., Y. Yu (2011) utilise ce genre de test afin de déterminer la conductivité thermique de la roche fracturée. Les données recueillies couplées au modèle de simulation permettent de déterminer l'influence de la température des écoulements d'eau souterraine sur les thermo-isolines. Radioti, G., R. Charlier et F. Nguyen et P. Radu (2013) utilisent également ce test, afin d'étudier les interactions entre les puits d'un champ de puits et le comportement du sol loin du puits. En plus de la conductivité thermique, ce test permet d'avoir une connaissance précise de la nature du sol le long du puits géothermique, de participer à l'élaboration d'une base de données pour les études paléoclimatiques et d'identifier les zones d'écoulement d'eau souterraine. Pehme, P.E., B.L. Parker et J.A. Cherry et J.W. Molson et J.P. Greenhouse (2013) quant à eux utilisent cette méthode afin d'identifier les fractures hydrauliques dans la masse rocheuse.

2.3 Mise en contexte

La revue de littérature réalisée dans ce chapitre porte sur l'état des connaissances des méthodes de tests de réponse thermique. La revue de littérature détaille bon nombre de procédés expérimentaux pour l'évaluation des propriétés thermiques du sous-sol. En passant de la méthode conventionnelle à la méthode par lecture distribuée des températures. Cette section visait à mettre en lumière les différents progrès qui ont été faits afin d'améliorer la mesure des propriétés thermiques des sols. Les travaux de Low, J.E., F.A. Loveridge et W. Powrie et D. Nicholson (2014) cherchant à s'affranchir de l'utilisation des tests de réponse thermique conventionnelle énergivore et coûteuse en termes de main-d'oeuvre introduisent parfaitement notre sujet d'étude qui s'intéresse aux tests de réponse thermique distribués et notre objectif qui est de trouver une alternative aux tests de réponse thermique conventionnels que l'on détaillera plus précisément par la suite. Après avoir détaillé les quelques tests de réponse thermique distribués, cette revue de littérature permet d'introduire le chapitre suivant. Le chapitre suivant aura pour objectif de déterminer si l'obtention d'un profil de conductivité thermique permet

bel et bien de diminuer la longueur de puits géothermique. La revue de littérature permet d'introduire également la seconde partie importante de ce mémoire. Comme suggéré par Raymond, J., L. Lamarche (2014), la convection naturelle pourrait influencer la mesure de température. Le second objectif sera de quantifier l'influence de la convection sur la mesure de température et de vérifier si celle-ci peut être négligée. Le présent mémoire vise donc à démontrer l'intérêt des tests de réponse thermique distribuée en général et d'améliorer l'efficacité des tests de réponse thermiques par sections de câbles chauffants.

CHAPITRE 3

UN TEST DE RÉPONSE THERMIQUE MULTI NIVEAU PERMET-IL D'OPTIMISER LA LONGUEUR DE PUITS GÉOTHERMIQUE ?

3.1 Introduction

La revue de littérature a mis en relief bon nombre de travaux portant sur les tests de réponse thermique distribués. L'objectif de ce chapitre est de s'appuyer sur les résultats extraits de ces travaux de recherche, afin de déterminer l'importance d'une évaluation des caractéristiques thermiques multi niveaux.

Nous allons essayer de déterminer s'il est possible d'optimiser la longueur du champ de puits géothermiques, en utilisant les TRT multi niveaux de façon à appliquer les concepts développés au nouveau TRT en développement.

Nous allons baser notre réflexion sur un bâtiment existant à Montréal, dont nous connaissons chacun des paramètres du champ de puits et du sol (voir Tableau 3.1), ainsi que des charges qui s'appliquent au bâtiment (voir Tableau 3.2) nécessaire au dimensionnement d'un champ de puits géothermiques. Toutes les données de ce projet et une partie du développement ont été extraits de la thèse de Langlois, A. (2010), étudiant de L'École Polytechnique de Montréal ayant travaillé sur les banques thermiques à matériau à changement de phase pour les pompes à chaleur géothermiques.

Nous allons faire le dimensionnement de ce champ selon la méthode de l'ASHRAE. (2003b). Les données nécessaires au dimensionnement du champ, ainsi que l'ensemble de chacune des étapes sont détaillées dans la méthode de Philippe, M., M. Bernier (2010), mais ne seront pas exposé dans ce développement. Les sections 3.2.1, 3.2.2 et 3.2.3 précisent chacune des données nécessaires au calcul de la longueur totale de puits, mais ne rentrent pas dans le détail de chacune d'elles, celles-ci seront répertoriées dans le Tableau 3.1. À la section 3.3, nous allons ensuite répéter l'opération, en changeant seulement la conductivité thermique, la diffusivité thermique et la température du sol non perturbé que l'on aura extrait des données des cinq

travaux de recherche, offrant un profil de conductivité thermique en fonction de la profondeur, issue de la revue de littérature.

3.1.1 Données initiales du projet

Tableau 3.1 Caractéristiques du champ de puits géothermiques utilisés dans cette étude

Paramètres		
<i>Sol</i>		
Conductivité thermique	[$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]	3.67 *
Diffusivité thermique	[$m^2/jour$]	0.148 *
Température du sol non perturbée	[°C]	12.08 *
<i>Champ de puits</i>	[-]	28
Espacement	[m]	6.1
Profondeur de tête	[m]	1
<i>Puits</i>		
Résistance thermique	[$m \cdot K \cdot W^{-1}$]	0.082
$r_{p,in}$	[m]	0.01725
$r_{p,ext}$	[m]	0.0211
k_{tuyaux}	[$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]	0.42
r_{puits}	[m]	0.075
h_{conv}	[$W \cdot m^{-2}$]	1000
L_U	[m]	0.1078
k_{coulis}	[$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]	1.61
k_{sol}	[$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]	3.67

Les données marquées par un astérisque ont été déterminées à l'aide d'un test de réponse thermique et d'un puits test, sur le site de la Maison du Développement Durable. Le fluide caloporteur utilisé est du propylène glycol 25% dont la chaleur spécifique C_p est de $3.972 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, et la masse volumique ρ est de $1020 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. En considérant des besoins thermiques maximaux de 505.7 kW , le débit massique total de fluide caloporteur circulant dans le système est de $25.8 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$.

3.2 L'équation d'ASHRAE

Voici l'équation recommandée par ASHRAE. (2003b) pour dimensionner un système géothermique vertical en boucle fermée.

$$L = \frac{q_h R_b + q_a R_a + q_m R_m + q_h R_h}{(T_0 + T_p) - \frac{T_{sortie,sol} + T_{entrée,sol}}{2}} \quad (3.1)$$

Où L est la longueur totale de l'échangeur géothermique (somme de la longueur de tous les puits), T_0 est la température non perturbée du sol, et T_p est la pénalité de température. Cette dernière représente le facteur de correction sur la température non perturbée du sol pour tenir compte de l'interaction thermique entre plusieurs puits (pour un champ d'un seul puits, $T_p = 0$). Les termes $T_{sortie,sol}$ et $T_{entrée,sol}$ sont les températures à la sortie et à l'entrée des puits géothermiques pour les conditions de design. Les termes q_a , q_m et q_h sont, respectivement, la charge thermique moyenne annuelle au sol, la charge thermique moyenne mensuelle pour le mois de design, et la charge thermique horaire de pointe au sol. Les termes R_a , R_m et R_h représentent les résistances thermiques équivalentes du sol pour des périodes respectives de plusieurs années (typiquement 10 ans), un mois et quelques heures. R_b est la résistance thermique équivalente du puits. L'équation évalue la longueur nécessaire de l'échangeur géothermique pour le pire scénario possible pour trois impulsions thermiques successives d'une durée de 10 ans suivis d'une période d'un mois et de 6 heures. L'équation est résolue deux fois, soit pour les pires conditions de chauffage et en climatisation. La valeur maximum déterminera la longueur requise de l'échangeur. Les paragraphes suivants fournissent des détails succincts sur chacun des termes de l'équation.

3.2.1 Les charges au sol

Les charges thermiques au sol représentent l'énergie puisée ou rejetée dans le sol par les PAC. Les différentes charges au sol à considérer dans le calcul de la longueur d'un échangeur géothermique (q_a , q_m et q_h) sont obtenues à partir des besoins thermiques horaires du bâtiment et

du coefficient de performance (COP) de la (ou des) PAC (voir Tableau 3.3). Les valeurs de q_a , q_m et q_h , calculées à partir des besoins horaires, sont montrées aux Tableau 3.2 et Tableau 3.3. Les colonnes *besoins thermiques horaires max* en chauffage et en climatisation représentent les besoins thermiques horaires de pointe du bâtiment pour chacun des mois en chauffage et en climatisation. Les colonnes *besoins totaux mensuels* en chauffage et en climatisation représentent les totaux mensuels des besoins thermiques du bâtiment en chauffage et en climatisation. Les trois dernières colonnes de droite du Tableau 3.3 représentent respectivement la charge au sol horaire maximale en chauffage et en climatisation q_h et la charge au sol moyenne mensuelle q_m . On remarque que pour la climatisation, les valeurs de q_h et q_m sont de 506 kW et -100 kW, respectivement, alors qu'en chauffage ces valeurs sont de -293 kW et 76 kW. Le déséquilibre thermique annuel du sol q_a , présenté au bas du Tableau 3.3, est égal à - 4.63 kW. Par convention, la valeur négative indique que le rejet thermique dans le sol est supérieur à l'extraction. Pour des fins de calculs, les besoins thermiques de pointe ainsi que les besoins totaux mensuels présentés au Tableau 3.3 seront utilisés.

3.2.2 Les températures

La température du sol non perturbé peut être obtenue à partir de différentes sources. Une approximation de celle-ci peut être faite en considérant la température moyenne de l'air sur une année Hellström, G. (1991). Cependant, l'essai de réponse thermique permet d'obtenir une valeur in-situ beaucoup plus exacte. Dans ce cas-ci, T_g a été évalué à 12.08 °C (voir Tableau 3.1). Les températures à l'entrée et à la sortie des puits géothermiques ($T_{\text{entrée},\text{sol}}$ et $T_{\text{sortie},\text{sol}}$) sont déterminées pour les conditions de design. La valeur de $T_{\text{sortie},\text{sol}}$, qui est aussi la température à l'entrée des PAC, a été fixée à 0 °C en chauffage et à 33 °C en climatisation. Tel que montré par Low, J.E., F.A. Loveridge et W. Powrie et D. Nicholson (2014), la pénalité de température peut avoir un impact très important sur le calcul de la température de la paroi du puits, et donc, sur la longueur calculée d'un échangeur géothermique. Ces derniers préconisent deux méthodes pour calculer T_p . La première est basée sur les "g-functions" de Eskilson (1987) et la deuxième approche est basée sur la fonction de corrélation F de Bernier, M. A. (2006). Notre

Tableau 3.2 Besoins thermiques et charges au sol pour le calcul de longueur des puits géothermiques

	Heures par mois	Chauffage		Climatisation		Charges au sol		
		Besoins thermiques horaires max	Besoins totaux mensuels	Besoins thermiques horaires max	Besoins totaux mensuels	Charge au sol max Chauffage (q_h)	Charge au sol max Climatisation (q_h)	Charge au sol mensuelle (q_m)
		[kW]	[kWh]	[kW]	[kWh]	[kW]	[kW]	[kW]
Janvier	744	-420	-85302	14	2157	-293	17	76
Février	672	-416	-66082	19	2156	-290	22	65
Mars	744	-260	-45806	38	3010	-181	45	38
Avril	720	-186	-23651	210	6663	-130	253	12
Mai	744	-36	-9352	284	24819	-25	342	-31
Juin	720	-27	-3222	391	49116	-19	470	-79
Juillet	744	-20	-1541	420	62538	-14	506	-100
Août	744	-27	-1927	420	61324	-19	506	-97
Septembre	720	-36	-7418	416	26096	-25	501	-36
Octobre	744	-121	-17993	155	5312	-84	187	8
Novembre	720	-252	-36790	19	2655	-176	23	31
Décembre	744	-404	-71220	16	2215	-281	19	63
Total			-370304		248060			

Tableau 3.3 COP de la (ou des) pompes à chaleur et déséquilibre thermique du sol étudié

COP en Chauffage	3.3
COP en Climatisation	4.9
Déséquilibre thermique annuel du sol (q_a) [kW]	-4.63

étude sera basée sur les "*g-functions*" de Eskilson, P. (1987) pour le calcul de la température de la paroi du puits. Eskilson, P. (1987) développe en 1987 un modèle numérique pour le calcul du transfert de chaleur entre les puits géothermiques et le sol. Son modèle permet de calculer l'évolution de la température à la paroi des puits soumis à une extraction constante de chaleur. Les résultats sont présentés sous la forme de courbes adimensionnelles, telles que montrées à la Figure 3.1, appelées "*g-functions*". Les "*g-functions*" ont été publiées pour une variété de géométries du champ de puits et d'espacements et sont d'ailleurs utilisées dans divers logi-

ciels de simulation énergétique des bâtiments, notamment eQuest et EnergyPlus. L'approche d'Eskilson est définie de la façon suivante :

$$T_b(\bar{t}) - T_0 = \frac{-q'_b}{2\pi k_s} g(\bar{t}, r_b/H, B/H, D/H) \quad (3.2)$$

où

- $T_b(\bar{t})$ est la température à la paroi des puits, en $^{\circ}\text{C}$;
- T_0 est la température non perturbée du sol, en $^{\circ}\text{C}$;
- q'_b est le taux de transfert de chaleur par unité de longueur de puits, en $\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$;
- k_s est la conductivité thermique équivalente du sol, en $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$;
- t est le temps, en $[s]$;
- t_s est le temps $t_s = H^2 / 9\alpha_s$ caractéristique du champ de puits, en $[s]$;
- r_b est le rayon des puits, en $[m]$;
- H est la longueur des puits, en $[m]$;
- B est l'espacement entre deux puits voisins, en $[m]$;
- B est la hauteur d'enfouissement de la tête du puits, en $[m]$;
- α_s est la diffusivité thermique du sol, en $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

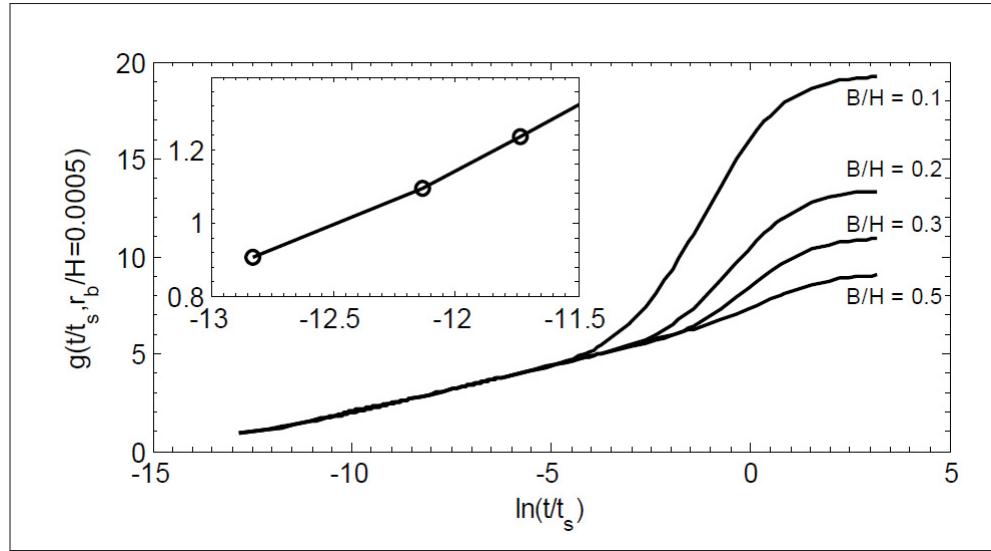


Figure 3.1 g-functions d'un champ de 6 par 3 puits. Données tirées de Cimmino et al (2012)

3.2.3 Les résistances thermiques

Les résistances thermiques équivalentes du sol tiennent compte du transfert de chaleur transitoire entre la paroi d'un puits géothermique et la température du sol non perturbé. La méthode de l'ASHRAE utilise la formule de Paul-Remund pour le calcul des résistances de puits. En utilisant les valeurs du Tableau 3.1, les résistances thermiques sont donc égales à :

$$\begin{aligned}
 R_h &= \frac{G(Fo_2)}{2 \cdot \pi \cdot k_s} = 0.0639 \text{ } m \cdot K \cdot W^{-1} \\
 R_m &= \frac{G(Fo_f) - G(Fo_2)}{2 \cdot \pi \cdot k_s} = 0.0986 \text{ } m \cdot K \cdot W^{-1} \\
 R_a &= \frac{G(Fo_f) - G(Fo_1)}{2 \cdot \pi \cdot k_s} = 0.1040 \text{ } m \cdot K \cdot W^{-1}
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

avec

$$\begin{aligned}
 Fo_f &= \frac{\alpha \cdot t_f}{r_b^2} \\
 Fo_1 &= \frac{\alpha \cdot (t_f - t_a)}{r_b^2} \\
 Fo_2 &= \frac{\alpha \cdot (t_f - t_m)}{r_b^2}
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

où

$$\begin{aligned}
 t_a &= N_a * 8760 \\
 t_m &= t_a + 730 \\
 t_f &= t_m + n_h
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

Les indices a , m et h apposées au temps t représentent la durée des trois impulsions thermiques décrites précédemment. Afin d'éviter le calcul relativement complexe de la fonction G , les calculs de cette étude seront faits pour des impulsions thermiques d'une durée de 10 ans, 1 mois et 6 heures. La résistance thermique équivalente d'un puits R_b est la résistance thermique entre le fluide caloporteur et la paroi du puits. La résistance thermique équivalente du puits est composée de trois résistances thermiques élémentaires et prend la forme suivante :

$$R_b = R_g + \frac{R_p + R_{conv}}{2} \tag{3.6}$$

Ces trois résistances thermiques, R_g , R_p et R_{conv} , sont respectivement la résistance du coulis, la résistance (par conduction) de chacun des tuyaux et la résistance convective à l'intérieur de chacun des tuyaux. Dans cet exemple, le calcul des résistances de convection et de conduction est traité à l'aide de l'approche basique. Pour le calcul de la résistance de coulis, Hellstrom a

proposé une approche basée sur une analyse analytique appelée la ligne source. Le résultat est :

$$R_g = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot k_{coulis}} \left[\ln\left(\frac{r_{puits}}{r_{p,ext}}\right) + \ln\left(\frac{r_{puits}}{L_U}\right) + \frac{k_{coulis} - k_{sol}}{k_{coulis} + k_{sol}} \cdot \ln\left(\frac{r_{puits}^4}{r_{puits}^4 - \left(\frac{L_U}{2}\right)^4}\right) \right] \quad (3.7)$$

Où h_{conv} est le coefficient de convection entre le fluide et le tuyau, $r_{p,in}$ et $r_{p,ext}$ sont respectivement les rayons intérieur et extérieur du tuyau, k_{tuyau} est la conductivité thermique du tuyau, k_{coulis} est la conductivité thermique du coulis, r_{puits} est le rayon du puits, L_U est la distance centre à centre entre les deux tuyaux du tube en U et k_{sol} est la conductivité thermique du sol. Pour l'exemple traité ici, les données du Tableau 3.1 permettent de déterminer R_g , R_p et R_{conv} et ensuite R_b :

$$R_{conv} = 0.0092 \text{ } m \cdot K \cdot W^{-1}$$

$$R_p = 0.0763 \text{ } m \cdot K \cdot W^{-1}$$

(3.8)

$$R_g = 0.0388 \text{ } m \cdot K \cdot W^{-1}$$

$$R_b = 0.0388 + \frac{0.0763 + 0.0092}{2} = 0.0816 \text{ } m \cdot K \cdot W^{-1}$$

3.2.4 Calcul de la longueur

Les données utilisées afin de déterminer la longueur totale de l'échangeur sont présentées ci-dessous. Ce sont les besoins en climatisation qui dominent et uniquement les calculs relatifs à ce mode sont présentés. Tous les calculs ont été réalisés à l'aide du logiciel de programmation Python. Le programme utilisé pour le calcul de la longueur de puits géothermiques est détaillé à l'Annexe II.

$$\begin{aligned}
q_{h,cl} &= -505713 \text{ W} \\
q_{m,cl} &= -100000 \text{ W} \\
q_{h,ch} &= 292730 \text{ W} \\
q_{m,ch} &= 76419 \text{ W} \\
q_a &= -4634 \text{ W} \\
T_g &= 12.08 \text{ }^{\circ}\text{C} \\
T_{entrée,sol} &= 28.1 \text{ }^{\circ}\text{C} \\
T_{sortie,sol} &= 33 \text{ }^{\circ}\text{C} \\
R_h &= 0.0639 \text{ m} \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1} \\
R_m &= 0.0985 \text{ m} \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1} \\
R_a &= 0.104 \text{ m} \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1} \\
R_b &= 0.0816 \text{ m} \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}
\end{aligned} \tag{3.9}$$

Tableau 3.4 Tableau récapitulatif des résultats de l'étude

Caractéristiques		
Conductivité thermique	[W · m ⁻¹ · K ⁻¹]	3.67
Diffusivité thermique	[m ² · jour ⁻¹]	0.148
Température sol non perturbée	[°C]	12.08
Données calculées		
Longueur totale	[m]	3689.6
Profondeur	[m]	131.8
Champ de puits	[−]	28

3.3 Comparaison de la méthode avec d'autres essais issus de la littérature

3.3.1 Introduction

Le but de cette section est de déterminer l'intérêt de la mesure de conductivité thermique multi niveaux par rapport à la méthode conventionnelle. C'est-à-dire que l'on visera à évaluer si le

profilage de conductivité thermique apporte un avantage au niveau du dimensionnement des systèmes. Pour ce faire, nous allons utiliser les données du projet et le développement précédemment évoqués, ainsi que différents profils de conductivité thermique issus de la littérature. Notre méthode ne permet pas d'avoir un profilage complet des conductivités thermiques comme ceux issus de la littérature, mais, en revanche, permet l'obtention de valeurs ponctuelles en fonction de la profondeur. Plusieurs chercheurs ont effectué des DTRT dernièrement, nous allons donc nous appuyer sur les résultats de leurs recherches afin d'en démontrer l'intérêt. Globalement, cet exercice nous permettra de déterminer si le profilage complet est souhaité, pour le dimensionnement d'un système géothermique, ou si une valeur moyennée sur la longueur totale d'un puits est satisfaisante. L'interface Python a été utilisée afin de traduire la démarche décrite précédemment sous forme de programme, afin de faciliter la démarche. Le programme utilisé est disponible à l'Annexe II. Les données extraites de chaque étude sont le profil de conductivité thermique en fonction de la profondeur, la capacité thermique volumique et la température initiale de chaque étude. Chaque étude est répertoriée dans le Tableau 3.5.

Tableau 3.5 Répertoire des travaux de recherche utilisés dans cette étude.

Étude	Auteur	Titre	Année
1	Fujii, H., et al	An improved thermal response test for U-tube ground heat exchanger based on optical fiber thermometers	2009
2	Lanini, S., et al	Improvement of borehole thermal energy storage design based on experimental and modeling results	2013
3	Luo, J., et al	Analysis on performance of boreholes heat exchanger in a layered subsurface	2014
4	Soldo, V., et al	Implementation of the Distributed Thermal Response Test at Characteristic Geological Regions throughout Croatia	2015
5	Rohner, E., et al	A New, Small, Wireless Instrument to Determine Ground Thermal Conductivity in-situ for Borehole Heat Exchanger Design	2005

3.3.1.1 Étude N°1

La Figure 3.2 présente la composition du sol du forage de l'étude de Fujii, H., H. Okubo et K. Nishi et R. Itoi et K. Ohyama et K. Shibata (2009) et le profil de température initiale, ce qui va nous permettre d'estimer la capacité thermique volumique du sol, afin d'en calculer la diffusivité thermique. La capacité thermique volumique est déterminée à l'aide de la bibliothèque de données du logiciel Earth Energy Designer. Afin de faciliter l'étude, la composition du sol présentée à la Figure 3.2 a été assimilée à du "Granite" pour le puits de 63m d'une capacité thermique volumique respective de $3.4 \times 10^6 [J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}]$.

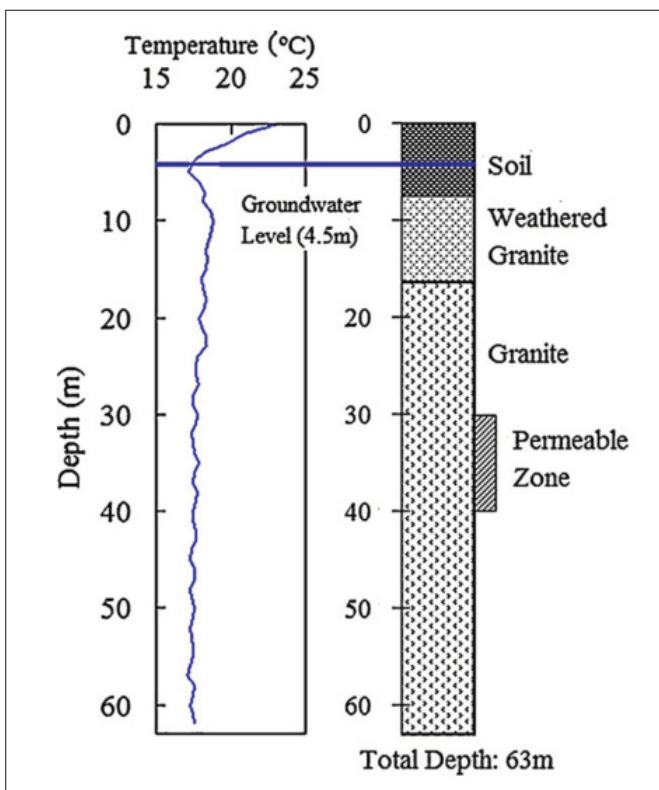


Figure 3.2 Coupe stratigraphique et profil de température initiale du puits de 63m. Données tirées de Fujii, H., H. Okubo et K. Nishi et R. Itoi et K. Ohyama et K. Shibata (2009)

La diffusivité thermique est calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$\alpha = \frac{k}{\rho \times c} = \frac{k}{C} \quad (3.10)$$

où

- α est la diffusivité thermique du matériau, en $[m^2 \cdot jour^{-1}]$;
- k est la conductivité thermique du matériau, en $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$;
- ρ est la masse volumique du matériau, en $[kg \cdot m^{-3}]$;
- c est la capacité thermique massique du matériau, en $[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$;
- C est la capacité thermique volumique du matériau, en $[J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}]$.

La Figure 3.4 présente la moyenne de la conductivité thermique sur la longueur de forage. Celle-ci est calculée de la façon suivante :

$$Moyenne_i = \sum_{i=0}^{L_{max}} \frac{(Moyenne_{i-1} \times (i-1)) + k_i}{i} \quad (3.11)$$

où

- $Moyenne_i$ est la moyenne des conductivités thermiques sur la profondeur considérée, en $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$;
- $Moyenne_{i-1}$ est la moyenne des conductivités thermiques précédente, en $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$;
- k_i est la conductivité thermique de la portion considérée, en $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$.

Soit, pour une moyenne des conductivités thermiques de $2.59 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ (voir Figure 3.4) et une capacité thermique volumique de $3.4 \times 10^6 J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$, la diffusivité thermique est égale à :

$$\alpha = \frac{k}{C} \quad (3.12)$$

$$\alpha = \frac{2.59}{3.4 \times 10^6} \times (24 \times 3600) = 0.0658 m^2 \cdot jour^{-1}$$

Par la suite, ce calcul ne sera pas répété, les résultats seront répertoriés dans un tableau (tel que montré dans le Tableau 3.6). À l'aide des données collectées dans le Tableau 3.6, nous allons pouvoir calculer la longueur de chacun des puits suivant chaque configuration. Nous allons pouvoir déterminer, ainsi, l'importance et l'influence de l'évaluation de la conductivité thermique multi niveau sur le dimensionnement d'un champ de puits géothermique. En utilisant les données et le précédent développement, nous pouvons, en remplaçant la conductivité thermique, la diffusivité thermique et la température du sol non perturbée de la précédente équation, déterminer la longueur de puits nécessaire. Nous déterminerons également le nombre de puits nécessaire, afin d'avoir une idée de l'influence de la moyenne des conductivités thermiques optimales sur l'empreinte du champ géothermique.

Le profil de conductivité thermique, montré ci-après, voir Figure 3.3 est extrait de l'étude de Fujii, H., H. Okubo et K. Nishi et R. Itoi et K. Ohyama et K. Shibata (2009). Nous pouvons visuellement remarquer que le profil de conductivité est maximum à 35m de profondeur et sa valeur est de $3.92 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. De 35m à la fin du puits, la conductivité chute pour atteindre la valeur d'environ $2.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. De ce profil de conductivité thermique, nous allons déterminer le profil des moyennes des conductivités thermiques, tel que montré à la Figure 3.4. De ce profil, nous allons extraire la valeur moyennée des conductivités thermiques sur toute la longueur de puits, qui est de $2.59 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (voir Figure 3.4). D'un test de réponse thermique conventionnel, c'est la valeur moyennée des conductivités thermiques sur toute la longueur de puits qui est extraite, tout comme indiqué à la Figure 3.4. Cependant, comme remarqué à la Figure ??, ce n'est pas forcément la moyenne maximale. C'est pourtant celle qui nous intéresse, car, plus la moyenne des conductivités est élevée, moins la longueur des puits géothermiques est importante. La valeur maximale des conductivités thermiques est déduite de la Figure ??, celle-ci est atteinte à seulement 45m de profondeur, et est égale à $2.65 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. On suppose ici que seul un test de réponse thermique distribué permet d'obtenir ce genre de profil et d'optimiser la mesure.

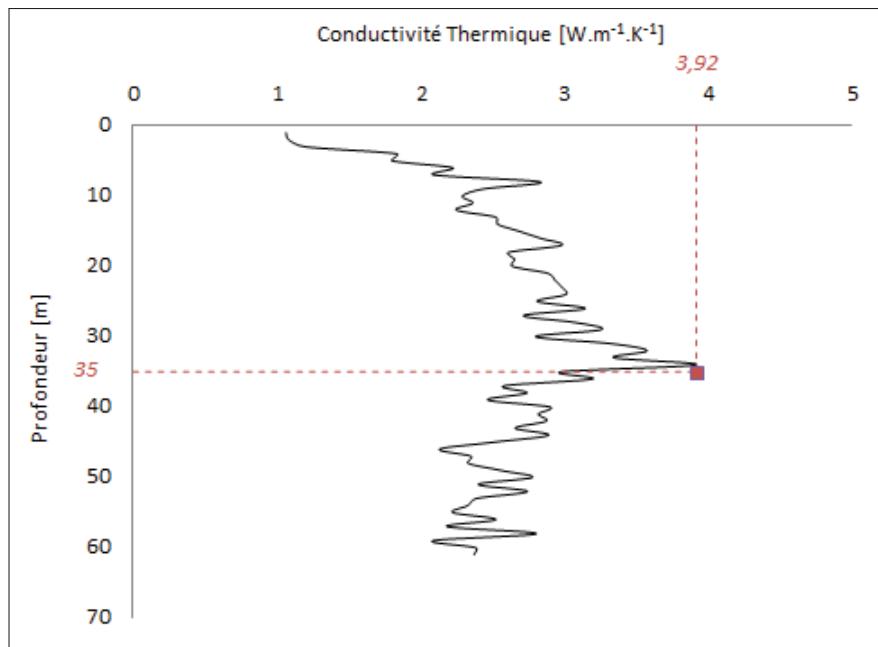


Figure 3.3 Conductivité thermique en fonction de la profondeur avec indication de la conductivité thermique maximale à 35m.
Données tirées de Fujii, H., H. Okubo et K. Nishi et R. Itoi et K. Ohyama et K. Shibata (2009)

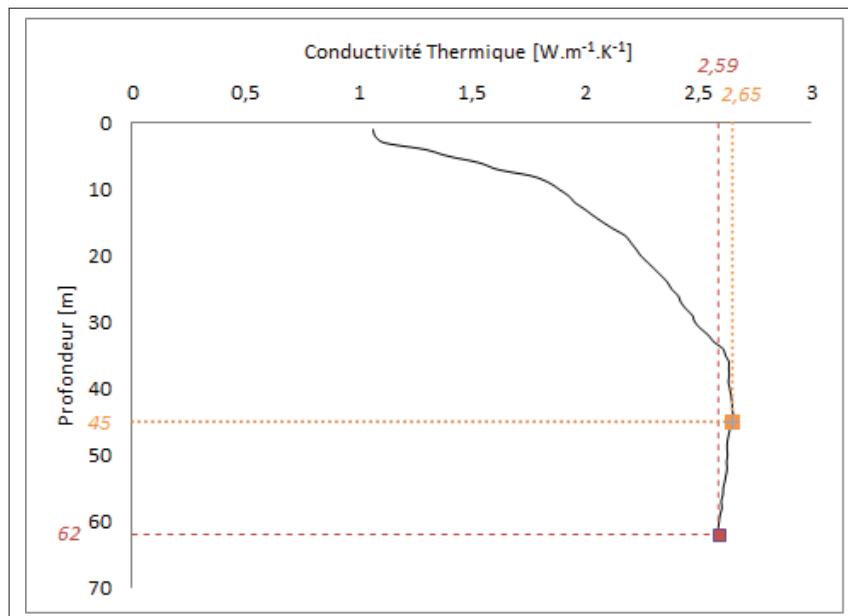


Figure 3.4 Moyenne de la conductivité thermique en fonction de la profondeur avec indication de la moyenne à 62m et 45m.
Données tirées de Fujii, H., H. Okubo et K. Nishi et R. Itoi et K. Ohyama et K. Shibata (2009)

Des résultats extraits du profil des moyennes des conductivités thermiques, nous allons donc calculer l'impact du changement des conductivités thermiques sur la longueur finale des puits géothermiques. En appliquant les résultats, extraits de la Figure 3.4, au calcul effectué à la sous-section 3.2.4, l'impact sur la longueur totale de puits géothermique, d'un test de réponse thermique distribué par rapport à un test de réponse thermique conventionnel, pourra être déterminé.

Tableau 3.6 Caractéristiques des propriétés thermiques
du sol utilisées dans cette étude.

Caractéristiques		Moyenne $\sim 62m$	Moyenne $\sim 45m$
Conductivité thermique	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	2.59	2.65
Diffusivité thermique	$[m^2 \cdot jour^{-1}]$	0.0658	0.0673
Température sol non perturbée	$[^{\circ}C]$		16
Capacité thermique volumique	$[J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}]$		3.4×10^6
Données calculées		<i>Conventionnel</i>	<i>Distribué</i>
Longueur totale	[m]	4670.0	4631.2 (-0.9%)
Profondeur	[m]	62	45 (-27.4%)
Nombre de puits	[-]	76	103 (+35.5%)

3.3.1.1.1 Analyse

Pour les résultats extraits de l'étude N°1, une diminution de 0.9 % de la longueur totale de puits géothermique est remarquée lors de l'utilisation d'un test de réponse thermique distribué. La profondeur des puits a également diminué de 27.4 %. En revanche, le champ de puits, quant à lui, a augmenté de 35.5%. L'optimisation de la longueur peut induire des contraintes importantes, comme l'augmentation de la surface couverte par le champ de puits.

3.3.1.2 Étude N°2

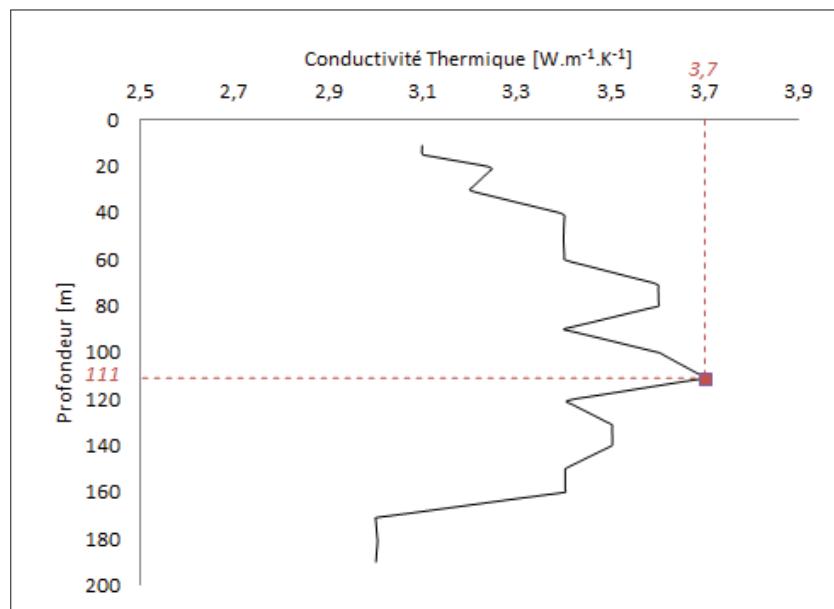


Figure 3.5 Conductivité thermique en fonction de la profondeur avec indication de la conductivité thermique maximale à 111m.
Données tirées de Lanini, S., F. Delaleux et X. Py et R. Olivès et D. Nguyen (2014)

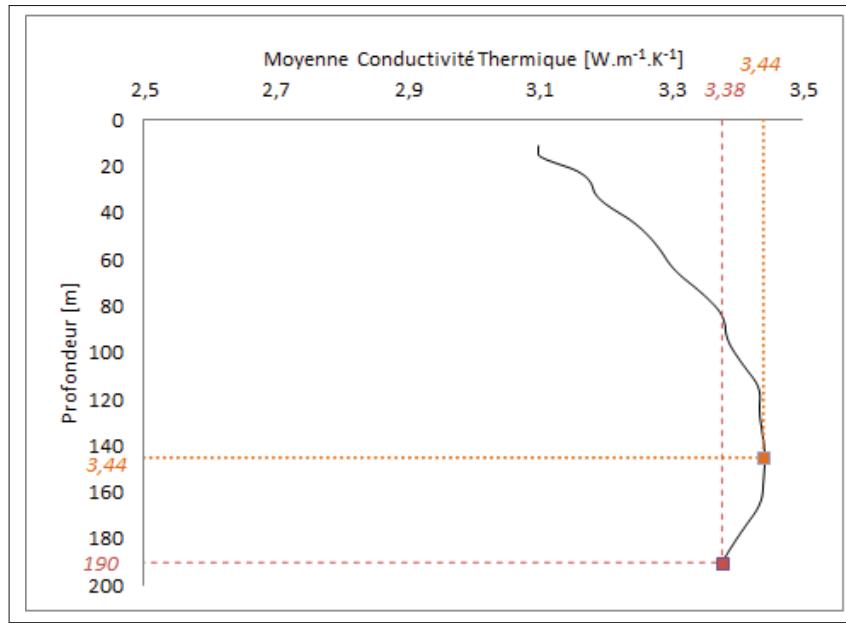


Figure 3.6 Moyenne de la conductivité thermique en fonction de la profondeur avec indication de la moyenne à 190m et 145m.
Données tirées de Lanini, S., F. Delaleux et X. Py et R. Olivès et D. Nguyen (2014)

La capacité thermique volumique est extraite de l'étude de Lanini, S., F. Delaleux et X. Py et R. Olivès et D. Nguyen (2014). Le sol étudié est fait de roche encaissante de capacité thermique volumique C égale à $2.50 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$. D'après l'étude, la température initiale est de 19°C .

Tableau 3.7 Caractéristiques des propriétés thermiques du sol utilisées dans cette étude

Caractéristiques		Moyenne $\sim 190m$	Moyenne $\sim 145m$
Conductivité thermique	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	3.38	3.44
Diffusivité thermique	$[\text{m}^2 \cdot \text{jour}^{-1}]$	0.1168	0.1189
Température sol non perturbée	$[\text{°C}]$		19
Capacité thermique volumique	$[\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}]$		2.5×10^6
Données calculées		Conventionnel	Distribué
Longueur totale	[m]	5287.1	5253.3 (-0.6%)
Profondeur	[m]	190	145 (-23.7%)
Nombre de puits	[-]	28	37 (+32.1%)

3.3.1.2.1 Analyse

Le résultat que l'on peut extraire de la Figure 3.6 est supposé identique à celui que l'on pourrait retrouver à l'aide d'un test de réponse thermique conventionnel. Une conductivité thermique moyenne de $3.38 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$ aurait donc été utilisée pour le dimensionnement d'un système géothermique. D'un test de réponse thermique distribué, nous aurions pu extraire le résultat montré à la Figure 3.5, c'est-à-dire une conductivité thermique de $3.44 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$. Pour une profondeur de forage moindre, nous avons une meilleure conductivité moyenne. À l'aide de l'analyse, nous pouvons montrer qu'en utilisant une conductivité thermique moyenne de $3.44 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$, nous diminuons la longueur totale de l'échangeur de 0.6% . La profondeur étant diminuée de 23.7% , la surface couverte par le champ de puits quant à elle augmente de 32.1% .

3.3.1.3 Étude N°3

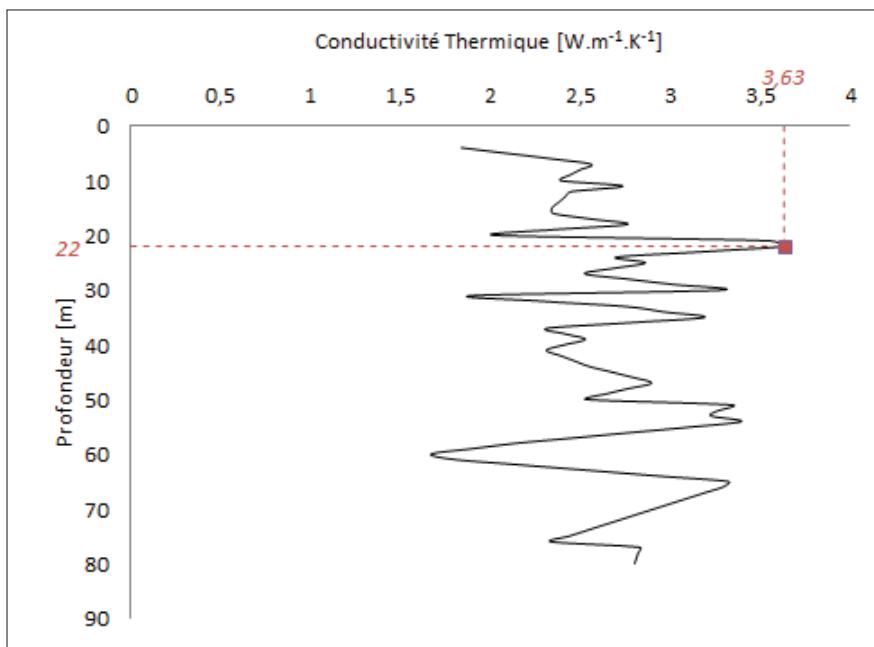


Figure 3.7 Conductivité thermique en fonction de la profondeur
avec indication de la conductivité thermique maximale à 22m.
Données tirées de Luo, J., J. Rohn et M. Bayer et A.Priess et W.
Xiang (2014)

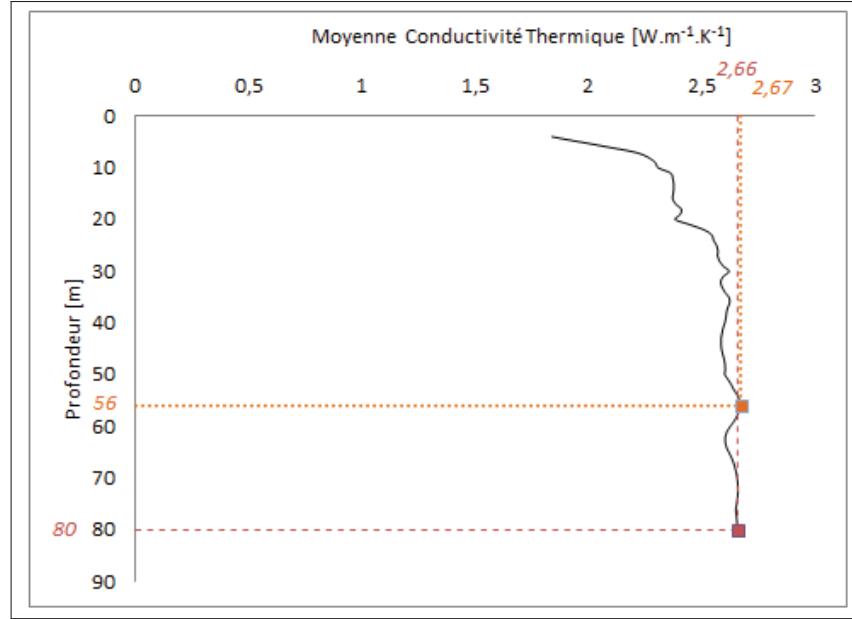


Figure 3.8 Moyenne de la conductivité thermique en fonction de la profondeur avec indication de la moyenne à 80m et 56m.
Données tirées de Luo, J., J. Rohn et M. Bayer et A.Priess et W. Xiang (2014)

Tableau 3.8 Caractéristiques des propriétés thermiques du sol utilisées dans cette étude

Caractéristiques		Moyenne $\sim 80m$	Moyenne $\sim 56m$
Conductivité thermique	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	2.66	2.67
Diffusivité thermique	$[m^2 \cdot jour^{-1}]$	0.1045	0.1049
Température sol non perturbée	$^{\circ}C$		11.9
Capacité thermique volumique	$[J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}]$		2.2×10^6
Données calculées		Conventionnel	Distribué
Longueur totale	[m]	4130.1	4124.0 (-0.1%)
Profondeur	[m]	80	56 (-23.7%)
Nombre de puits	[-]	52	74 (+42.3%)

3.3.1.3.1 Analyse

Dans cette étude également, l'analyse montre une diminution de la longueur totale de forage géothermique. Cette faible diminution de 0.1% s'accompagne d'une diminution de 23.7% de

la longueur de puits et d'une augmentation de 42.3% de l'empreinte de la surface du champ de puits.

3.3.1.4 Étude N°4

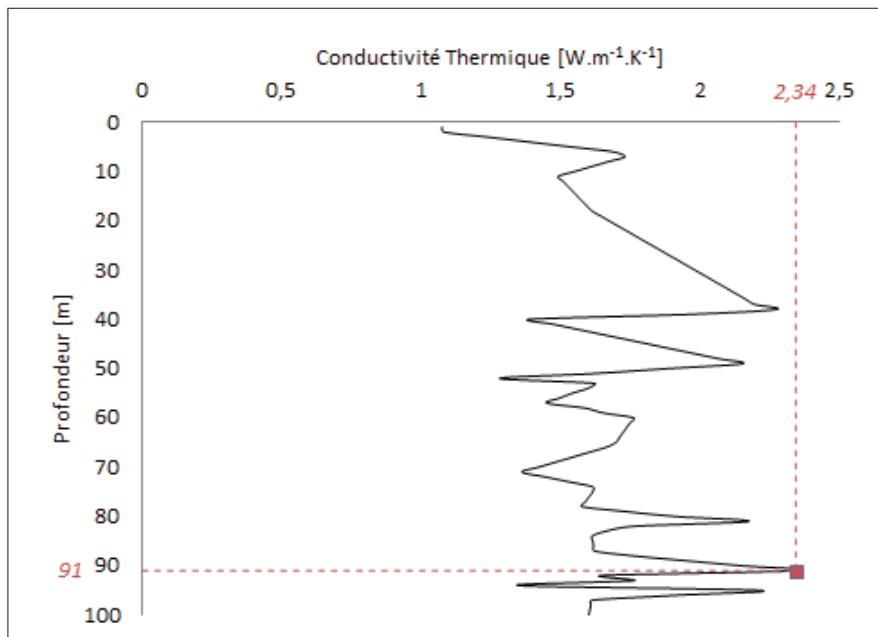


Figure 3.9 Conductivité thermique en fonction de la profondeur avec indication de la conductivité thermique à 91m. Données tirées de Soldo, V., L. Leposa et L. Boban et S. Borovic (2015)

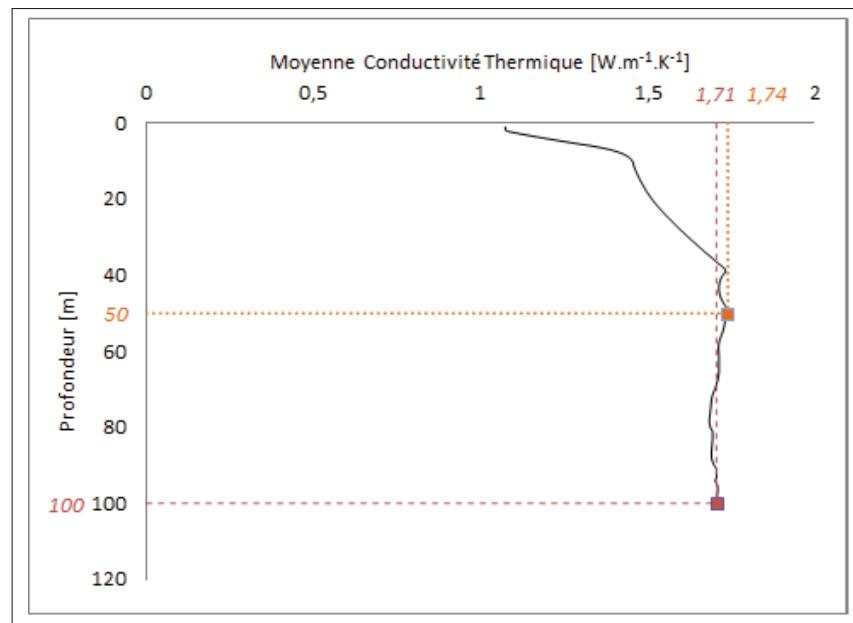


Figure 3.10 Moyenne de la conductivité thermique en fonction de la profondeur avec indication de la moyenne à 100m et 50m.
Données tirées de Soldo, V., L. Leposa et L. Boban et S. Borovic (2015)

Tableau 3.9 Caractéristiques des propriétés thermiques du sol utilisées dans cette étude

Caractéristiques	Moyenne $\sim 100m$	Moyenne $\sim 50m$
Conductivité thermique [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	1.71	1.74
Diffusivité thermique [m ² · jour ⁻¹]	0.0672	0.0683
Données calculées		
Température sol non perturbée [°C]		14.92
Capacité thermique volumique [J · m ⁻³ · K ⁻¹]		2.2×10^6
Données calculées	<i>Conventionnel</i>	<i>Distribué</i>
Longueur totale [m]	5700.3	5656.5 (-0.8%)
Profondeur [m]	100	50 (-50.0%)
Nombre de puits [-]	57	113 (+98.2%)

3.3.1.4.1 Analyse

Idem pour cette étude, l’analyse révèle une diminution de 0.8% de longueur de forage géothermique, une diminution de 50% de la profondeur de forage et une augmentation de 98.2% de l’empreinte de la surface du champ de puits.

3.3.1.5 Étude N°5

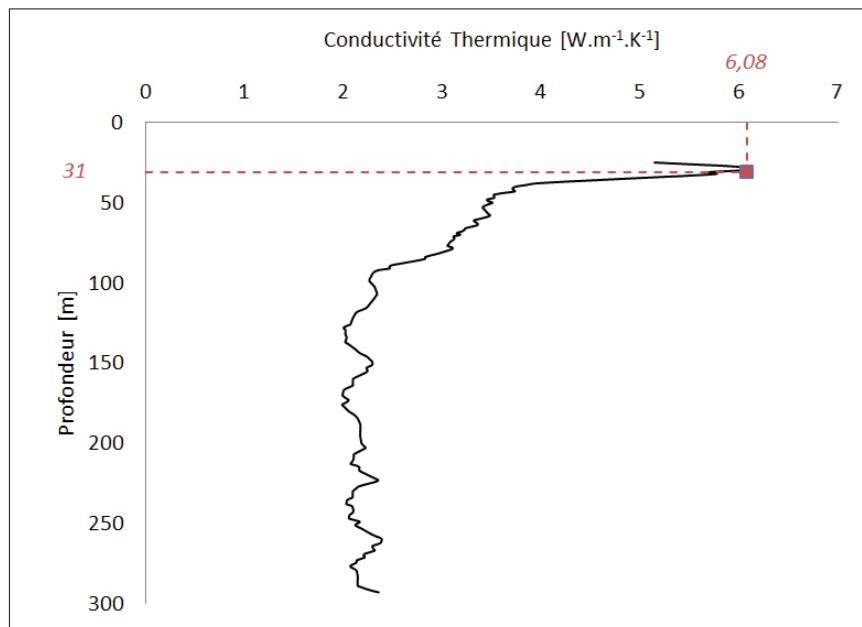


Figure 3.11 Conductivité thermique en fonction de la profondeur avec indication de la conductivité thermique à 31m.
Données tirées de Rohner, E., L. Rybach et U. Schärli (2005)

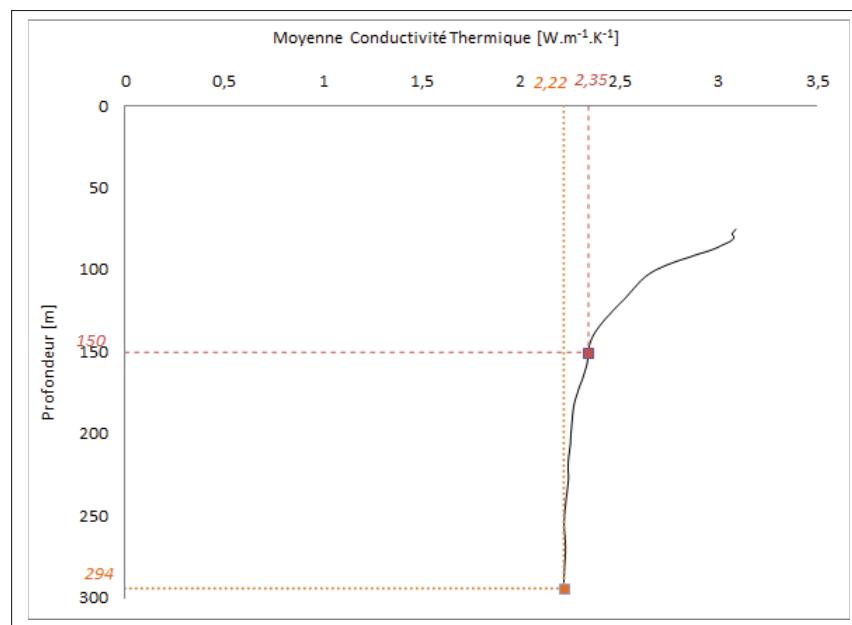


Figure 3.12 Moyenne de la conductivité thermique en fonction de la profondeur avec indication de la moyenne à 294m et 150m.
Données tirées de Rohner, E., L. Rybach et U. Schärli (2005)

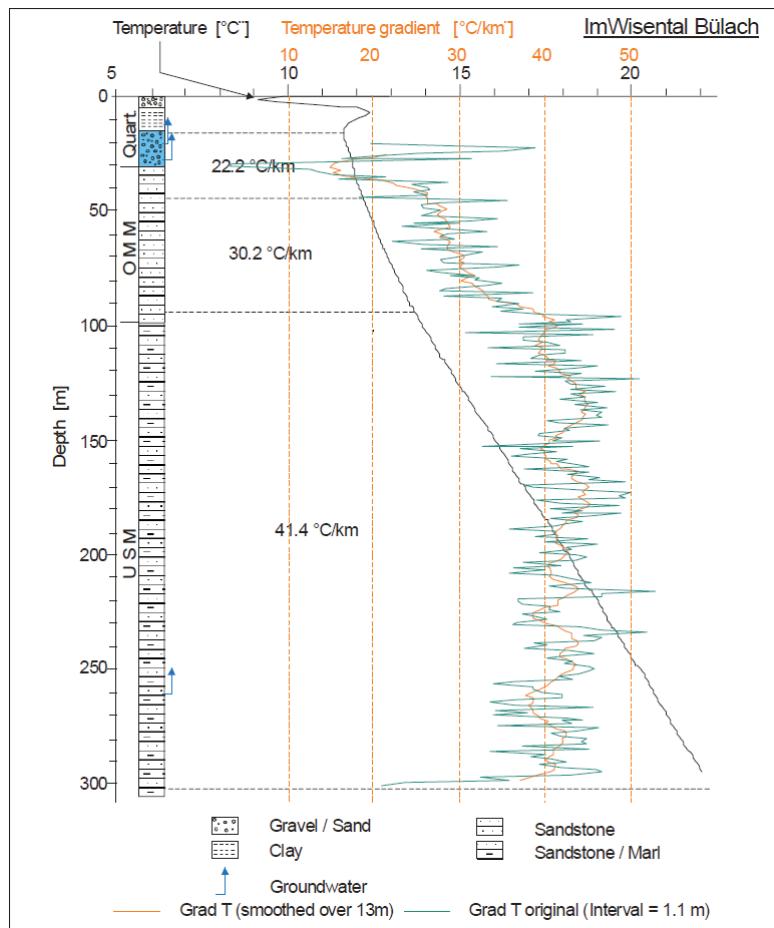


Figure 3.13 Profil de température initiale. Données tirées de Rohner, E., L. Rybach et U. Schärli (2005)

Probe	Depth	Lithology	λ_m	$\Delta\lambda_m$	ρ_m	ϕ_{eff}	$\Delta\phi_{eff}$	λ_f	$\Delta\lambda_f$
			[W/m,K]	[W/m,K]	[g/cm³]			[W/m,K]	[W/m,K]
IW-1	5 - 18 m	Clay						1.69	0.05
IW-2	18 - 28 m	Gravel	3.55	0.18	2.69	0.20	0.05	2.50	0.11
W-1	72 - 80 m	Middle-/Coarse-sandstone	2.89	0.07	2.48	0.20	0.05	2.12	0.06
W-2	104 - 106 m	Marl	2.19	0.09	2.34	0.20	0.04	1.70	0.02
IW-3	112 - 126 m	Marl/Fine-sandstone	2.17	0.09	2.48	0.17	0.02	1.74	0.01
W-3	148 - 152 m	Fine-sandstone/Marl	2.37	0.20	2.59	0.15	0.01	1.95	0.03
IW-4	150 - 160 m	Fine-sandstone/Marl	2.64	0.07	2.53	0.12	0.02	2.23	0.02
IW-5	210 - 226 m	Fine-sandstone/Marl	2.69	0.20	2.57	0.13	0.01	2.22	0.03
IW-6	228 - 248 m	Middle-sandstone/Marl	2.62	0.14	2.57	0.13	0.01	2.17	0.02
W-4	252 - 272 m	Marl/Siltstone	2.20	0.07	2.55	0.16	0.01	1.79	0.01
IW-7	278 - 298 m	Marl	2.07	0.15	2.46	0.17	0.02	1.69	0.02

Figure 3.14 Sommaire des données caractéristiques du sol étudié. Données tirées de Rohner, E., L. Rybach et U. Schärli (2005)

La Figure 3.11 montre une conductivité thermique très élevée près de la surface. La raison est la suivante : La méthode d'analyse de Rohner, E., L. Rybach et U. Schärli (2005) ne prend pas en considération les changements paléoclimatiques de température de surface et l'effet de la topographie sur le gradient géothermique. En surface, donc, nous ne pouvons pas considérer les résultats comme fiables. Nous allons alors commencer notre analyse à partir de 75m de profondeur. La capacité thermique volumique du sol étudié est déterminée à l'aide du logiciel EED (Earth Energy Designer) et des données extraites de la Figure 3.14. Nous allons considérer que les 300m du sol étudié sont constitués principalement de sable et de roche sédimentaire, appelée marne. Les capacités thermiques volumiques C de ses deux matériaux sont respectivement de 2.0 et $2.3 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$. Nous admettrons que la capacité thermique volumique globale C du sol étudié est donc de $2.1 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$.

Tableau 3.10 Caractéristiques des propriétés thermiques du sol utilisées dans cette étude

Caractéristiques		Moyenne $\sim 150\text{m}$	Moyenne $\sim 100\text{m}$
Conductivité thermique	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	2.22	2.35
Diffusivité thermique	$[\text{m}^2 \cdot \text{jour}^{-1}]$	0.0913	0.0967
Température sol non perturbée	$[\text{°C}]$	15	
Capacité thermique volumique	$[\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}]$		2.1×10^6
Données calculées		<i>Conventionnel</i>	<i>Distribué</i>
Longueur totale	[m]	5171.0	5050.4 (-2.3%)
Profondeur	[m]	294	150 (-49.0%)
Nombre de puits	[$-$]	18	34 (+88.9%)

3.3.1.5.1 Analyse

Cette étude compare l'analyse de la conductivité thermique moyenne sur la longueur de puits (294m), à la longueur de puits standard au Québec, c'est-à-dire 150m. Nous avons supprimé également les 75 premiers mètres de valeurs jugeant celle-ci comme peu fiable. De la Figure 3.12, nous avons pu extraire les données contenues dans le tableau 3.10. Nous remarquons une diminution de 2.3% de la longueur de forage géothermique. Une augmentation de 88% de la surface couverte par le champ de puits est induite par la diminution de la longueur de forage.

3.4 Conclusion

Pour chacune des analyses, nous avons essayé de comparer la meilleure conductivité thermique moyenne à celle obtenue sur l'ensemble de la profondeur du forage, sauf pour la dernière étude, où nous avons comparé la moyenne des conductivités thermiques sur la longueur totale du forage à celle que l'on obtient pour une profondeur de forage standard au Québec, c'est-à-dire 150m. La majorité de nos résultats indiquent une faible diminution de la longueur de forage, une diminution variant entre 0.1% et 2.3% de la longueur de forage géothermique nécessaire. La faible diminution de la longueur de forage géothermique relevée sur l'ensemble de nos résultats nous permet de dire que le profilage n'est pas essentiel au pour le dimensionnement d'un système géothermique face à un pratique du secteur commercial. Tous nos résultats montrent que la longueur de forage a été optimisée, mais à quel prix ? En effet, le profilage nous permet de déterminer à quelle profondeur la moyenne des conductivités thermique est la plus élevée, mais cette profondeur conditionne également la surface de l'empreinte de champs de puits géothermique. Comme le montre l'ensemble de nos résultats, les performances optimales sont parfois atteintes avec une longueur totale et une profondeur de puits réduit, ce qui a pour cause d'augmenter l'empreinte de la surface de notre champ de puits géothermique. En effet, nos résultats montrent une augmentation de la surface couverte par le champ variant entre +30.8% et +88.9%. L'empreinte du champ de puits est limitée, la plupart du temps, par des contraintes extérieures. Cela veut donc dire que le dimensionnement ne sera optimal que lorsque l'empreinte du champ de puits ne sera pas contrainte. Plus généralement, la diminution de coût associée à celle de la réduction de la longueur ne compensera probablement pas les coûts associés à l'augmentation de la surface de l'empreinte. Ce travail repose sur 5 cas de terrain où des données sont disponibles. Il n'y a pas de conclusion générale à faire, car il pourrait y avoir des cas de terrain où la diminution des coûts liés à la réduction de la longueur compensera les coûts associés à l'augmentation de la sur face de l'empreinte. Rappelons que l'avantage de la méthode TRT avec câbles chauffants est au niveau de la réduction de coûts et non au niveau du profilage des conductivités thermiques.

CHAPITRE 4

DESCRIPTIF ET FONCTIONNEMENT DE LA NOUVELLE MÉTHODE ET DU PROTOTYPE

4.1 Introduction

Le but de la recherche consiste à acquérir des résultats expérimentaux de TRT avec câbles chauffants permettant des mesures ponctuelles à différentes profondeurs des propriétés thermiques du sous-sol sur trois puits géothermiques. Ces mesures permettront de déterminer la conductivité thermique du sous-sol et contribuer à l'amélioration de l'état des connaissances globales sur cette méthode de mesure, aussi de quantifier l'impact de la convection naturelle sur la mesure de température. Des rondelles perforées fait de plastique souple seront installées sur les câbles chauffants afin de bloquer les mouvements de convection et de déterminer leurs effets sur la mesure de température. Le TRT avec câbles chauffants à pleine échelle est dédié à la mesure ponctuelle des propriétés thermiques d'un puits de profondeur standard au Québec, c'est-à-dire 150m de profondeur. Celui-ci est muni de 12 à 15 sections chauffantes, alors que nos essais se dérouleront à plus petite échelle. Le site expérimental est muni de trois forages d'une dizaine de mètres et, ceux-ci, seront testés avec un câble muni que d'une seule section chauffante. La réalisation des tests expérimentaux constitue donc une part importante du présent travail puisque ces résultats permettront de répondre aux questions précédentes. La méthodologie expérimentale et les différents essais effectués y sont également présentés.

4.2 Description de la nouvelle méthode et du prototype

Le prototype utilisé lors des tests, tel qu'illustré à la Figure 4.1, permet l'acquisition de température et de puissance sur trois forages simultanément. En comparaison aux autres procédés de tests de réponse thermique distribués, la méthode d'injection de chaleur diffère totalement. Les procédés de test de réponse thermique distribués évoqués dans la revue de littérature utilisent le même système d'injection de chaleur que le système conventionnel. C'est-à-dire une

circulation d'eau chauffée dans un tube en U. La différence entre le TRTD et le système conventionnel réside dans le système d'acquisition de température, par fibre optique généralement. La méthode d'injection de chaleur utilisée lors des tests suivants réside dans l'utilisation de câbles chauffants disposés à des profondeurs bien précises sur la longueur du puits. Le prototype est composé d'un boîtier de commande étanche à l'eau qui est fixé sur la tête de puits et renferme tous les composants électriques (Figure 4.1). Le système est orchestré par une minuterie industrielle Aube (Model TI040) qui contrôle la durée de l'injection de chaleur. Le prototype est protégé par un disjoncteur en cas de surcharge électrique. Le courant électrique entre dans le boîtier de commande par l'intermédiaire de la minuterie et des trois compteurs de puissance avec des enregistreurs de données permettant d'enregistrer la puissance électrique induite par les sections de câble chauffant. Le courant traverse ensuite les trois unités d'alimentation de découpage (Power Swicthing Supply) qui permettent de délivrer la bonne puissance au niveau des sections chauffantes. Les sections de câble chauffant sont reliées à la boîte de commande et pénètrent dans un tuyau à l'intérieur des trois puits.

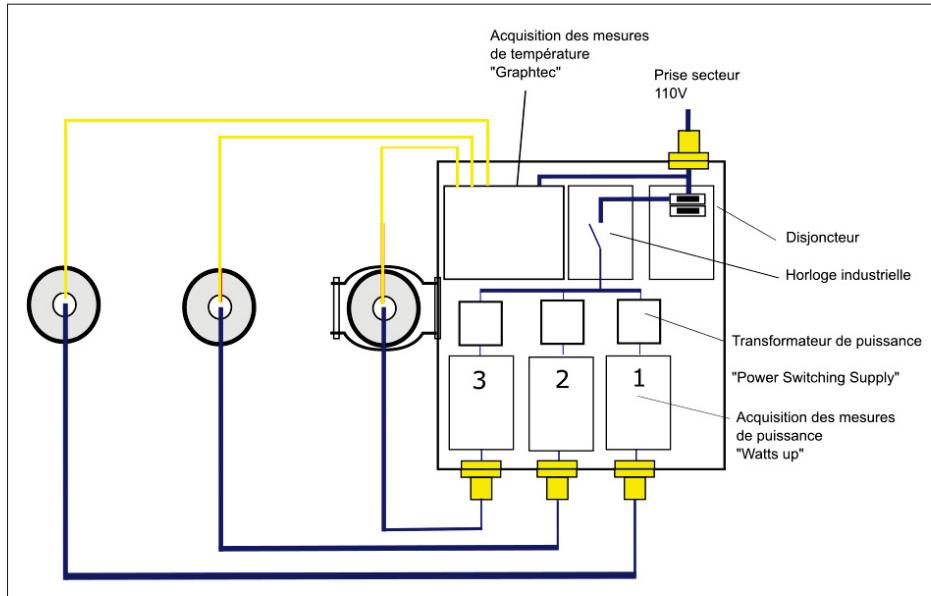


Figure 4.1 Dispositif expérimental

Le câble utilisé est un câble chauffant de marque "SunTouch ProMelt®" (voir Figure 4.2). L'isolation du conducteur se fait par un thermoplastique (ETFE) avec une gaine extérieure en polyuréthane qui résiste à la haute température tout en fournissant une rigidité et une protection mécanique nécessaire à l'introduction du câble à l'intérieur du tube. Le câble comporte une section chauffante de 1.22m et une section non chauffante de 20m environ qui nous permet de disposer la section chauffante à la profondeur désirée.

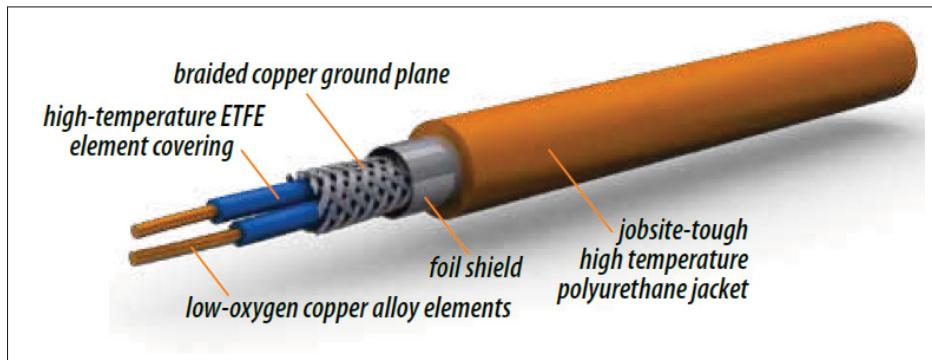


Figure 4.2 Détails du câble chauffant

La section chauffante des câbles est munie de trois thermocouples de Type K. Deux à chaque extrémité et l'un au milieu de la section chauffante et ceci pour les trois câbles chauffants. Des tests seront faits pour des câbles chauffants sans disques de plastique souple et avec disques de plastique souple, afin de quantifier l'influence de ce phénomène sur la mesure. La Figure 4.3 présente un zoom sur la connexion du câble électrique au câble chauffant et nous montre la disposition des disques de plastique souple sur celui-ci. Les disques de plastique souple sont séparés entre eux de 10 cm. La disposition des disques est la même à chaque extrémité du câble chauffant. Il y a donc quatre disques de plastique souple par câble chauffant. Les données expérimentales recueillies à partir des thermocouples se font à l'aide d'un système d'acquisition de données "Graphtec®" portable. Le système d'acquisition est placé à l'intérieur du prototype et est branché au secteur. La puissance induite dans le câble chauffant a été mesurée et enregistrée avec un système d'acquisition "Watts up®". La basse tension a été employée pour cette étude, car la longueur de la section chauffante est relativement courte. Le prototype étant branché sur

le secteur, la tension trop élevée du secteur doit être réduite, afin de ne pas endommager les câbles chauffants et de dissiper la puissance adéquate au niveau des trois câbles chauffants. Pour ce faire, trois unités d'alimentation de découpage (Power Swicthing Supply) servent de relais entre le secteur et les trois lignes de câbles chauffants, afin de pouvoir dissiper une puissance de 30W environ au niveau de chaque câble chauffant. La tension moyenne aux bornes du câble chauffant est d'environ 29 volts.

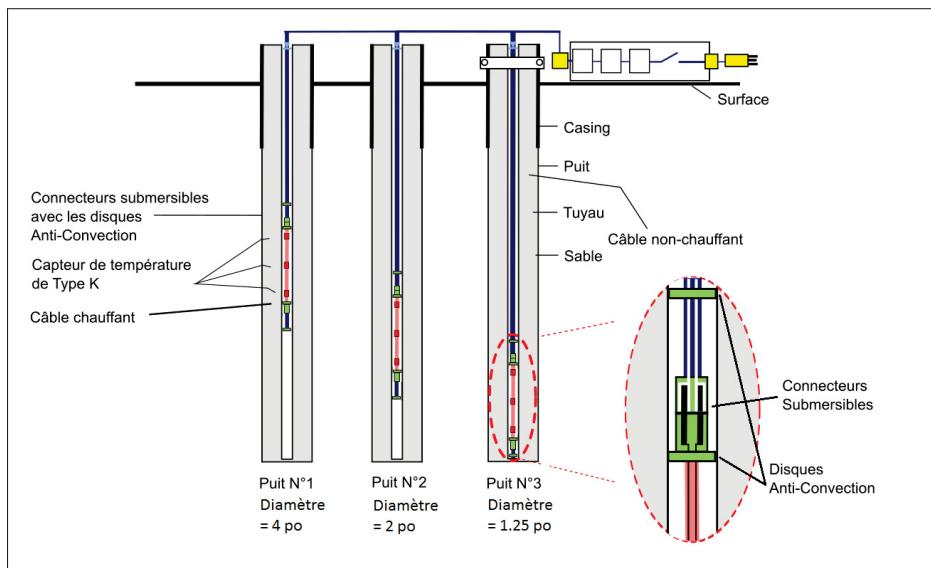


Figure 4.3 Description du prototype

4.3 Description de la procédure d'analyse

La conductivité thermique du sous-sol, à la profondeur des capteurs de température, peut être déterminée en reproduisant les températures observées au cours de la période de restitution de chaleur avec la solution de la ligne source finie. Seule l'évolution de la température, lors de la restitution, est reproduite depuis que Raymond, J., R. Therrien et L. Gosselin (2011) ont démontré que la température à l'intérieur d'une section horizontale d'un échangeur géothermique équipé de câbles chauffants peut varier avec sa position au cours de la période d'injection de chaleur, mais pas pendant la période de restitution tardive (voir Figure 4.4). Comme on le remarque à la Figure 4.4, la température à l'intérieur d'une section horizontale d'un échangeur

géothermique équipée de câbles chauffants tend à devenir uniforme après la fin de l'injection de chaleur.

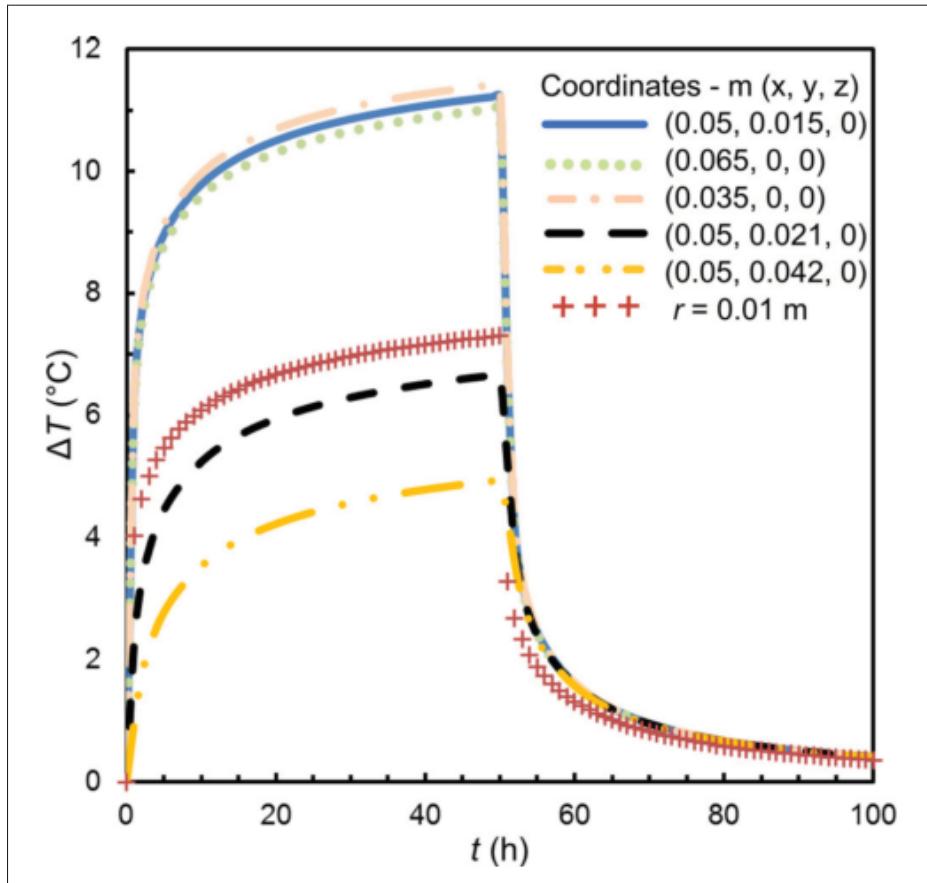


Figure 4.4 Température simulée à différentes positions lors d'un TRT avec un câble chauffant. Extrait de Raymond, J., L. Lamarche (2014)

Les écarts de température, définis comme l'augmentation de la température par rapport à la température initiale ($\Delta T = T - T_0$), sont reproduits. La conductivité thermique du sous-sol est obtenue par minimisation de la différence entre la température calculée et les écarts de température observés. Les écarts de température sont évalués par une série de sources ponctuelles de chaleur intégrées sur la longueur de trois sources de chaleur linéaires distinctes de longueur finie séparées par des distances verticales égales :

$$\Delta T(r, z, t) = \frac{q}{4\pi\lambda_s} \int_{-H/2}^{+H/2} \left[\frac{\operatorname{erfc}\left(\sqrt{r^2 + (z-z')^2}/2\sqrt{\alpha_s t}\right)}{\sqrt{r^2 + (z-z')^2}} \right. \\ \left. + \frac{\operatorname{erfc}\left(\sqrt{r^2 + (z-(L-z'))^2}/2\sqrt{\alpha_s t}\right)}{\sqrt{r^2 + (z-(L-z'))^2}} \right. \\ \left. + \frac{\operatorname{erfc}\left(\sqrt{r^2 + (z-(L+z'))^2}/2\sqrt{\alpha_s t}\right)}{\sqrt{r^2 + (z-(L+z'))^2}} \right] dz \quad (4.1)$$

Où r est la distance radiale à partir des sources de chaleur, z est le zéro vertical étant au milieu de la source de chaleur, L est la longueur qui sépare le milieu de chaque source de chaleur de longueur H , q est le taux d'injection de chaleur par unité de longueur et λ_s et α_s sont respectivement la conductivité thermique et la diffusivité thermique du sous-sol considéré.

L'équation 4.1 décrit le transfert de chaleur par conduction de la source de chaleur linéaire de longueur finie, semblable à l'équation de la ligne source finie utilisée pour les simulations de systèmes de pompes à chaleur géothermique (Eskilson, P. (1987)). Ce dernier comprend une source de débit d'injection de chaleur négatif pour représenter la limite supérieure d'image thermique, alors que le premier a deux sources d'images thermiques positives en tenant compte des lignes de symétrie en raison des sections interchangeant de chauffage et de non-chauffage des câbles (Figure 4.5). Au voisinage de la source de chaleur centrale, l'effet des deux sources d'images thermiques sur la température est cependant très faible, lorsque la longueur L est très supérieure à H , et peuvent être négligés. L'expression simplifiée peut alors être exprimée comme suit :

$$\Delta T(r, z, t) = \frac{q}{4\pi\lambda_s} \int_{-H/2}^{+H/2} \left[\frac{\operatorname{erfc}\left(\sqrt{r^2 + (z-z')^2}/2\sqrt{\alpha_s t}\right)}{\sqrt{r^2 + (z-z')^2}} \right] dz \quad (4.2)$$

L'intégrale de l'équation 4.2 a été évaluée numériquement pour exprimer l'augmentation de la température à mi-hauteur de la source de chaleur ($Z = 0$) avec la fonction $g[-]$ adimensionnelle :

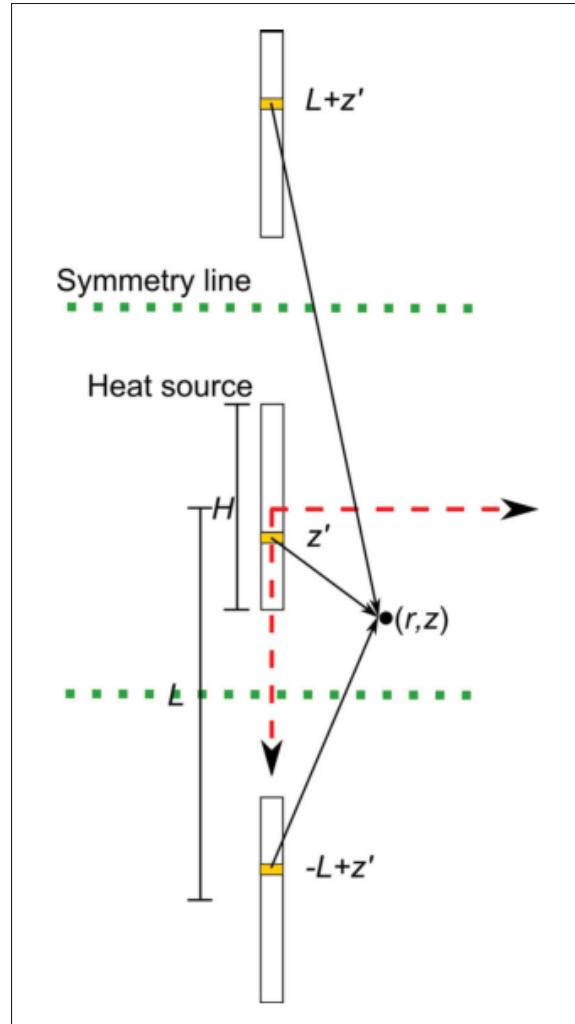


Figure 4.5 Symétrie d'une source de chaleur centrale entre deux images de cette source de chaleur montrant la géométrie du problème décrit à l'équation 4.1. Extrait de Raymond, J., L. Lamarche (2014)

$$\Delta T_{z,r} = \frac{q}{2\pi\lambda_s} \left[g(Fo, \frac{r}{H}) \right] \quad (4.3)$$

avec

$$Fo = \frac{\alpha_s \cdot t}{H^2} \quad (4.4)$$

Durant l'analyse, nous allons considérer deux longueurs chauffantes H. L'une, se délimitant à la longueur stricte du câble chauffant et l'autre intégrant les disques de plastique souple, comme le montre la Figure 4.6. La raison est la suivante, le volume d'eau compris entre les deux disques de plastique souple des parties inférieures et supérieures du câble chauffant peut-être influencé thermiquement. Si ce volume est influencé thermiquement, il échange donc de la chaleur par conduction avec son environnement, soit le forage et le sous-sol, nous devons donc le considérer dans la longueur chauffante. La longueur chauffante a considérer lorsqu'il y a plus de deux disques est 1.60m ou 1.80m, encore faut-il pouvoir prouver que ces sections participent à l'échange de chaleur.

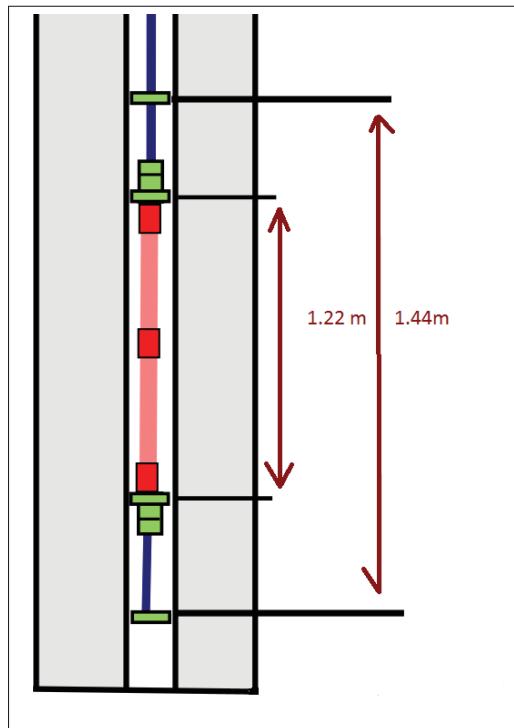


Figure 4.6 Détails des positions des disques de plastique souple (2 disques à chaque extrémité)

L'exactitude de l'équation 4.3 a été vérifiée par une comparaison de la température simulée avec un modèle de transfert de chaleur numérique, qui a donné des résultats à moins de 5% de ceux obtenus avec la solution analytique. Pour analyser les résultats d'un test de réponse

thermique avec des sections de câble chauffant, les écarts de température à une faible distance de la source de chaleur doivent être calculés pour la période de restitution. Cela a été fait en calculant la fonction g à $r = 0.01\text{m}$ et en appliquant le principe de superposition temporelle :

$$\Delta T_{z,r} = \frac{q}{2\pi\lambda_S} [g(Fo) - g(Fo')] \quad (4.5)$$

avec

$$Fo = \frac{\alpha_s \cdot t}{H^2} \quad (4.6)$$

$$Fo' = \frac{\alpha_s \cdot (t - t_{off})}{H^2} \quad (4.7)$$

Où t_{off} est le moment où l'injection de chaleur est arrêtée. Le calcul des nombres de Fourier Fo [-] implique de faire une hypothèse de la capacité thermique volumétrique du sous-sol considéré. Une incertitude raisonnable liée à l'estimation de la capacité thermique souterraine volumétrique à partir d'observations géologiques est de l'ordre de 10-15% (Witte, H.J.L. (2013)). Les températures calculées pour reproduire la restitution thermique sont ajustées uniquement avec l'optimisation de la conductivité thermique du sous-sol. Cela peut être fait avec un solveur utilisant l'algorithme de réduction de gradient généralisé pour des problèmes non linéaires (Lasdon, L.S., A.D. Waren et A. Jain et M. Ratner (1978)), en minimisant la somme des carrés des résidus calculés à partir des différences entre les écarts de température observées et calculées. L'ensemble du raisonnement précédent a été traduit sous forme de programme, à l'aide de l'interface Python. Ce qui permet d'accélérer les calculs et de faciliter leur manipulation. Le programme précédent est décrit à l'Annexe III.

4.4 Description du site expérimental

Les forages ont été effectués à l'École de technologie supérieure (ÉTS), au centre-ville de Montréal, sur le terrain adjacent à l'ancienne brasserie Dow.

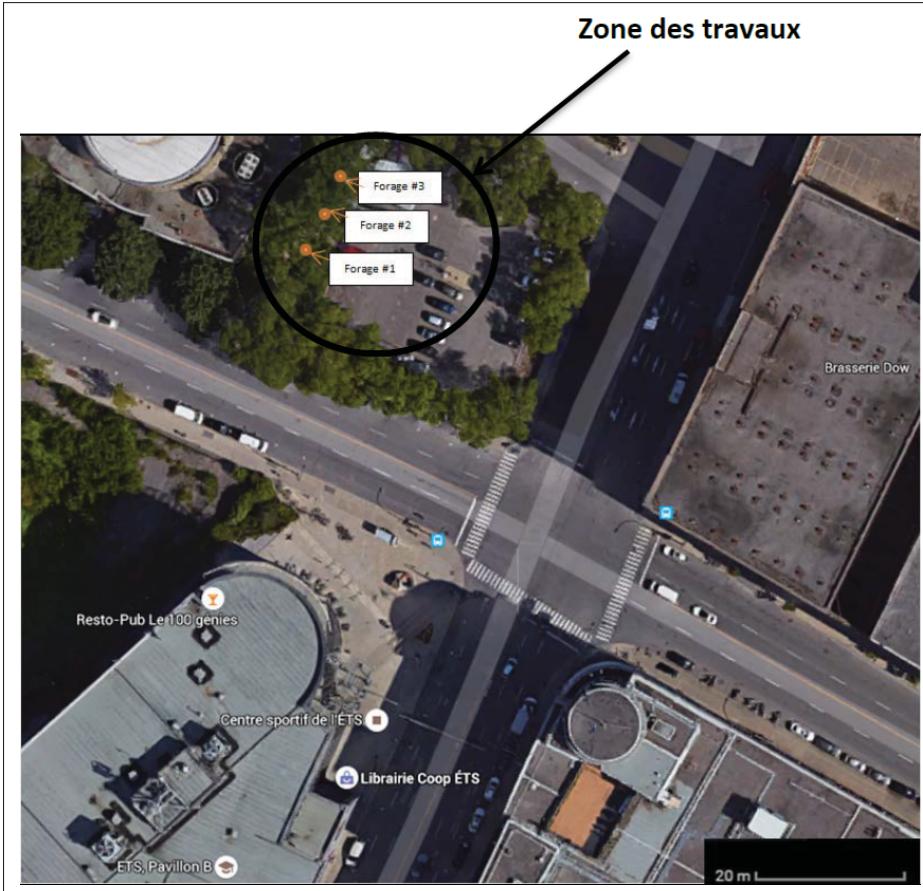


Figure 4.7 Carte de localisation des forages

Trois forages d'une dizaine de mètres de profondeur ont été effectués par la compagnie "Forage André Roy", sous la supervision de la firme "Qualitas", selon les caractéristiques mentionnées dans le schéma de forage (voir Figure 4.8). Le forage N°1 possède un tuyau de Polyéthylène de Haute Densité (PEHD) de 4po de diamètre (SDR-10) et une profondeur de tuyau de 10.19 m. Le forage N°2 possède un tuyau de PEHD de 2 po (SDR-8) de diamètre et une profondeur de 10.20 m. Le forage N°3 possède un tuyau de 1.25 po de diamètre (SDR-10) et une profondeur de 10.21 m. Chacun de ces forages possède un tubage de protection en PEHD de 4.5 pi sortant

du sol de 40 cm surmonté d'un capuchon avec accès pour fil chauffant et des trous à cadenas. De plus, un remplissage étanche de bentonite a été incorporé dans le premier mètre de chaque puits et du sable de silice a été utilisé dans la profondeur restante. Chaque puits a été échantillonné sur 3 m, selon la méthode de la cuillère fendue. Le forage N°1 a été échantillonné entre 5 et 8 m de profondeur tandis que les forages N°2 et N°3 ont été échantillonnés entre 3.5 m et 6.5 m de profondeur. Une description détaillée des trois forages est faite en annexe (voir Annexes I-1,I-2 et I-3). Chaque échantillon de sol prélevé ont été soumis a des analyses en laboratoire afin déterminer les caractéristiques thermiques de chacun d'eux.

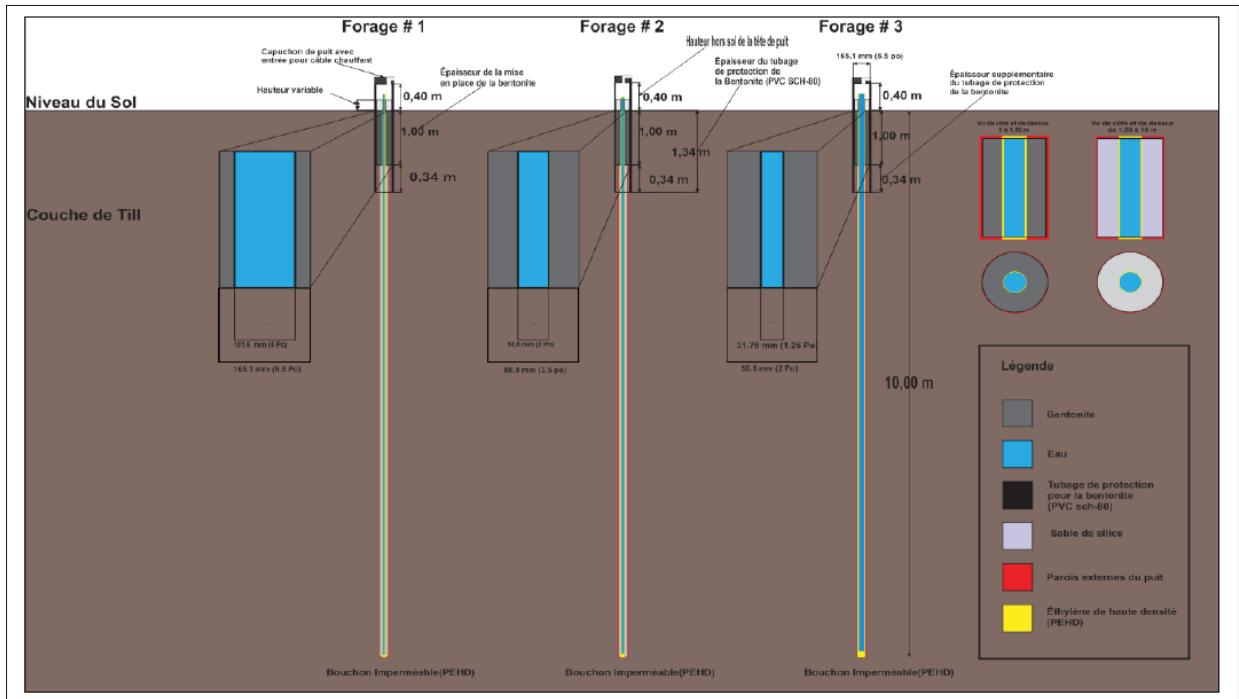


Figure 4.8 Détails et vue en coupe des forages.

4.5 Déroulement des expériences

L'essai commence par une première période d'enregistrement de la température sans aucun chauffage pour déterminer la température du sous-sol non perturbé sur chacun des trois puits. Cette période sur chacun des essais n'était que d'une dizaine de minutes, ce qui a causé certains problèmes d'analyse décrits par la suite. Selon l'ASHRAE (HVAC Applications 2011,

chap 34), la mesure du profil de température initiale du sous-sol étudié doit être réalisée dans le liquide avant injection de chaleur, celui-ci dure 24 heures environ, afin d'avoir des températures stabilisées. Le profil de température initiale a été déterminé après la série de tests et le rétablissement de la température initiale. Une fois la première période d'enregistrement terminée, celle-ci est suivie par une période d'injection de chaleur de 72 heures. La mesure de température débute au lancement de l'essai. La dernière étape du TRT est d'arrêter l'injection de chaleur et de mesurer le rétablissement de la température dans l'échangeur de chaleur. La période de restitution thermique est au minimum de 72 heures également. La température peut être mesurée jusqu'à ce qu'elle soit suffisamment proche de la température non perturbée du sol. Cette procédure sera répétée trois fois, afin de couvrir toute la longueur d'échantillonnage (3m), comme indiqué à la section 4.4. L'ensemble de cette procédure sera refait dans son intégralité, lorsque les disques de plastique souple seront installés sur les câbles, afin de quantifier l'influence de la convection naturelle sur la mesure de température. La température à l'intérieur de l'échangeur de chaleur s'homogénéise rapidement au cours de la période de restitution thermique. Le signal enregistré peut être analysé facilement pour déterminer les propriétés thermiques du sous-sol en utilisant les modèles analytiques ou numériques.

4.5.1 Plan expérimental

Tableau 4.1 Plan expérimental

SANS rondelles de plastique souple	Forage N°1	Forage N°2	Forage N°3
TEST N °1			
Profondeur et position du câble chauffant [m]*	5.7m	3.6m	3.6m
Période de test (<i>Injection / Restitution</i>)	Début : 08/09/2015 12 :44 :25 Fin : 15/09/2015 12 :47 :46		
TEST N °2			
Profondeur et position du câble chauffant [m]	6.5m **	5m **	5m **
Période de test (<i>Injection / Restitution</i>)	Début : 18/11/2015 15 :58 :59 Fin : 25/11/2015 14 :47 :53		
TEST N °3			
Profondeur et position du câble chauffant [m]	7.3m	6m	6m
Période de test (<i>Injection / Restitution</i>)	Début : 27/09/2015 09 :39 :52 Fin : 01/10/2015 15 :21 :04		
AVEC 2 rondelles de plastique souple	Forage N°1	Forage N°2	Forage N°3
TEST N °4			
Profondeur et position du câble chauffant [m]	7.3m	6m	6m
Période de test (<i>Injection / Restitution</i>)	Début : 08/10/2015 14 :49 :38 Fin : 13/10/2015 08 :51 :57		
TEST N °5			
Profondeur et position du câble chauffant [m]	6.5m **	5m**	5m**
Période de test (<i>Injection / Restitution</i>)	Début : 13/10/2015 09 :28 :54 Fin : 19/10/2015 11 :46 :32		
TEST N °6			
Profondeur et position du câble chauffant [m]	5.7m	3.6m	3.6m
Période de test (<i>Injection / Restitution</i>)	Début : 19/10/2015 12 :17 :54 Fin : 26/10/2015 09 :35 :55		
AVEC 2 rondelles de plastique souple "percée"	Forage N°1	Forage N°2	Forage N°3
TEST N °7			
Profondeur et position du câble chauffant [m]	5.7m	3.6m	3.6m
Période de test (<i>Injection / Restitution</i>)	Début : 27/10/2015 12 :05 :52 Fin : 02/11/2015 12 :43 :53		
AVEC 4 rondelles de plastique souple	Forage N°3		
TEST N °8			
Profondeur et position du câble chauffant [m]	3.6m		
Période de test (<i>Injection / Restitution</i>)	Début : 04/05/2016 16 :34 :17 Fin : 11/05/2016 08 :09 :27		

* : Prise de référence au milieu du câble

** : Milieu de l'horizon d'échantillonnage

CHAPITRE 5

ANALYSE DES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

5.1 Détermination des caractéristiques du sol par analyse en laboratoire

La détermination des caractérisitques a été faites par Simon Asselin, étudiant stagiaire sous la supervision de Jasim Raymond au sein de l'INRS de Québec. Le matériel intercepté au niveau des trois forages est assez variable. On y trouve essentiellement un till sablonneux avec horizons silteux et argileux. Le forage 1 présente une couche supérieure de till sablonneux avec des traces de silt et de gravier suivi d'une série d'horizons de sable fin avec des proportions variables de silt. Le forage 2 présente une couche supérieure d'argile sablonneuse suivie d'une série d'horizons sablonneux avec des proportions variables de silt et d'un peu de gravier dans les deux horizons supérieurs. Le forage 3 présente une couche supérieure d'argile silteuse suivie d'une série d'horizon sablonneux et de proportion variable de silt et des traces de gravier dans l'horizon supérieur. Il est à noter que ce forage a présenté un horizon de sable fin silteux grisâtre. Cet horizon est encadré d'horizons brunâtres de sable fin à proportion variable de silt, tel que retrouvé dans les forages 1 et 2. Le détail des proportions de chaque matériel intercepté au niveau des trois forages est décrit au Tableau 5.1. Finalement, la nappe phréatique n'a pas été recoupée, mais une augmentation de la teneur en eau à environ 30% été observée dans le forage 1, de 7.4 à 8 m de profondeur. Il s'agit du seul horizon présentant ce pourcentage de saturation. Un précédent forage de la firme Qualitas à l'intersection des rues Ottawa et Shannon, à environ 500m au sud des forages de l'ÉTS a montré une profondeur de nappe à 10.20 m.

5.1.1 Reproduction des sols de forage

Des tests ont été menés en laboratoire afin de déterminer la conductivité thermique des échantillons prélevés. Le but de ces tests est de reproduire une certaine densité, ainsi que la teneur en eau des échantillons de sols recueillis lors des forages. Les moules utilisés pour la reproduction des sols de forage ont été fabriqués à partir de tuyaux en PEHD de 3.175 cm (1 po 1/4) de

Tableau 5.1 Descriptif des matériaux interceptés.

Extrait du rapport de Asselin S. (2015)

Forage #1	Matériaux recoupés				
Épaisseur [m]	Argile	Silt	Sable	Gravier	Till
5.0 m → 5.6 m	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> 20%	<input checked="" type="checkbox"/> 75%	<input checked="" type="checkbox"/> 5%	<input checked="" type="checkbox"/> 0.6m
5.6 m → 6.2 m	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> 15%	<input checked="" type="checkbox"/> 85%	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> 0.6m
6.2 m → 6.8 m	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> 10%	<input checked="" type="checkbox"/> 90%	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> 0.6m
6.8 m → 7.4 m	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> 10%	<input checked="" type="checkbox"/> 90%	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> 0.6m
7.4 m → 8.0 m	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> 15%	<input checked="" type="checkbox"/> 85%	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> 0.6m
Forage #2	Matériaux recoupés				
Épaisseur [m]	Argile	Silt	Sable	Gravier	Till
3.5 m → 4.1 m	<input checked="" type="checkbox"/> 0.305m	<input checked="" type="checkbox"/> 30% / 20%	<input checked="" type="checkbox"/> 70%	<input checked="" type="checkbox"/> 10%	<input checked="" type="checkbox"/> 0.295m
4.1 m → 4.7 m	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> 30%	<input checked="" type="checkbox"/> 60%	<input checked="" type="checkbox"/> 10%	<input checked="" type="checkbox"/> 0.6m
4.7 m → 5.3 m	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> 30%	<input checked="" type="checkbox"/> 70%	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> 0.6m
5.3 m → 5.9 m	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> 20%	<input checked="" type="checkbox"/> 80%	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> 0.6m
5.9 m → 6.5 m	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> 20%	<input checked="" type="checkbox"/> 80%	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> 0.6m
Forage #3	Matériaux recoupés				
Épaisseur [m]	Argile	Silt	Sable	Gravier	Till
3.5 m → 4.1 m	<input checked="" type="checkbox"/> 0.38m	<input checked="" type="checkbox"/> 15%	<input checked="" type="checkbox"/> 75%	<input checked="" type="checkbox"/> 10%	<input checked="" type="checkbox"/> 0.22m
4.1 m → 4.7 m	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> 30%	<input checked="" type="checkbox"/> 70%	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> 0.6m
4.7 m → 5.3 m	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> 20%	<input checked="" type="checkbox"/> 80%	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> 0.6m
5.3 m → 5.9 m	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> 15%	<input checked="" type="checkbox"/> 85%	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> 0.6m
5.9 m → 6.5 m	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> 15%	<input checked="" type="checkbox"/> 85%	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> 0.6m

diamètre et de 7.0 cm de longueur pour les échantillons 01 à 05 du forage N°1 et 01 du forage N°3 (Tableau 5.2).

Tableau 5.2 Données des moules

Échantillons	Diamètre tube (cm)	Hauteur tube (cm)	Volume tube (cm ³) (Vt)
F#1 N°01-05 et F#3 N°01	3,175	7.0	55.42
F#3 N°02-05	3.175	6.9	54.63

Les données sur la densité envisagée sont tirées depuis Holtz, R.D., Kovacs, W.D. (1991). Ces données sont fonction de l'indice de pénétration « N », qui caractérise l'ensemble des échan-

tillons d'une densité « dense à très dense » selon les observations effectuées par l'enfoncement d'une culière fendue. Ainsi, la sélection des densités s'est effectuée en fonction des types de sols observés, soit du sable silteux avec ou sans gravier et une portion de sable uniforme fin (Figure 5.1).

Tableau 4.2 (suite)

Masse volumique (Mg/m^3)*							
	Masse volumique du sol sec ρ_d		Masse volumique du sol humide ρ		Masse volumique du sol déjaugé ρ'		
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	
	(lâche) (à 100 % du Proctor modifié)	(dense)	(lâche)	(dense)	(lâche)	(dense)	
1. Matériaux à granulométrie uniforme :							
a) sphères uniformes (valeurs théoriques)	—	—	—	—	—	—	—
b) sable d'Ottawa	1,49	—	1,78	1,51	2,12	0,93	1,12
c) sable propre à granulométrie uniforme (fin ou moyen)	1,35	1,86	1,92	1,37	2,20	0,85	1,18
d) silt inorganique à granulométrie uniforme	1,29	—	1,92	1,31	2,20	0,83	1,18
2. Matériaux à granulométrie étalée :							
a) sable silteux	1,41	1,98	2,06	1,43	2,30	0,88	1,28
b) sable propre (fin à grossier)	1,38	2,14	2,23	1,40	2,39	0,86	1,40
c) sable micacé	1,23	—	1,95	1,24	2,23	0,77	1,23
d) sable silteux et gravier	1,44	—	2,36	1,46	2,51	0,91	1,49

* Calcul effectué à partir de $\rho_s = 2,65 \text{ Mg/m}^3$. Multiplier par 62,4 pour obtenir l'équivalent en livre-force par pied cube (lbf/pi^3).

Figure 5.1 Tableau de sélection des densités en fonction des types de sols. Données tirées de Holtz, R.D., Kovacs, W.D. (1991)

Les calculs effectués sont tirés de Holtz, R.D., Kovacs, W.D. (1991) et donnent la masse de sol sec, ainsi que la quantité d'eau à ajouter afin de reproduire le plus fidèlement possible le sol échantillonné.

Les moules ont été remplis par 3 couches successives de chaque échantillon selon la masse calculée comme le tiers de la masse requise afin d'arriver à la densité recherchée (Tableau 5.4).

Ces couches ont été compactées afin d'obtenir une hauteur dans le moule équivalente pour la densité recherchée. Chaque couche a été compactée à l'aide d'un marteau à percussion et d'un

Tableau 5.3 Masse et volume d'eau à ajouter afin d'atteindre les densités voulues pour chaque échantillon.

Forage	Échantillon #	Densité désirée [$g \cdot cm^{-3}$] (p)	W [%]	Masse sol sec [g] (Ms)	Quantité d'eau [ml] (Mw)
				$Ms = (p \cdot Vt)/(1 + w)$	$Mw = (w \cdot Ms)/100$
1	1	2.51	9.77	126.73	12.38
1	2	2.2	6.2	114.81	7.12
1	3	2.2	9.28	111.57	10.35
1	4	2.2	7.75	113.16	8.77
1	5	2.2	13.55	107.38	14.55
3	1	2.51	24.64	111.61	27.50
3	2	2.3	9.49	116.42	11.05
3	3	2.3	9.77	116.12	11.35
3	4	2.2	6.2	114.81	7.12
3	5	2.2	9.28	11.57	10.35

Tableau 5.4 Masse et volume d'eau à ajouter à chaque couche

Forage	Échantillon #	Densité désirée [$g \cdot cm^{-3}$] (p)	W [%]	Masse sol sec [g] (Ms)	Quantité d'eau [ml] (Mw)
				$Ms = (p \cdot Vt)/(1 + w)$	$Mw = (w \cdot Ms)/100$
1	1	2.51	9.77	42.24	4.13
1	2	2.2	6.2	38.27	2.37
1	3	2.2	9.28	37.19	3.45
1	4	2.2	7.75	37.72	2.92
1	5	2.2	13.55	35.79	4.85
3	1	2.51	24.64	37.20	9.17
3	2	2.3	9.49	38.81	3.68
3	3	2.3	9.77	38.71	3.78
3	4	2.2	6.2	38.27	2.37
3	5	2.2	9.28	37.19	3.45

cylindre de métal permettant d'effectuer un compactage homogène, jusqu'à la hauteur désignée par une marque sur le cylindre.

Tableau 5.5 Hauteur requise à chaque couche afin de respecter les densités visées.

Forage	Échantillon #	$Vt/3 [cm^{-3}]$	H [cm]
		$Vt/3 = (Ms \cdot (1 + w)) / 3 \cdot p$	$H = (Vt/3)(\pi \cdot r^2)$
1	1	18.85	2.4
1	2	18.47	2.3
1	3	18.47	2.3
1	4	18.47	2.3
1	5	18.47	2.3
3	1	19	2.4
3	2	18.2	2.3
3	3	18.2	2.3
3	4	18.2	2.3
3	5	18.2	2.3

Après chaque compaction, la quantité d'eau correspondante a été ajoutée afin de permettre une répartition homogène de la teneur en eau afin de permettre une évaluation de la conductivité thermique la plus adéquate possible (Tableau 5.6).

Les échantillons ont été encapsulés de manière à conserver leur teneur en eau et à ne pas les déconsolider.

Ensuite pour la quantification de la conductivité thermique des échantillons, la technique de mesure appelée méthode de la sonde à aiguille a été utilisée. Cette méthode est extraite de la norme ASTM D5334-08. Elle consiste à insérer un élément chauffant que l'on suppose de longueur "infinie" et à analyser l'évolution de la température en fonction du temps. La conductivité thermique est déduite de l'analyse de la courbe de l'évolution de la température en fonction du temps. En effet, la variation de la température à l'interface de l'aiguille en phase de chauffage peut être reproduite avec l'équation de la ligne source infinie (Équation (2.2)). Les mesures de diffusivité thermique se font avec une sonde ayant une aiguille double, l'une chauffe et l'autre est pour lire la température à une distance au-delà de l'aiguille chauffante. Les résultats issus de l'analyse des échantillons ont été répertoriés dans le Tableau 5.6.

La compaction et la saturation des échantillons ont été réalisées pour tenter de redonner la densité naturelle aux sols afin de réaliser les mesures de conductivité thermique. Lorsqu'un échantillon de sol est prélevé avec une cuillère fendue, cela transforme la densité du sol qui n'est plus représentatif des conditions in-situ. L'indice de compaction N des forages géotechniques permet de retrouver la densité et la saturation approximative des échantillons selon le type de matériel (sable, silt, argile). Il est donc préférable de se fier aux mesures de conductivité thermique sur les échantillons compactés et saturés puisque les mesures sont plus représentatives des conditions in situ que l'on tente de mesurer avec les tests d'injection de chaleur dans les forages. La valeur corrigée de la moyenne des conductivités thermiques est une valeur corrigée par rapport à un échantillon de référence. Avant une mesure avec la sonde à aiguille, un échantillon témoin de conductivité thermique connue est analysé. La valeur qui est ensuite mesurée sur les échantillons de sols de conductivité thermique inconnue est corrigé selon l'écart d'analyse de l'échantillon témoin.

5.2 Détermination des caractéristiques du sol par tests de réponse thermique multi niveaux

5.2.1 Données initiales

La section 5.1 précédente est nécessaire à la suite de nos investigations, car elle nous permet d'avoir des points de référence précis. En occurrence, nous allons pouvoir comparer les résultats issus de l'expérimentation à ceux issus du laboratoire. Ensuite, avant chaque test de réponse thermique, il est nécessaire d'avoir le profil de température initiale du sous-sol étudié. Comme précisé à la section 4.5, la période d'analyse de la température initiale est trop faible pour avoir une température initiale fiable. Il s'agit d'une erreur expérimentale qui a été identifiée pour les tests 1 à 7 et qui a été corrigée pour le test numéro 8, soit le dernier test réalisé avec les 4 disques aux extrémités des sections chauffantes. La température initiale est nécessaire pour effectuer le calcul de la conductivité thermique du sous-sol considéré. Il est possible d'évaluer ce paramètre par le modèle utilisé pour calculer les conductivités thermiques. Si on évalue la température initiale avec le modèle, on se retrouve avec une combinaison de plusieurs inconnus

Tableau 5.6 Caractéristiques des sols par analyse en laboratoire

Forage	Profondeur d'échantillon-nage	Capacité thermique volumique [$MJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$]	Diffusivité thermique [$m^2 \cdot jour^{-1}$]	Moyenne k non corrigée [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]	Moyenne k corrigée [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]
1	5.0 m → 5.6 m	2.852	0.671	1.915	1.801
	5.6 m → 6.2 m	1.351	0.977	1.322	1.264
	6.2 m → 6.8 m	2.059	0.782	1.608	1.677
	6.8 m → 7.4 m	1.969	0.593	1.165	1.197
	7.4 m → 8.0 m	2.392	0.663	1.584	1.678
2	3.5 m → 4.1 m	2.512	0.548	1.378	1.383
	4.1 m → 4.7 m	2.615	0.568	1.377	1.363
	4.7 m → 5.3 m	2.400	0.628	1.516	1.514
	5.3 m → 5.9 m	1.768	0.579	1.020	1.057
	5.9 m → 6.5 m	2.578	0.565	1.453	1.457
3	3.5 m → 4.1 m	2.512	0.548	1.378	1.383
	4.1 m → 4.7 m	2.615	0.568	1.377	1.363
	4.7 m → 5.3 m	2.400	0.628	1.516	1.514
	5.3 m → 5.9 m	1.768	0.579	1.020	1.057
	5.9 m → 6.5 m	2.578	0.565	1.453	1.457

(Température initiale, Conductivité thermique du sous-sol) qui peuvent donner des solutions semblables. Il est donc difficile de réaliser l'analyse avec justesse. L'évaluation de la température initiale est très importante pour arriver à une analyse juste. Pour ce faire, à la fin de notre étude, nous avons réalisé un dernier test dans les règles de l'art, afin de vérifier l'influence du nombre de disques de plastique souple sur les résultats. On y reviendra à la section 5.2.6.

Les tests qui ont été réalisés précédemment vont, tout de même, nous permettre de déterminer l'influence des disques de plastique souple et de la géométrie du puit sur les résultats. Cependant, afin d'avoir des repères fiables et d'avoir une démarche rigoureuse, le profil de température initiale de ces tests a été déterminé après ceux-ci, au début du mois de Mars 2016. Une durée de quatre mois sépare la dernière période d'injection de chaleur de ce test, laissant le temps au sous-sol de regagner sa stabilité thermique. Le profil de température initiale est présenté à la Figure 5.2. Ce profil nous permet de distinguer l'épaisseur de la couche influencée par le changement de saison, en l'occurrence le passage de l'hiver. Cette épaisseur est de

5m environ. La température initiale est déterminée en faisant la moyenne des températures enregistrées entre 5 et 9m. La température initiale du sous-sol étudié est de 13.756°C pour cette série de tests.

Tableau 5.7 Données initiales des tests de réponse thermique multi niveaux

Fréquence d'acquisition de la température	30 [s]
Fréquence d'acquisition de la puissance	30 [s]
Durée d'injection de puissance	72 heures
Durée de la restitution	minimum 72 heures
Efficacité des Alimentations de découpage	0.81 [-]
Moyenne des capacités thermiques	2.246 [$MJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$]

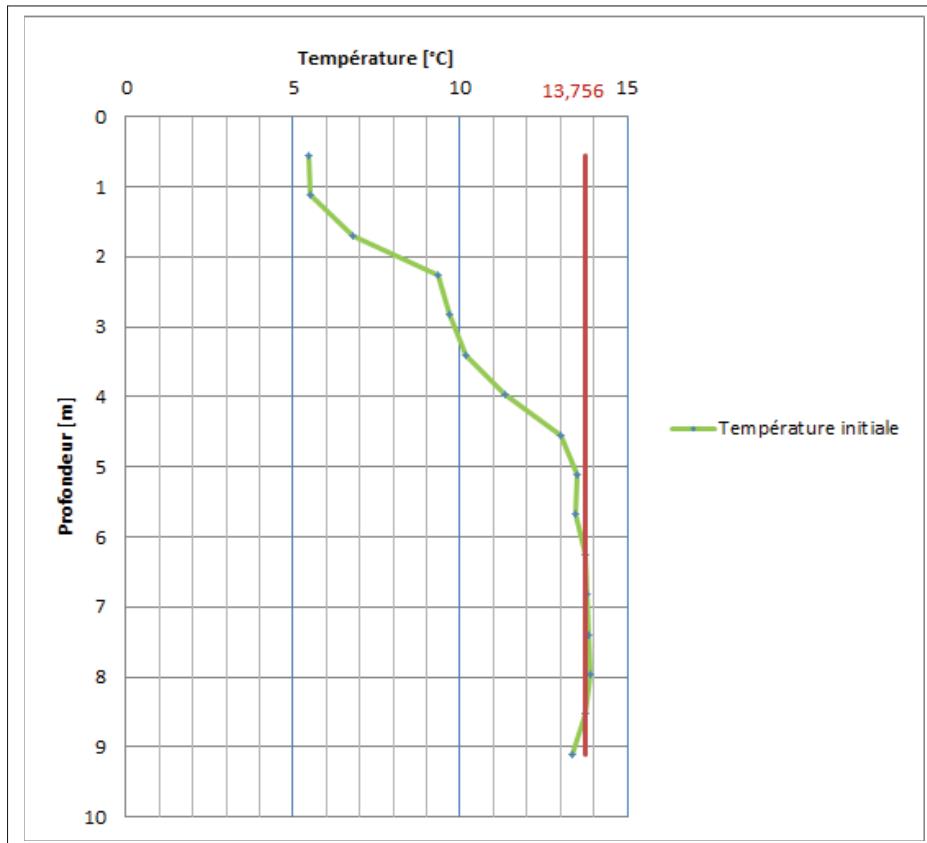


Figure 5.2 Évolution de la température initiale en fonction de la profondeur

5.2.2 Analyse N°1 : Comparaison entre le test N°1 et le test N°6

5.2.2.1 Test N°1 : SANS rondelles de plastique souple

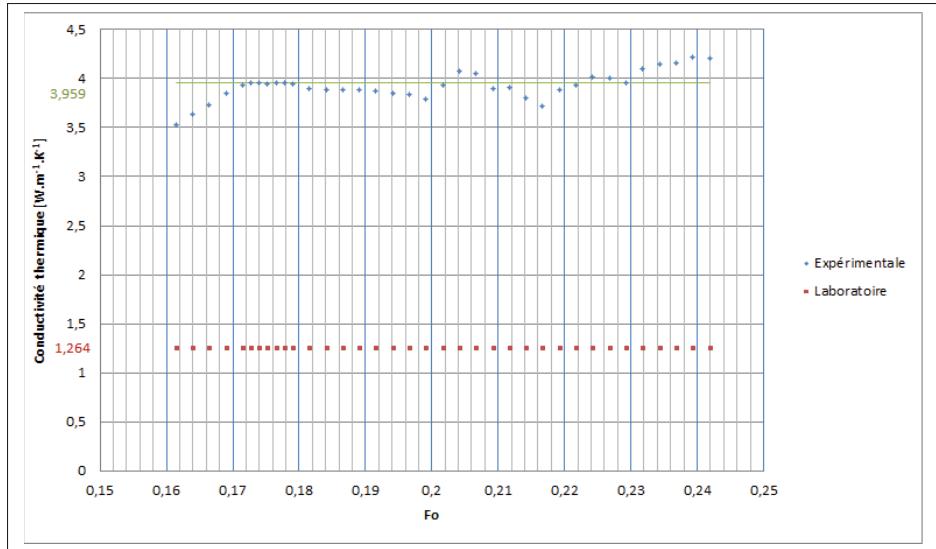


Figure 5.3 Évolution de la conductivité évaluée de façon in situ en fonction du nombre de Fourier ~ Sans rondelles de plastique souple ~ TestN°1 / Forage N°1

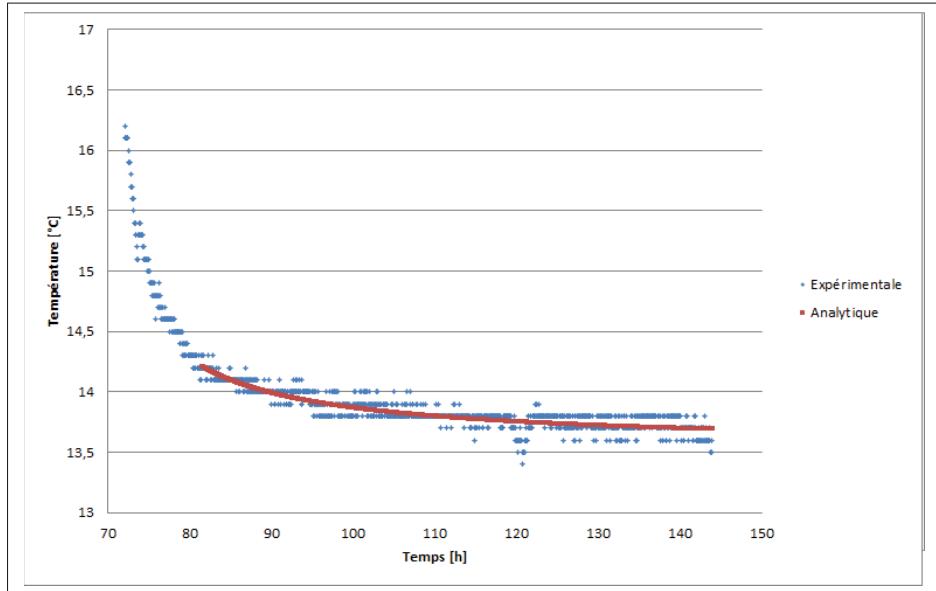


Figure 5.4 Évolution de la restitution de la température en fonction du temps ~ Sans rondelles de plastique souple ~ TestN°1 / Forage N°1

Les Figures 5.3, 5.5 et 5.7 présentent l'évolution de la conductivité thermique évaluée de façon in situ en fonction du nombre de Fourier et la conductivité thermique issue de l'analyse en

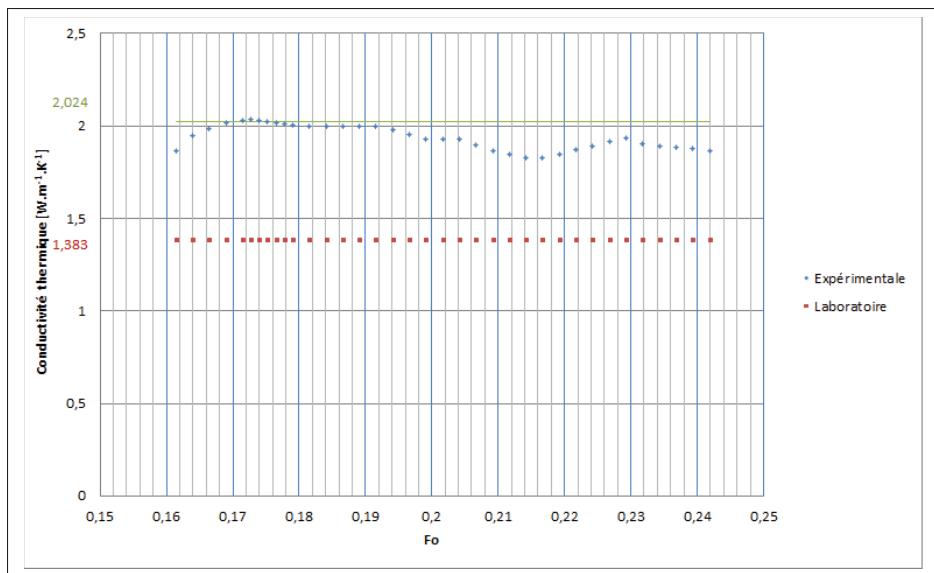


Figure 5.5 Évolution de la conductivité évaluée de façon in situ en fonction du nombre de Fourier ~ Sans rondelles de plastique souple ~ TestN°1 / Forage N°2

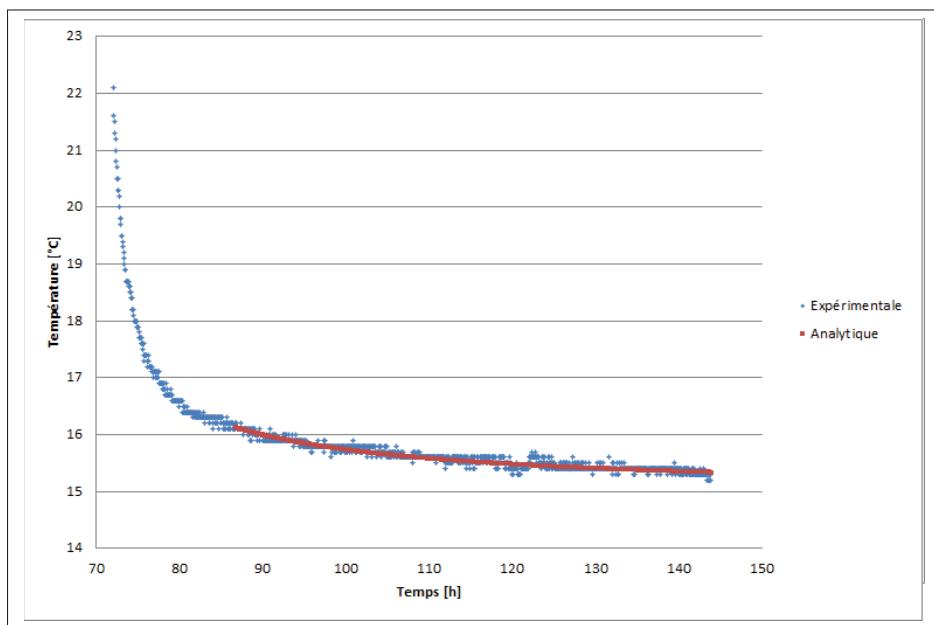


Figure 5.6 Évolution de la restitution de la température en fonction du temps ~ Sans rondelles de plastique souple ~ TestN°1 / Forage N°2

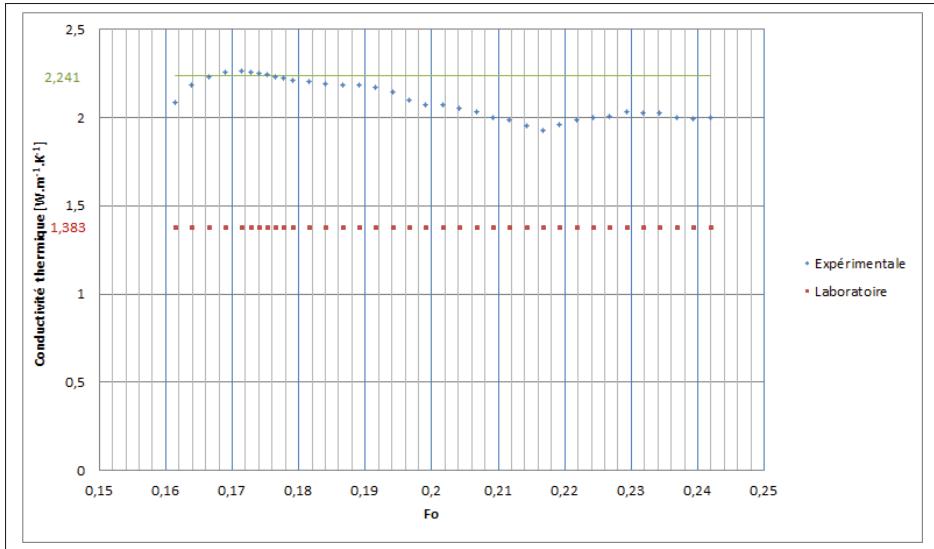


Figure 5.7 Évolution de la conductivité évaluée de façon in situ en fonction du nombre de Fourier ~ Sans rondelles de plastique souple ~ TestN°1 / Forage N°3

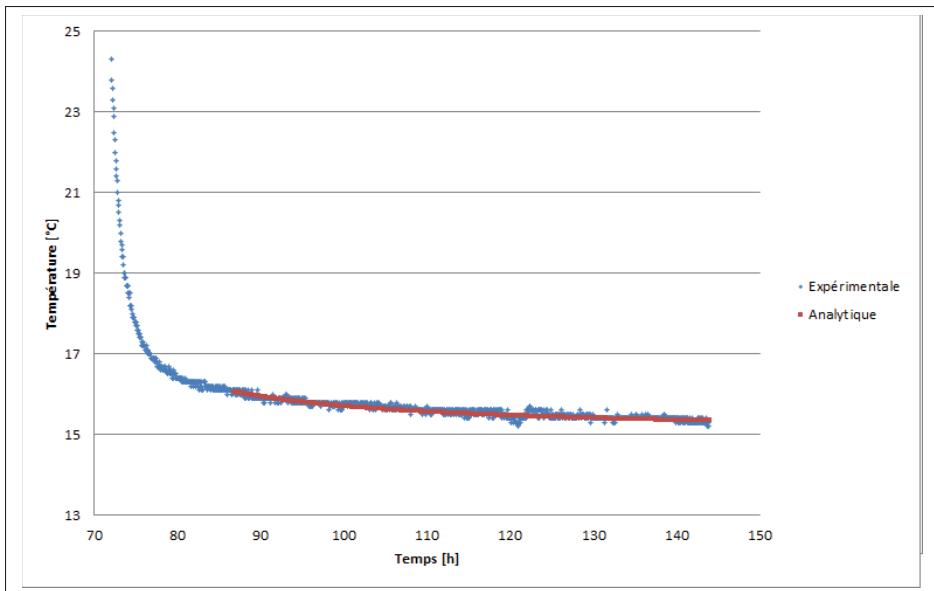


Figure 5.8 Évolution de la restitution de la température en fonction du temps ~ Sans rondelles de plastique souple ~ TestN°1 / Forage N°3

laboratoire pour les trois forages. La conductivité thermique a été évalué à l'aide de l'équation 2.3 transcrive en programmation Python donnée en Annexe Les Figures 5.4, 5.6 et 5.8, quant

à elles, présente la restitution de la température en fonction du temps. Elles présentent aussi, indiquées en rouge, l'évolution de la restitution de la température issue du modèle. Plus le modèle est semblable au résultat expérimental, plus les résultats sont exactes. Le nombre de Fourier est lié à la période de temps considéré pour réaliser la simulation. Comme le montre la courbe analytique rouge des Figures 5.4, 5.6 et 5.8, elles ne débutent pas au début de la restitution en raison de l'instabilité de la température. Au-delà, les résultats sont de moins en moins stables comme l'indique les Figures 5.3, 5.5 et 5.7. Les Figures 5.3, 5.5 et 5.7, nous montrent que l'évolution des conductivités thermiques devient stable entre des nombres de Fourier compris entre 0.17 et 0.18. Cette stabilité nous indique qu'entre ces deux bornes, les conductivités thermiques évaluées de façon *in situ* sont fiables. En faisant la moyenne des conductivités thermiques entre c'est deux nombres de Fourier, nous pouvons extraire la conductivité thermique évaluée de façon *in situ*. Par la suite, les conductivités thermiques seront déterminées de cette façon, pour des nombres de Fourier compris entre 0.17 et 0.18, pour l'ensemble des tests.

5.2.2.2 Test N°6 : AVEC rondelles de plastique souple

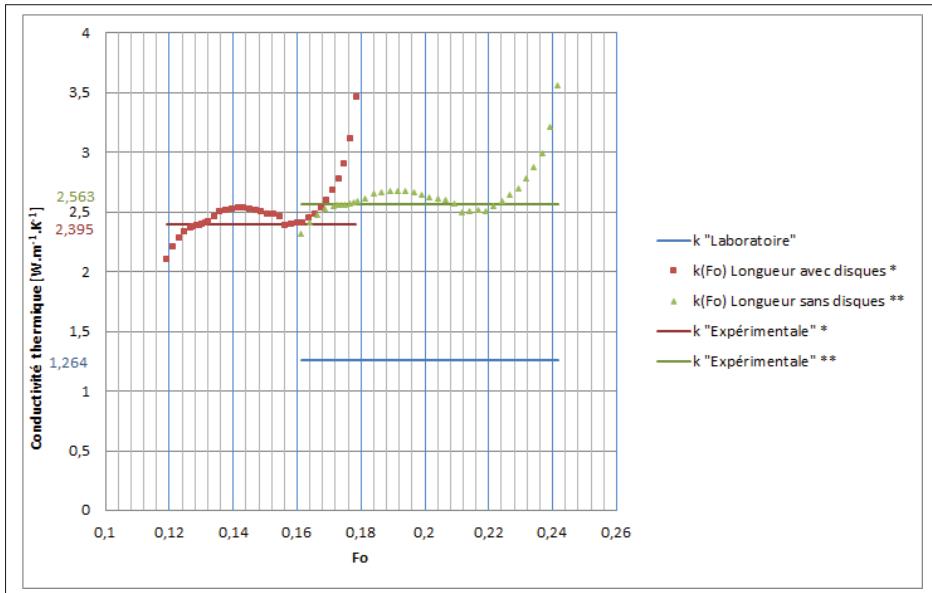


Figure 5.9 Évolution de la conductivité évaluée de façon in situ en fonction du nombre de Fourier ~ Avec rondelles de plastique souple ~ TestN°6 / Forage N°1

Les Figures 5.9, 5.11 et 5.13 présentent l'évolution de la conductivité thermique évaluée de façon in situ en fonction du nombre de Fourier et la conductivité thermique issue de l'analyse en laboratoire pour les trois forages. La différence entre les Figures 5.3, 5.5 et 5.7 réside dans le fait qu'il y a deux courbes de la conductivité thermique évaluée de façon in situ. L'une considère que la longueur chauffante est strictement celle du câble chauffant, l'autre intègre les disques de plastique souple. Les Figures 5.10, 5.12 et 5.14, quant à elles, présente la restitution de la température en fonction du temps pour une sections chauffante de longueur H=1.22m.

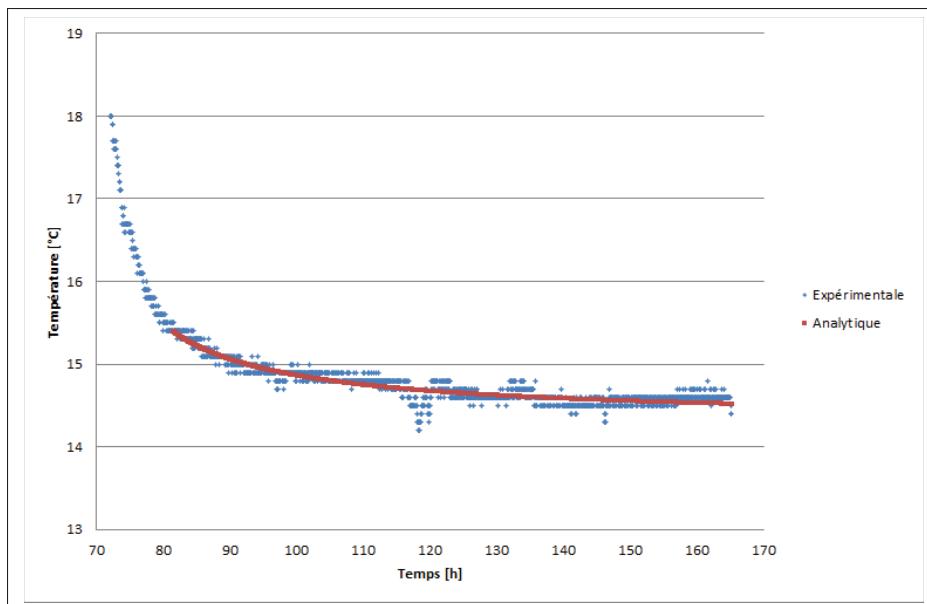


Figure 5.10 Évolution de la restitution de la température en fonction du temps ~ Avec rondelles de plastique souple ~ TestN°6 / Forage N°1

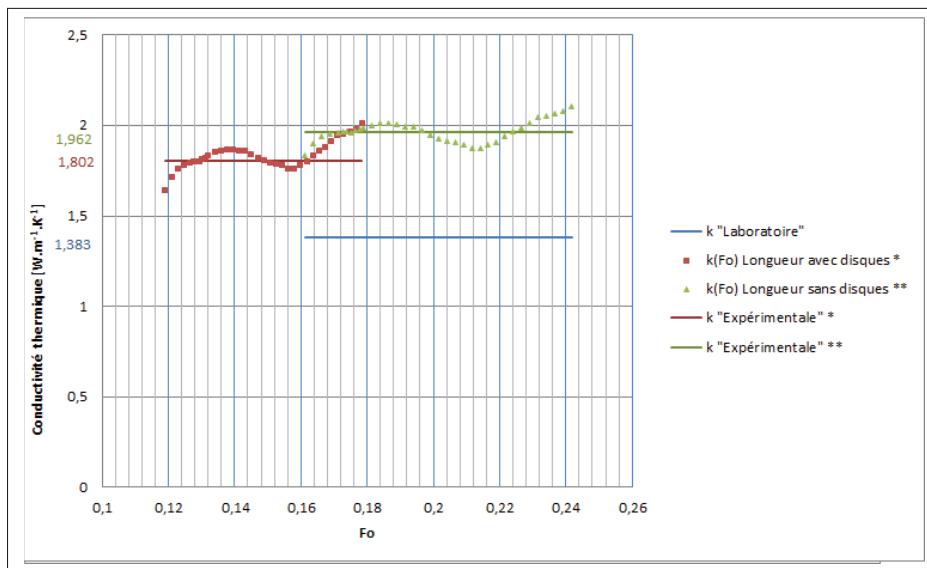


Figure 5.11 Évolution de la conductivité évaluée de façon in situ en fonction du nombre de Fourier ~ Avec rondelles de plastique souple ~ TestN°6 / Forage N°2

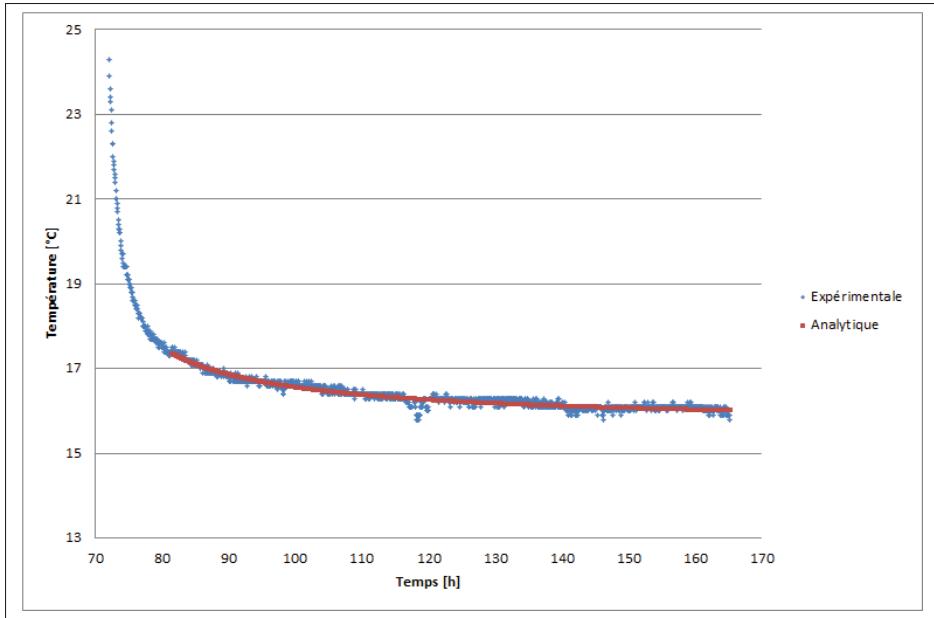


Figure 5.12 Évolution de la restitution de la température en fonction du temps ~ Avec rondelles de plastique souple ~ TestN°6 / Forage N°2

5.2.2.3 Analyse

Cette procédure d'analyse est reproduite trois fois à différentes profondeurs. Afin de faciliter l'analyse des résultats le Tableau 5.8 permet de faire un récapitulatif des données présentées dans chacune des sections 5.2.2.1 et 5.2.2.2.

Les conductivités thermiques issues de l'analyse In-situ seront comparées aux conductivités thermiques issues de l'analyse en laboratoire. Le Tableau 5.8 met très bien en évidence l'influence des disques de plastique souple sur le résultat final. En effet, sans disques de plastique souple, les résultats expérimentaux divergent entre 46.3% et 213.2% du résultat issu de l'analyse en laboratoire. Les résultats s'améliorent avec l'utilisation de disque de plastique souple. D'une différence de 213.2%, pour le forage N°1, nous passons à 102.8%, ce qui indique que les disques ont bien un effet positif sur les résultats. Les résultats marqués d'un astérisque sont ceux où les disques de plastique souple ont été intégrés à la longueur de forage. L'intégration des disques de plastique souple augmente la longueur chauffante de 20 cm ($H=1.42\text{cm}$).

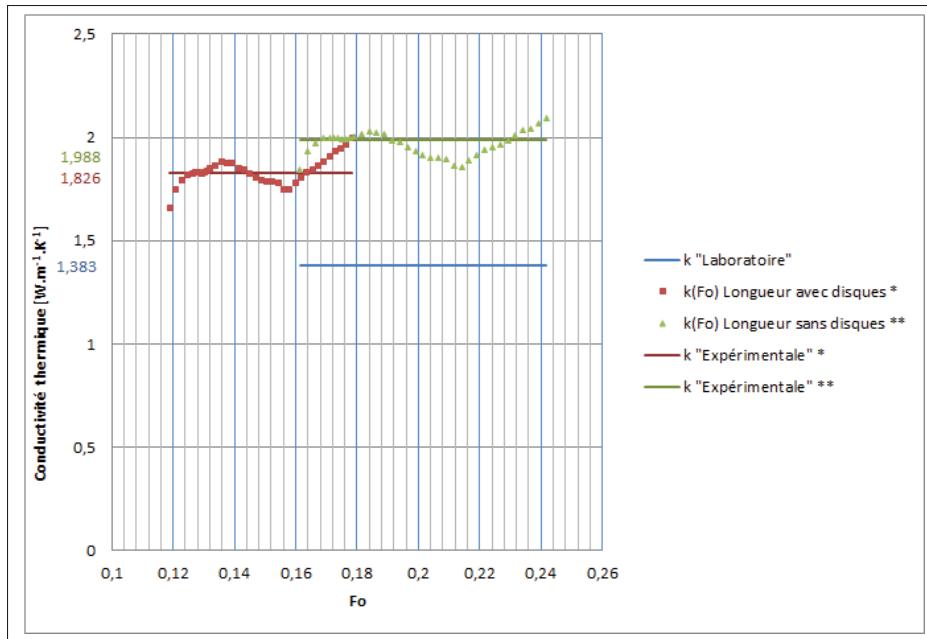


Figure 5.13 Évolution de la conductivité évaluée de façon in situ en fonction du nombre de Fourier ~ Avec rondelles de plastique souple ~ TestN°6 / Forage N°3

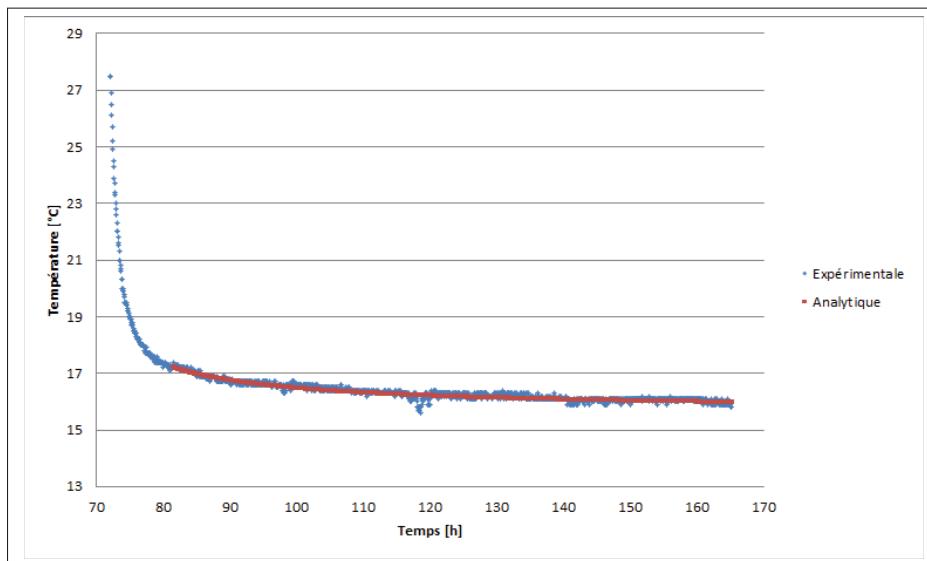


Figure 5.14 Évolution de la restitution de la température en fonction du temps ~ Avec rondelles de plastique souple ~ TestN°6 / Forage N°3

Tableau 5.8 Tableau récapitulatif des données issues des Tests N°1 et N°6

	Forage N°1		Forage N°2		Forage N°3	
Géométrie des tubes	4po (SDR-10)		2po (SDR-8)		1,25po (SDR-10)	
Profondeur et position du câble chauffant [m]	5.7m		3.6m		3.6m	
Capacité thermique volumique (<i>Laboratoire</i>) [$MJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$]			2.246			
Conductivité thermique (<i>Laboratoire</i>) [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]	1.264		1.383		1.383	
Présence des rondelles de plastique souple	Sans	Avec	Sans	Avec	Sans	Avec
Température initiale (<i>Expérimentale</i>) [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]	13.58	14.37 14.36*	15.06	15.77 15.74*	15.12	15.78 15.75*
Conductivité thermique (<i>In-situ</i>) [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]	3.959	2.563 2.395*	2.024	1.962 1.802*	2.241	1.988 1.826*
Différence entre la valeur <i>In-situ</i> / <i>Laboratoire</i>	213.2%	102.8% 89.5%*	46.3%	41.9% 30.3%*	62.0%	43.7% 32.0%*

Comme attendu, les résultats s'améliorent lorsque la longueur chauffante est plus grande. Une amélioration d'une dizaine de pour cent se remarque sur les résultats lorsque la longueur de chauffage intègre les disques de plastique souple. À ce stade de l'étude, on estime qu'il y a propagation de la chaleur entre chaque disque de plastique souple, mais à la section 5.2.6, des capteurs de température ont été positionnés entre chaque disques de plastique souple afin de préciser le phénomène.

5.2.3 Analyse N°2 : Comparaison entre le test N°2 et le test N°5

5.2.3.1 Test N°2 : SANS rondelles de plastique souple

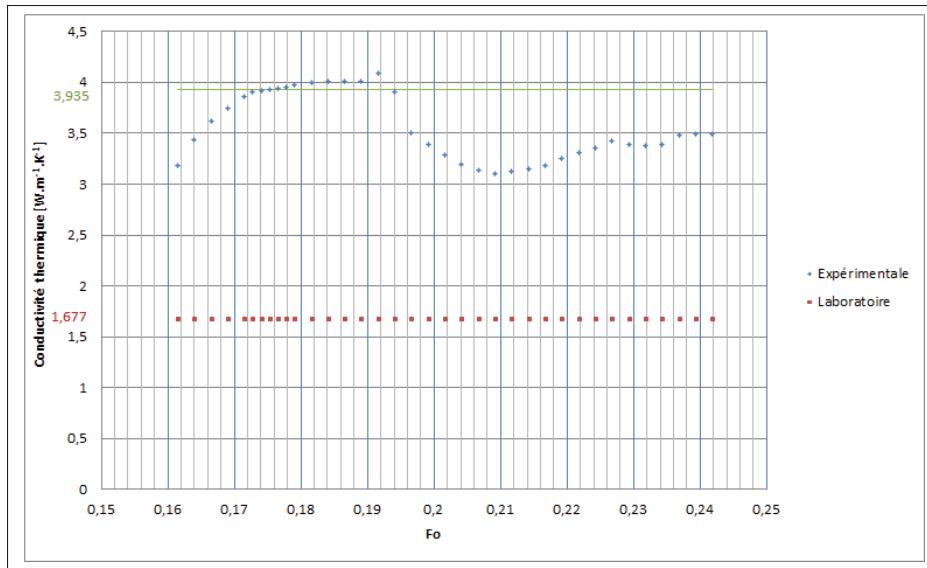


Figure 5.15 Évolution de la conductivité évaluée de façon in situ en fonction du nombre de Fourier ~ Sans rondelles de plastique souple ~ TestN°2 / Forage N°1

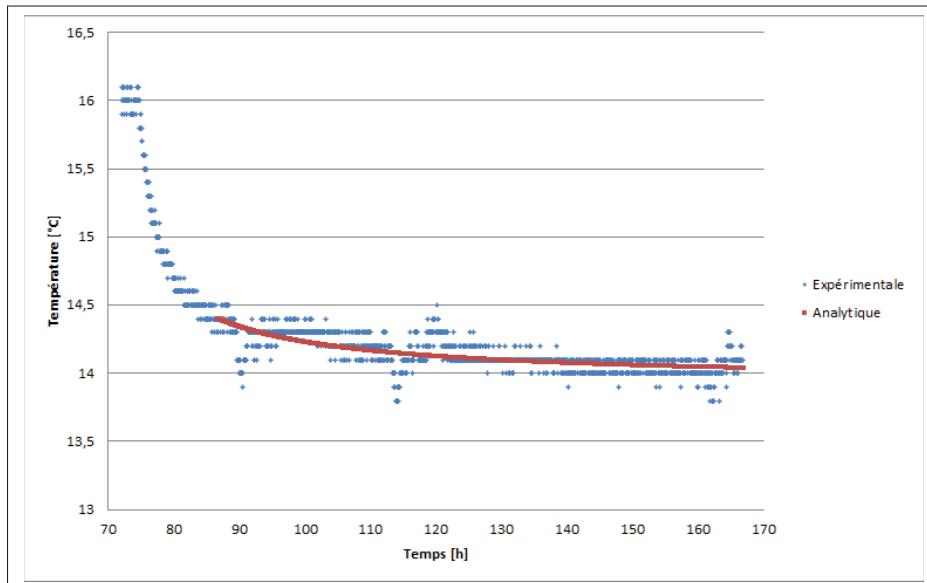


Figure 5.16 Évolution de la restitution de la température en fonction du temps ~ Sans rondelles de plastique souple ~ TestN°2 / Forage N°1

5.2.3.2 Test N°5 : AVEC rondelles de plastique souple

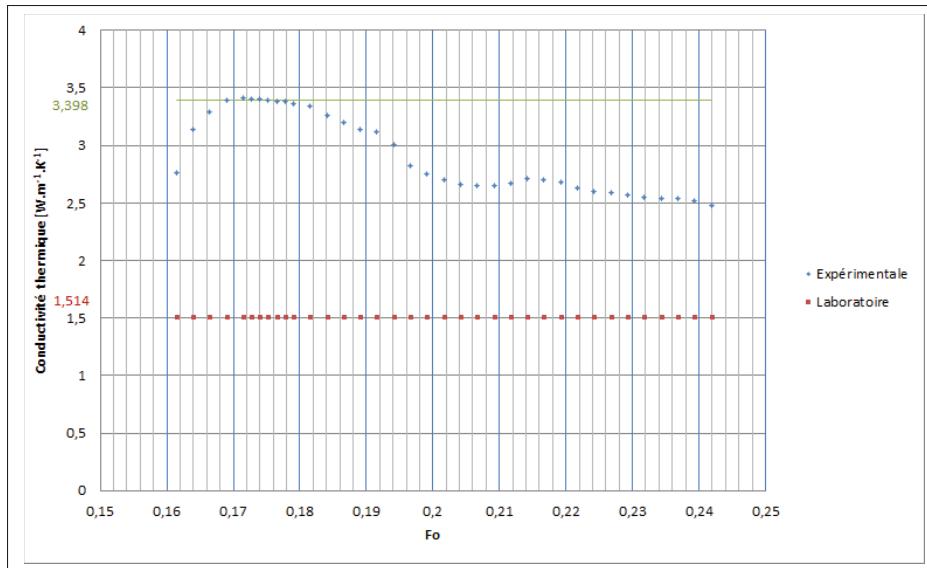


Figure 5.17 Évolution de la conductivité évaluée de façon in situ en fonction du nombre de Fourier ~ Sans rondelles de plastique souple ~ TestN°2 / Forage N°2

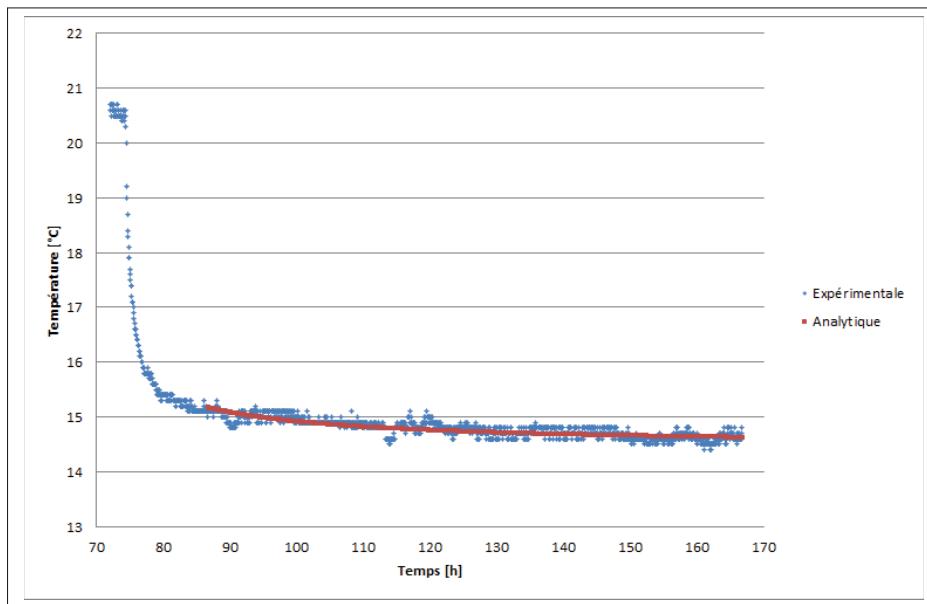


Figure 5.18 Évolution de la restitution de la température en fonction du temps ~ Sans rondelles de plastique souple ~ TestN°2 / Forage N°2

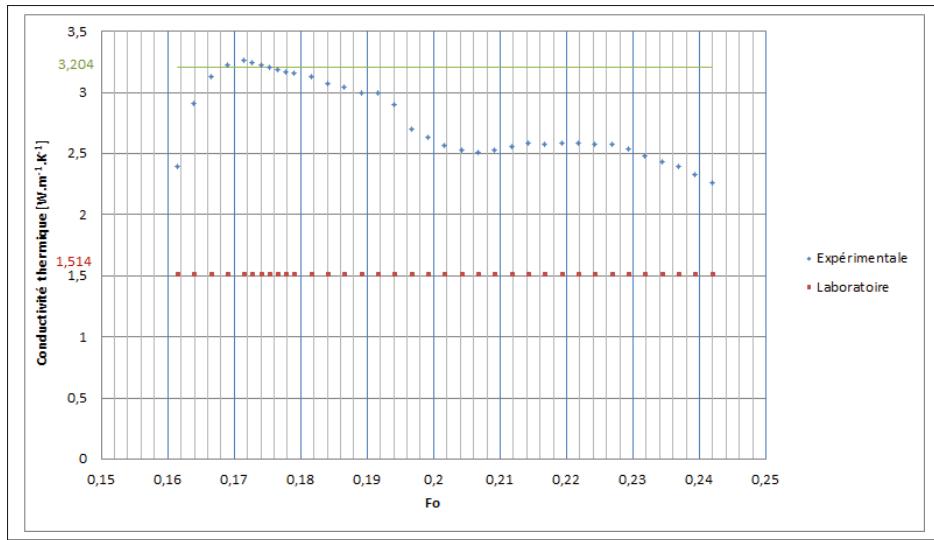


Figure 5.19 Évolution de la conductivité évaluée de façon in situ en fonction du nombre de Fourier ~ Sans rondelles de plastique souple ~ TestN°2 / Forage N°3

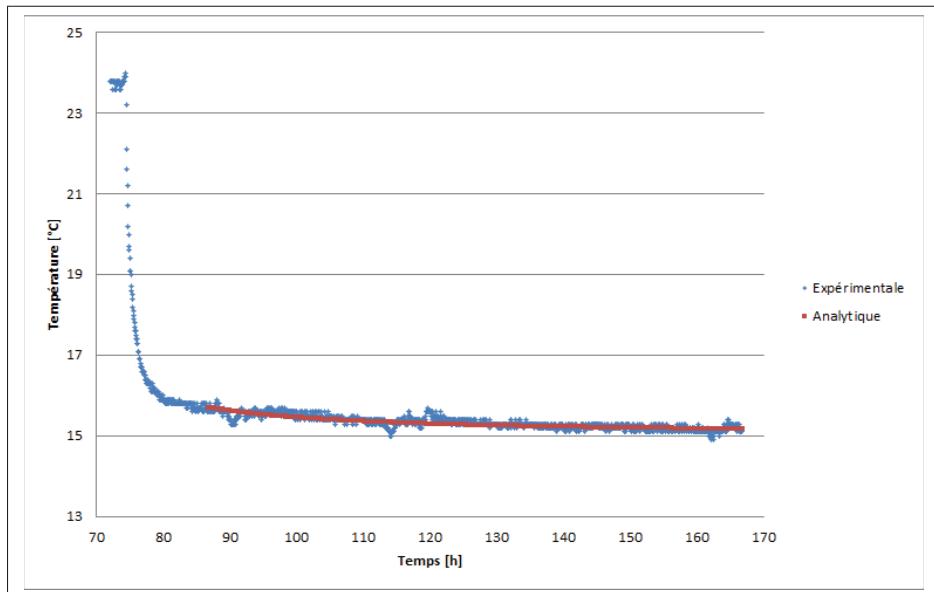


Figure 5.20 Évolution de la restitution de la température en fonction du temps ~ Sans rondelles de plastique souple ~ TestN°2 / Forage N°3

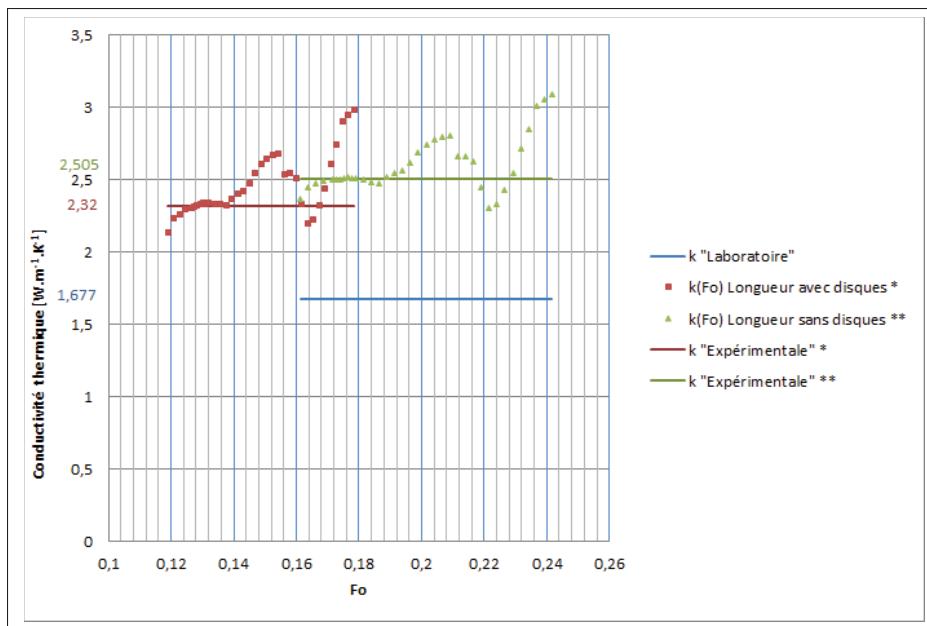


Figure 5.21 Évolution de la conductivité évaluée de façon in situ en fonction du nombre de Fourier ~ Avec rondelles de plastique souple ~ TestN°5 / Forage N°1

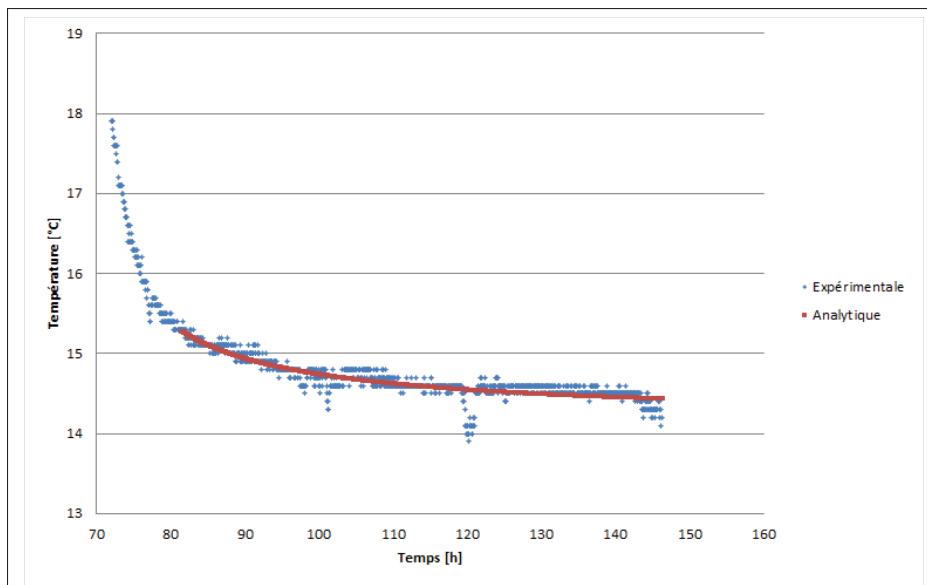


Figure 5.22 Évolution de la restitution de la température en fonction du temps ~ Avec rondelles de plastique souple ~ TestN°5 / Forage N°1

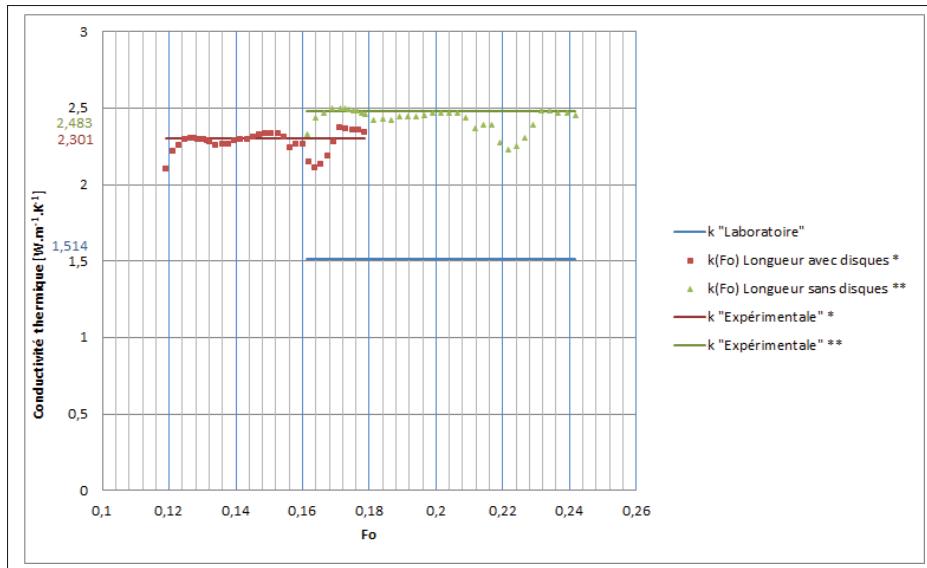


Figure 5.23 Évolution de la conductivité évaluée de façon in situ en fonction du nombre de Fourier \sim Avec rondelles de plastique souple \sim TestN°5 / Forage N°2

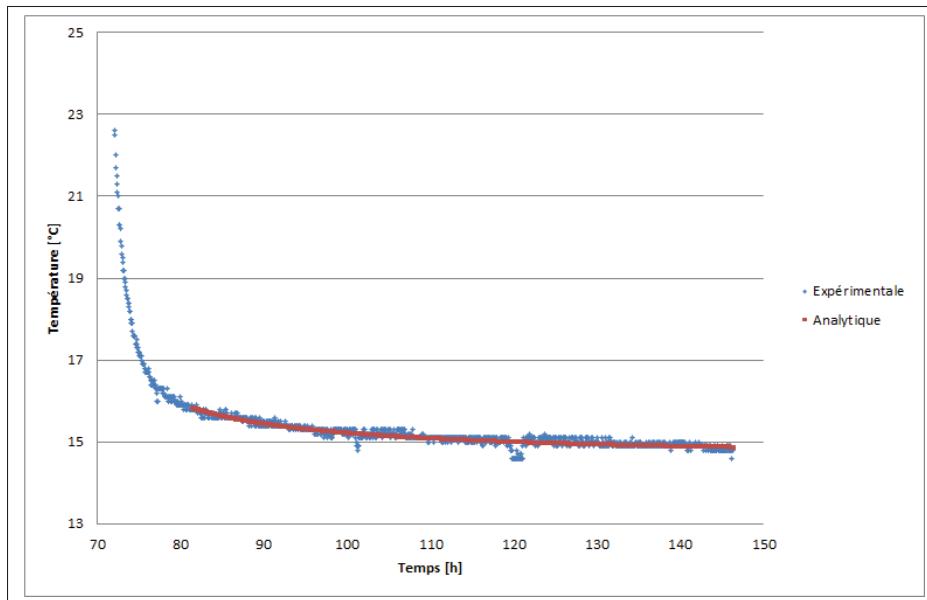


Figure 5.24 Évolution de la restitution de la température en fonction du temps \sim Avec rondelles de plastique souple \sim TestN°5 / Forage N°2

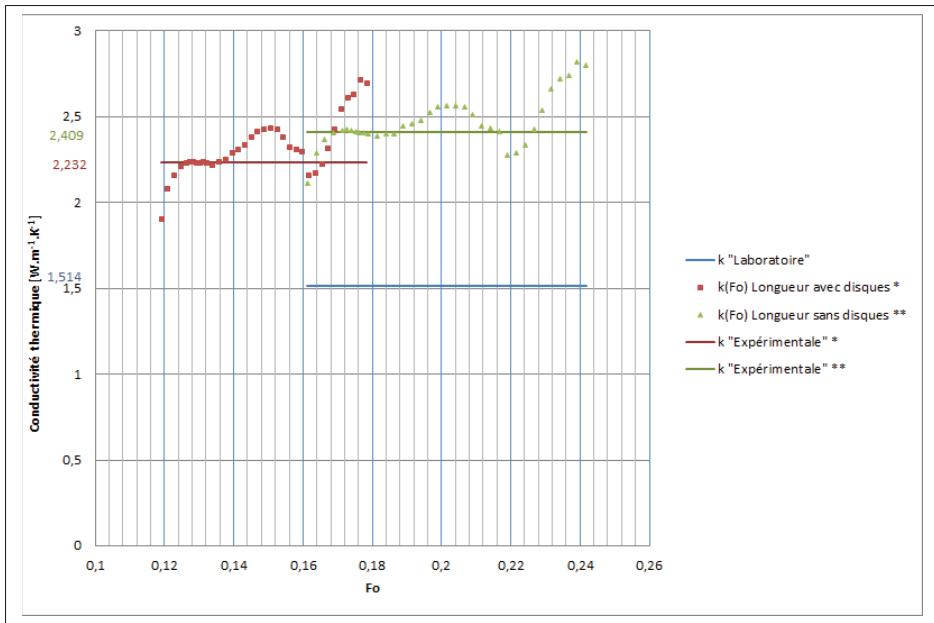


Figure 5.25 Évolution de la conductivité évaluée de façon in situ en fonction du nombre de Fourier ~ Avec rondelles de plastique souple ~ TestN°5 / Forage N°3

Tableau 5.9 Tableau récapitulatif des données issues des Tests N°2 et N°5

	Forage N°1		Forage N°2		Forage N°3	
Géométrie des tubes	4po (SDR-10)		2po (SDR-8)		1,25po (SDR-10)	
Profondeur et position du câble chauffant [m]	6.5m		5m		5m	
Capacité thermique volumique (<i>Laboratoire</i>) [$MJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$]			2.246			
Conductivité thermique (<i>Laboratoire</i>) [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]	1.677		1.514		1.514	
Présence des rondelles de plastique souple	Sans	Avec	Sans	Avec	Sans	Avec
Température initiale (<i>Expérimentale</i>) [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]	13.96	14.24 14.21*	14.53	14.65 14.63*	15.09	14.77 14.75*
Conductivité thermique (<i>In-situ</i>) [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]	3.935	2.505 2.32*	3.398	2.483 2.301*	3.204	2.409 2.232*
Différence entre la valeur <i>In-situ</i> / <i>Laboratoire</i>	134.6%	49.4% 38.3%*	124.4%	64.0% 52.0%*	111.6%	59.1% 47.4%*

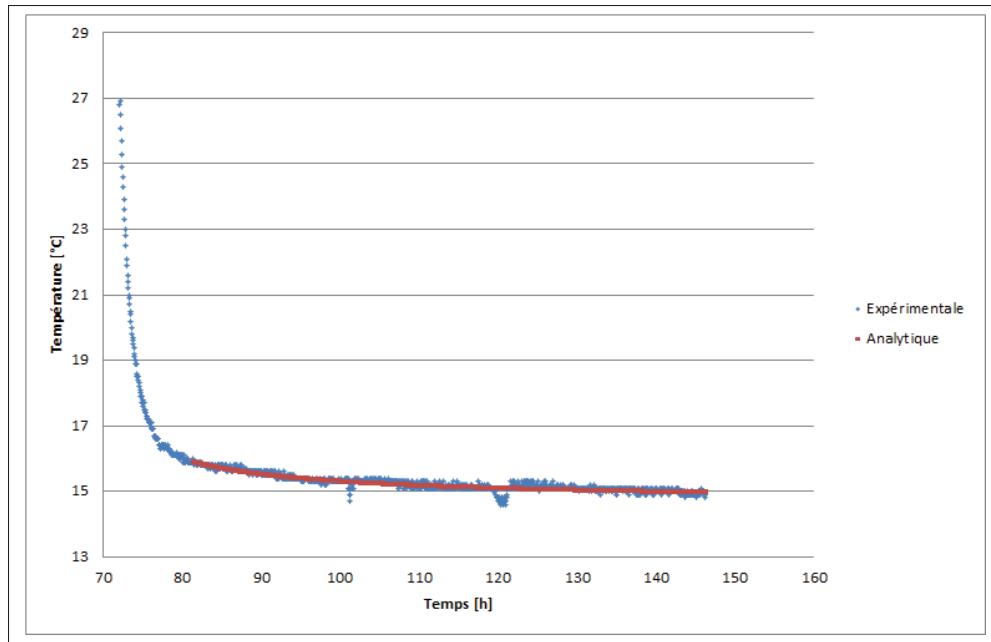


Figure 5.26 Évolution de la restitution de la température en fonction du temps ~ Avec rondelles de plastique souple ~ TestN°5 / Forage N°3

5.2.3.3 Analyse

Les remarques sont les mêmes que pour l'analyse précédente. Les résultats issus des tests avec rondelles de plastique souple sont plus précis que ceux sans rondelles. Nous améliorons les résultats de moitié environ, pour le forage N°1 de 134.6% à 49.4%, pour le forage N°2 de 124.4 % à 64.0%, et enfin, pour le forage N°3 de 111.6% à 59.1%. Lorsque les disques de plastique souple sont inclus à l'analyse dans la longueur chauffante H, les résultats sont généralement améliorés d'une dizaine de pour cent. La variation de la conductivité thermique extraite de l'expérimentation, en incluant les disques de plastique souple, varie entre 38.3% et 52.0% par rapport à la conductivité issue des analyses en laboratoire.

5.2.4 Analyse N°3 : Comparaison entre le test N°3 et le test N°4

5.2.4.1 Test N°3 : SANS rondelles de plastique souple

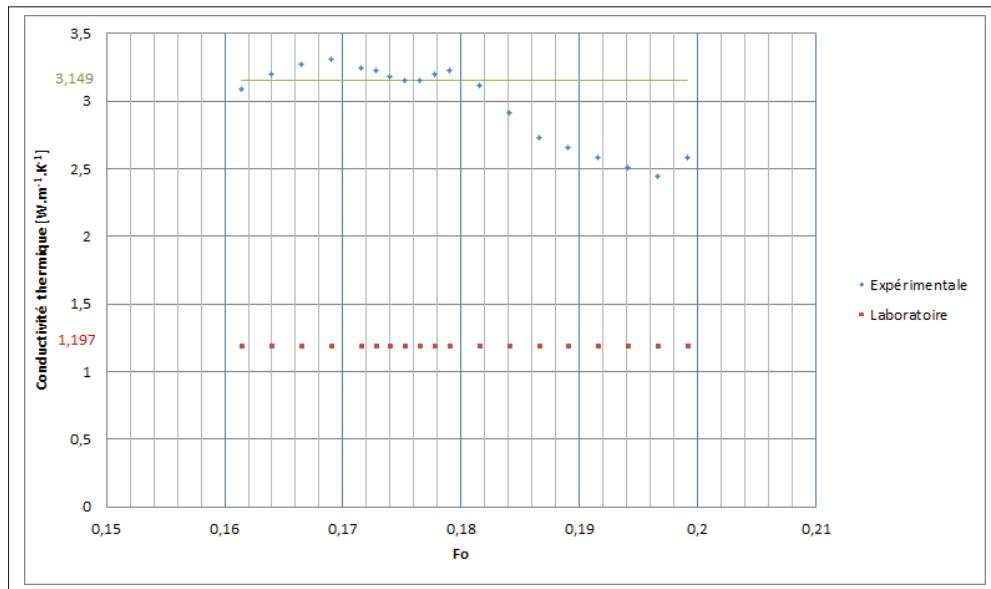


Figure 5.27 Évolution de la conductivité évaluée de façon in situ en fonction du nombre de Fourier \sim Sans rondelles de plastique souple \sim TestN°3 / Forage N°1

5.2.4.2 Test N°4 : AVEC rondelles de plastique souple

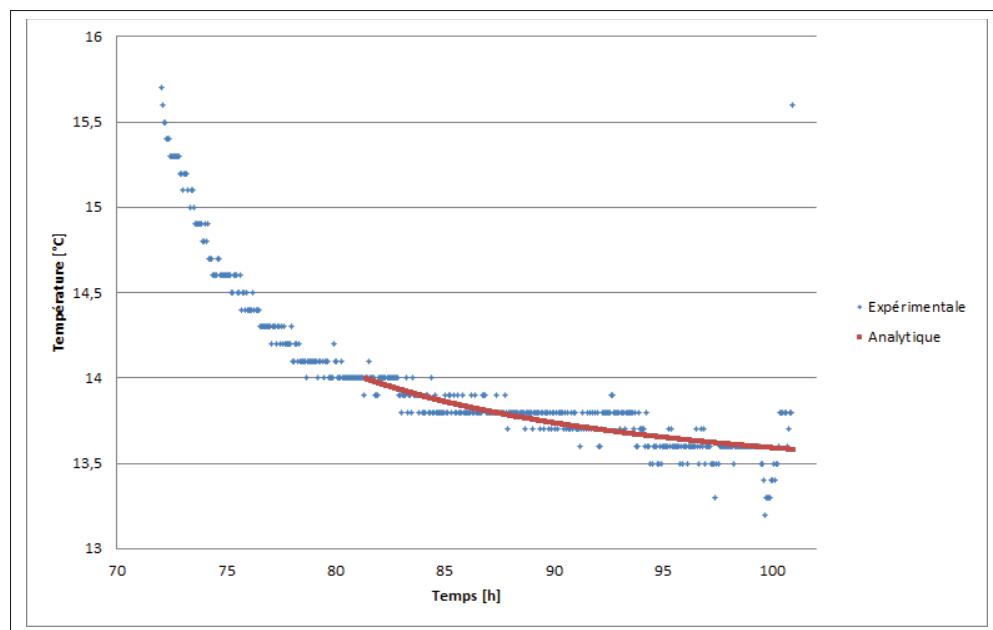


Figure 5.28 Évolution de la restitution de la température en fonction du temps ~ Sans rondelles de plastique souple ~ TestN°3 / Forage N°1

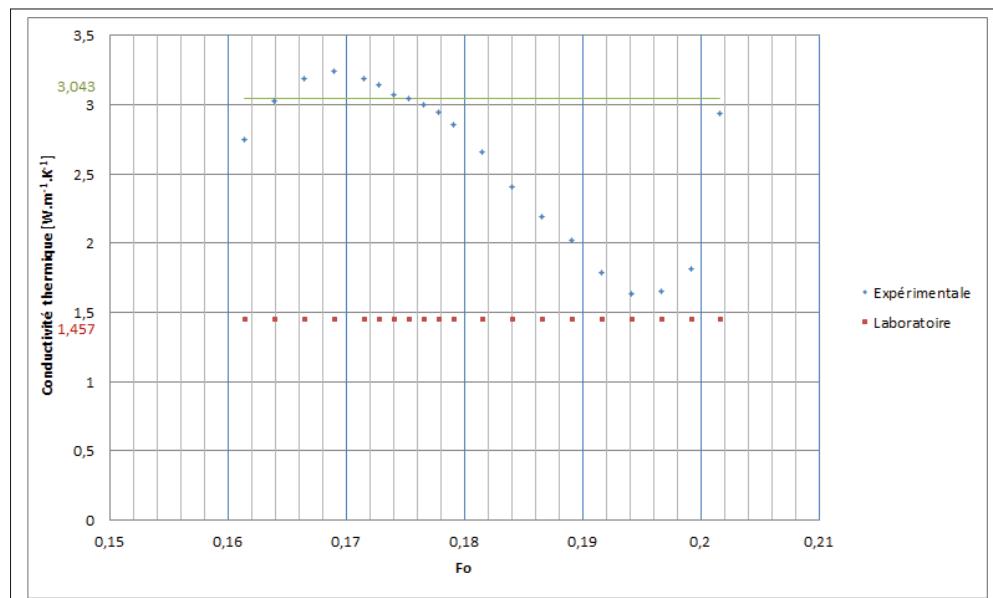


Figure 5.29 Évolution de la conductivité évaluée de façon in situ en fonction du nombre de Fourier ~ Sans rondelles de plastique souple~ TestN°3 / Forage N°2

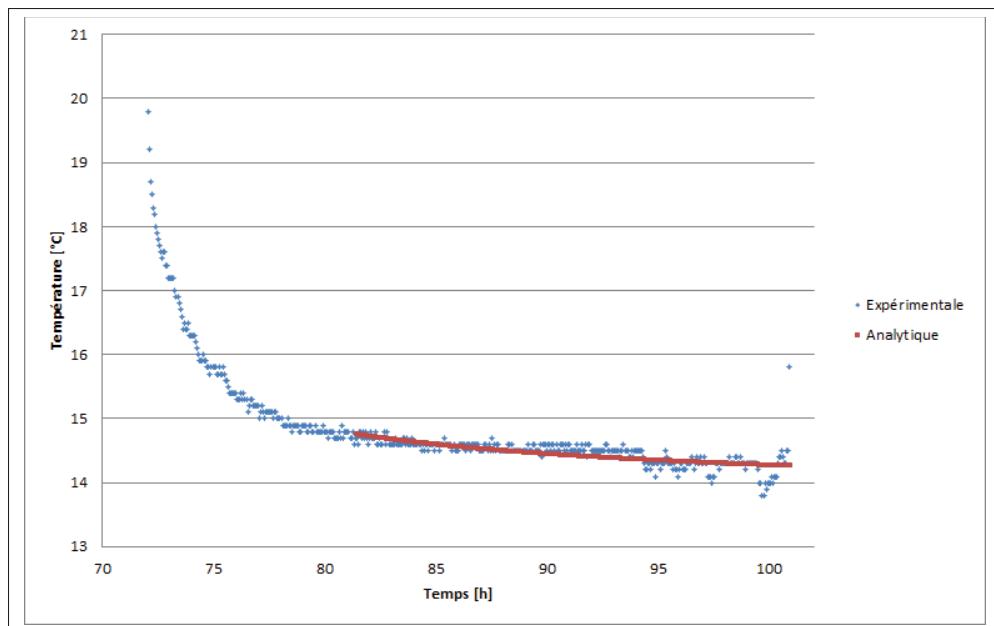


Figure 5.30 Évolution de la restitution de la température en fonction du temps ~ Sans rondelles de plastique souple ~ TestN°3 / Forage N°2

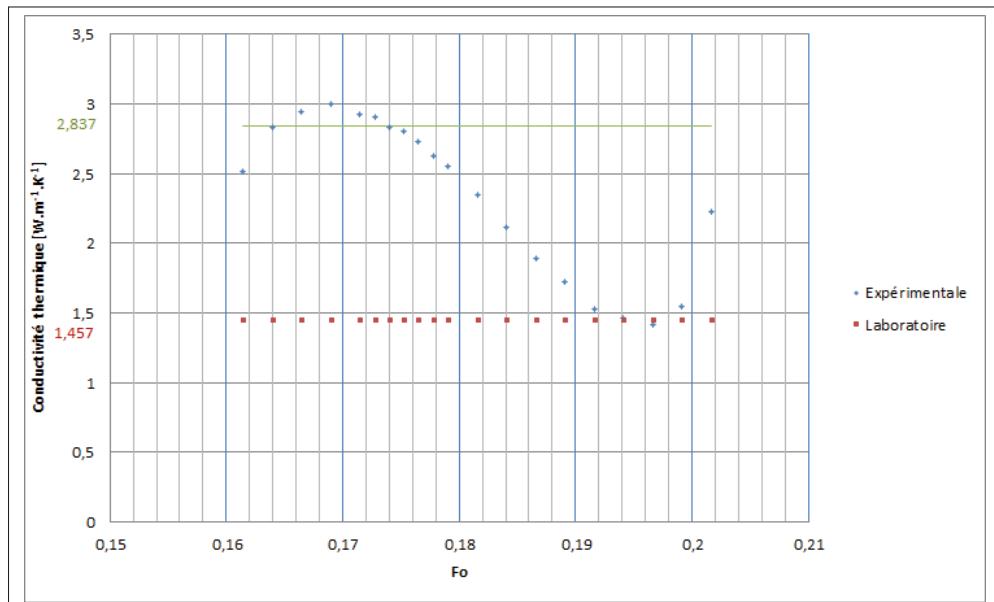


Figure 5.31 Évolution de la conductivité évaluée de façon in situ en fonction du nombre de Fourier ~ Sans rondelles de plastique souple ~ TestN°3 / Forage N°3

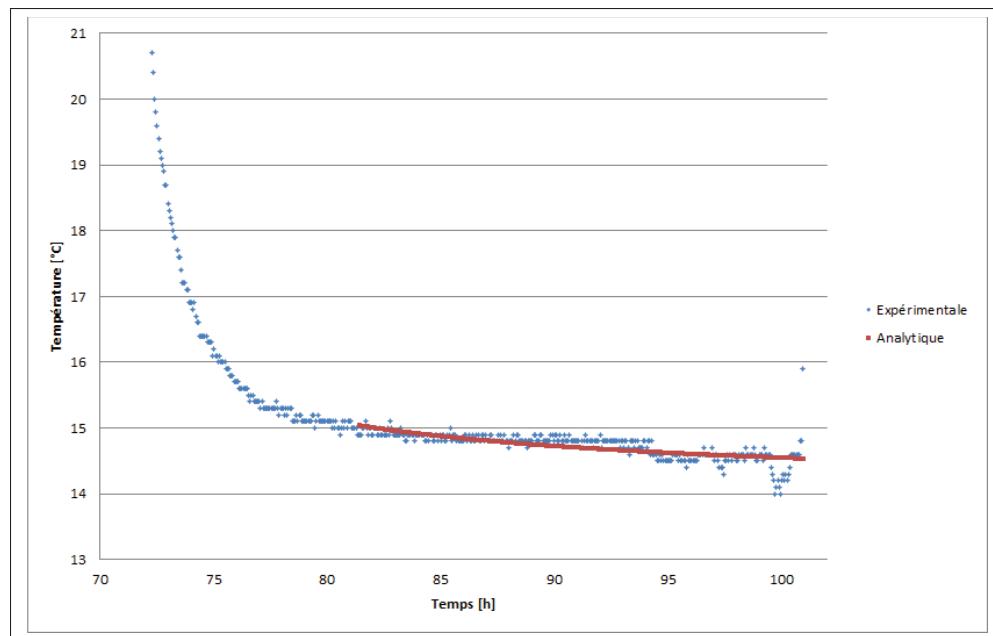


Figure 5.32 Évolution de la restitution de la température en fonction du temps ~ Sans rondelles de plastique souple ~ TestN°3 / Forage N°3

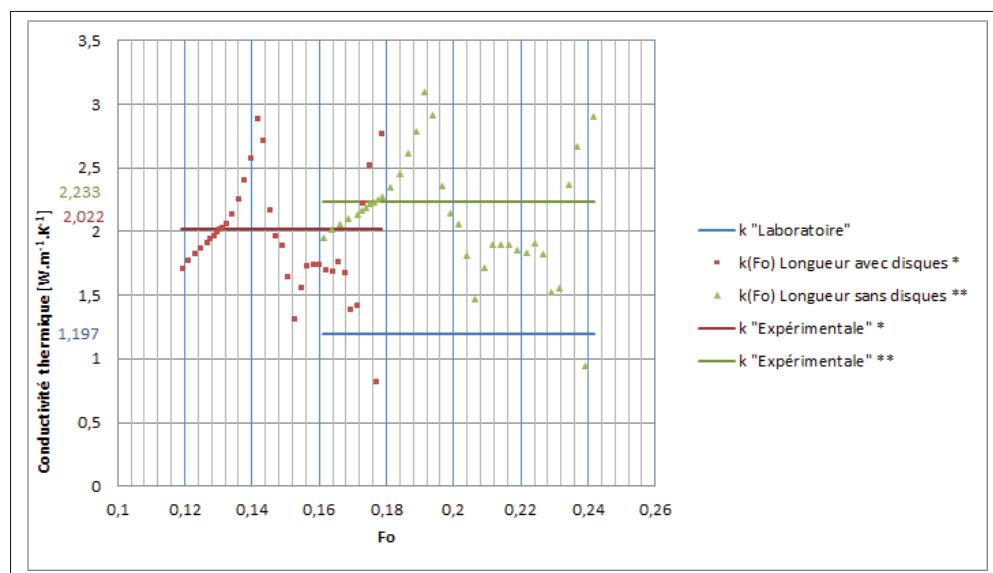


Figure 5.33 Évolution de la conductivité évaluée de façon in situ en fonction du nombre de Fourier ~ Avec rondelles de plastique souple~ TestN°4 / Forage N°1

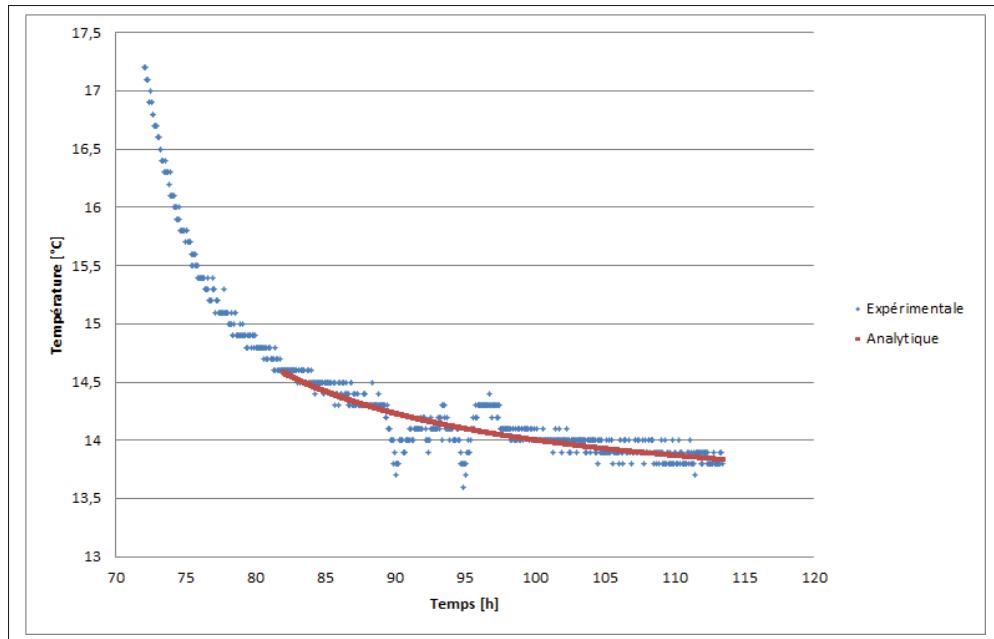


Figure 5.34 Évolution de la restitution de la température en fonction du temps ~ Avec rondelles de plastique souple ~ TestN°4 / Forage N°1

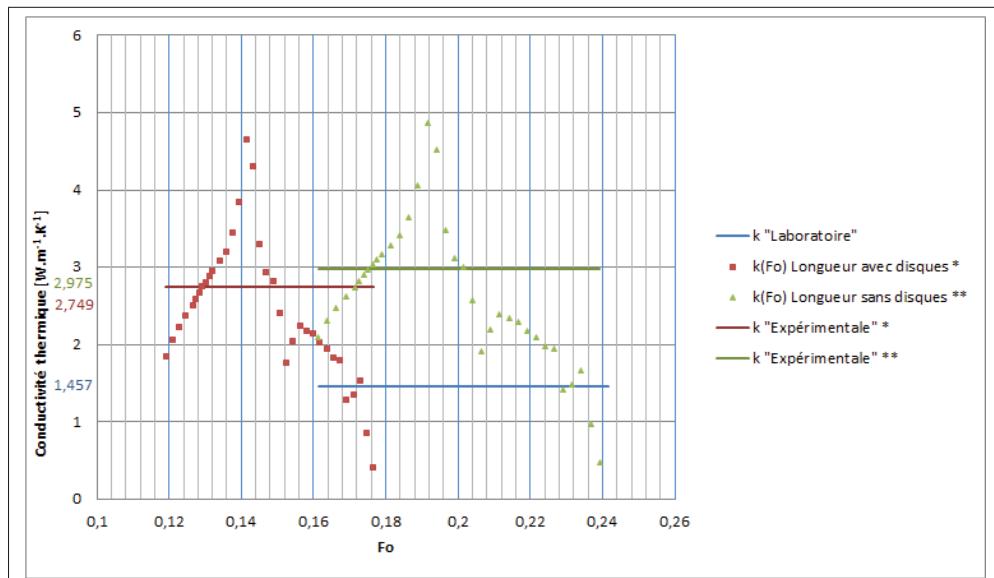


Figure 5.35 Évolution de la conductivité évaluée de façon in situ en fonction du nombre de Fourier ~ Avec rondelles de plastique souple ~ TestN°4 / Forage N°2

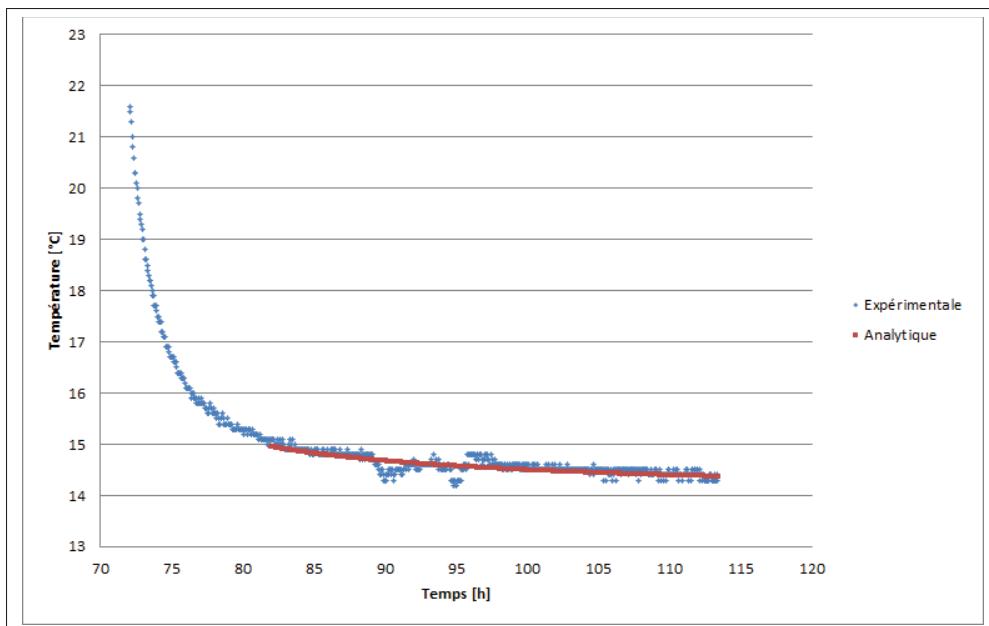


Figure 5.36 Évolution de la restitution de la température en fonction du temps ~ Avec rondelles de plastique souple ~ TestN°4 / Forage N°2

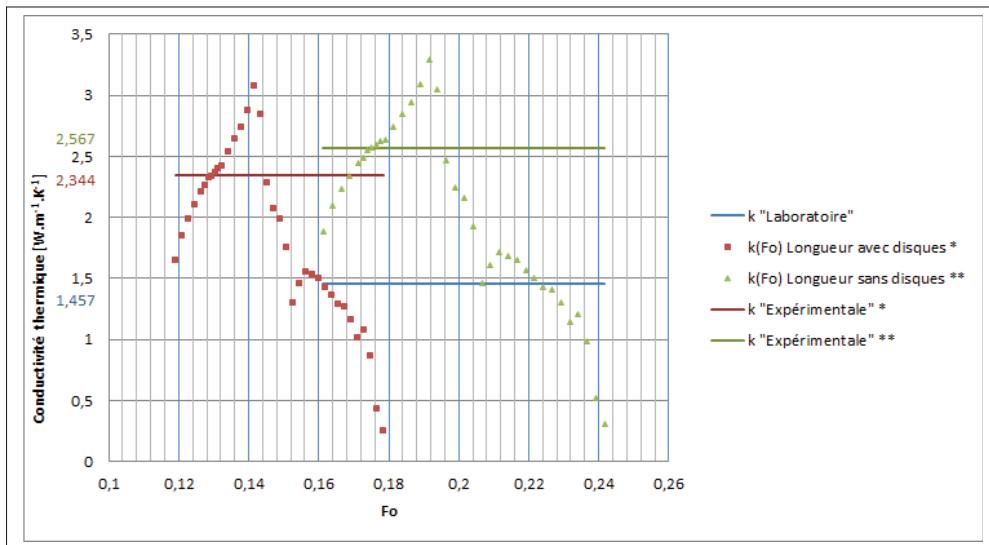


Figure 5.37 Évolution de la conductivité évaluée de façon in situ en fonction du nombre de Fourier ~ Avec rondelles de plastique souple ~ TestN°4 / Forage N°3

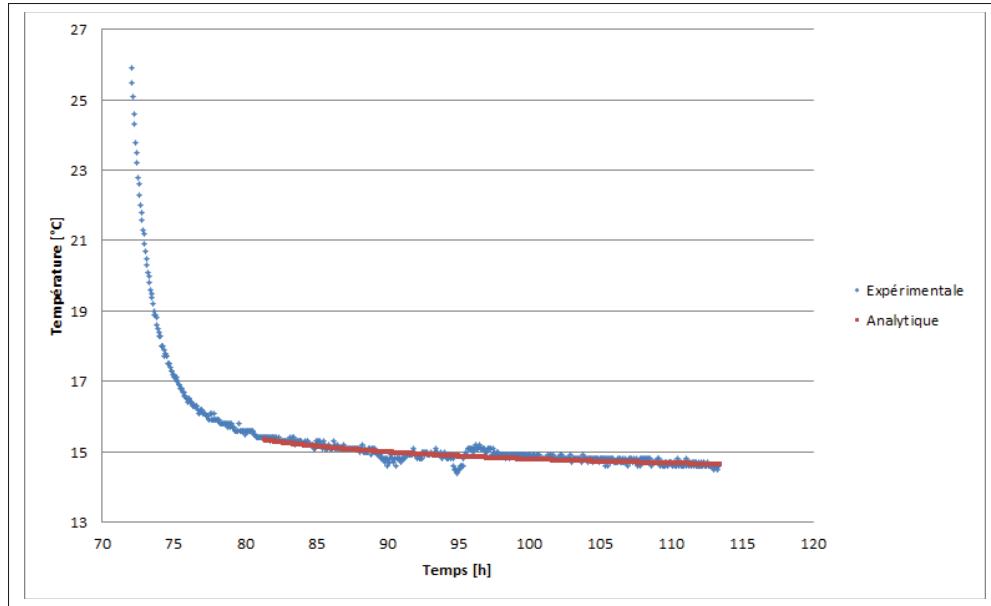


Figure 5.38 Évolution de la restitution de la température en fonction du temps ~ Avec rondelles de plastique souple ~ TestN°4 / Forage N°3

5.2.4.3 Analyse

Tableau 5.10 Tableau récapitulatif des données issues des Tests N°3 et N°4

	Forage N°1		Forage N°2		Forage N°3	
Géométrie des tubes	4po (SDR-10)		2po (SDR-8)		1,25po (SDR-10)	
Profondeur et position du câble chauffant [m]	7.3m		6m		6m	
Capacité thermique volumique (<i>Laboratoire</i>) [$MJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$]			2.246			
Conductivité thermique (<i>Laboratoire</i>) [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]	1.197		1.457		1.457	
Présence des rondelles de plastique souple	Sans	Avec	Sans	Avec	Sans	Avec
Température initiale (<i>Expérimentale</i>) [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]	13.23	13.41 13.37*	13.85	14.07 14.04*	15.09	14.30 14.26*
Conductivité thermique (<i>In-situ</i>) [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]	3.149	2.233 2.022*	3.043	2.975 2.749*	2.837	2.567 2.344*
Différence entre la valeur <i>In-situ</i> / <i>Laboratoire</i>	163.1%	86.5% 68.9%*	108.9%	104.2% 88.7%*	94.7%	76.2% 60.9%*

Pour cette analyse, la tendance issue des analyses précédentes est respectée. Les résultats avec disques de plastique souple sont plus exacts que les résultats sans disques.

5.2.5 Analyse N°4 : Comparaison entre le test N°6 et le test N°7

Le but de cette analyse est de vérifier l'influence de deux trous dans le disque sur la mesure. Les perçages dans le disque sont utilisés pour le prototype à grande échelle. Les trous permettent de faciliter l'insertion des 12 sections chauffantes dans un forage de 150m. Lorsque le câble est inséré dans le puits, les disques exercent de la friction et bloquent le passage de l'eau, empêchant ainsi son insertion. Les trous permettent le passage de l'eau et améliorent l'insertion du câble dans le puits. Il est donc nécessaire de vérifier l'influence de ces trous sur la mesure. Chaque disque est percé de deux trous opposés et chaque disque est décalé de 90°, l'un par rapport à l'autre, afin de ne pas positionner les trous en face l'un de l'autre et bloquer le plus possible les mouvements de convection.

5.2.5.1 Test N°7 : AVEC rondelles de plastique souple percées

5.2.5.2 Analyse

Les perçages influencent les mesures d'une dizaine de pour cent le résultat final. La tendance est respectée pour les forages N°1, N°2 et N°3, comme indiqué dans le tableau 5.11. Dans ce tableau, on y trouve les résultats avec rondelles de plastique souple "percées" et rondelles de plastique souple "non-percée". Les résultats nous montrent que les trous favorisent le transfert de chaleur par convection, ce qui influe négativement la mesure de température. L'évaluation de la conductivité thermique est donc pénalisée par l'influence de la convection.

5.2.6 Analyse N°5 : Influence des disques de plastique souple sur le transfert de chaleur

Le but de cette analyse est de déterminer l'influence de plus de disques de plastique souple au-dessus et en dessous du câble chauffant sur les résultats. Lors de ce test le câble chauffant

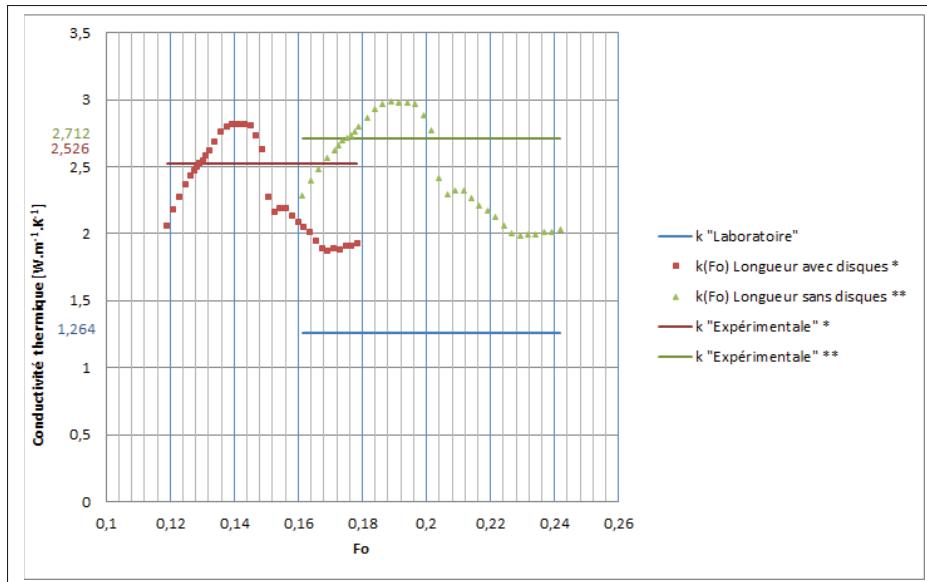


Figure 5.39 Évolution de la conductivité évaluée de façon in situ en fonction du nombre de Fourier \sim Avec rondelles de plastique souple \sim TestN°7 / Forage N°1

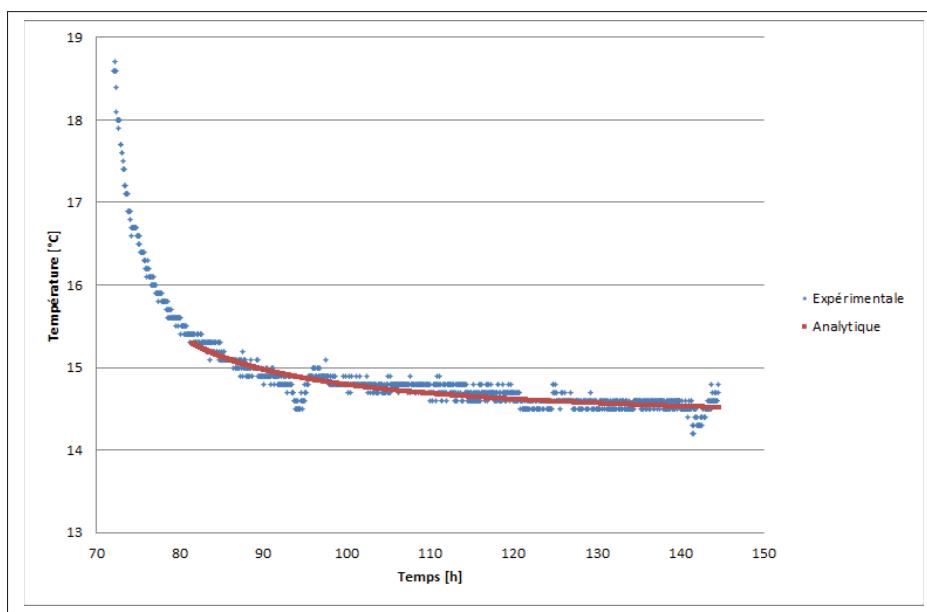


Figure 5.40 Évolution de la restitution de la température en fonction du temps \sim Avec rondelles de plastique souple \sim TestN°7 / Forage N°1

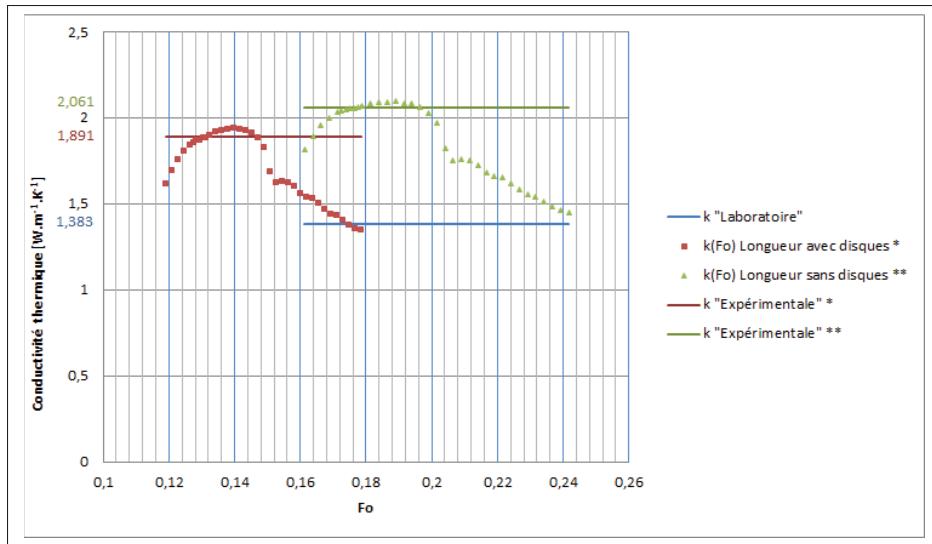


Figure 5.41 Évolution de la conductivité évaluée de façon in situ en fonction du nombre de Fourier \sim Avec rondelles de plastique souple \sim TestN°7 / Forage N°2

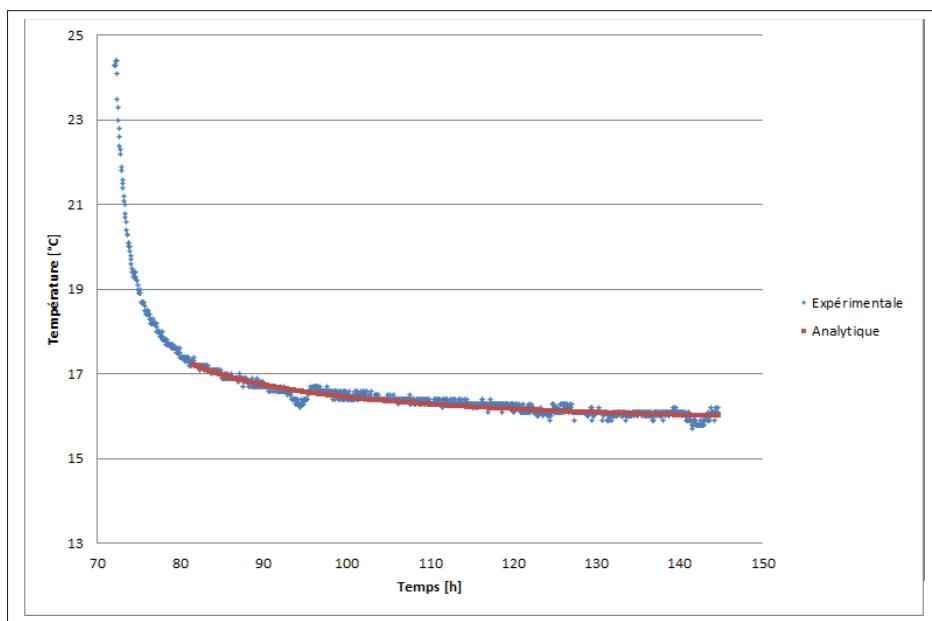


Figure 5.42 Évolution de la restitution de la température en fonction du temps \sim Avec rondelles de plastique souple \sim TestN°7 / Forage N°2

était muni de quatre disques de plastique souple sur la partie supérieure et de trois disques sur la partie inférieure. Cette étude permet également de faire une analyse sur l'évolution de la

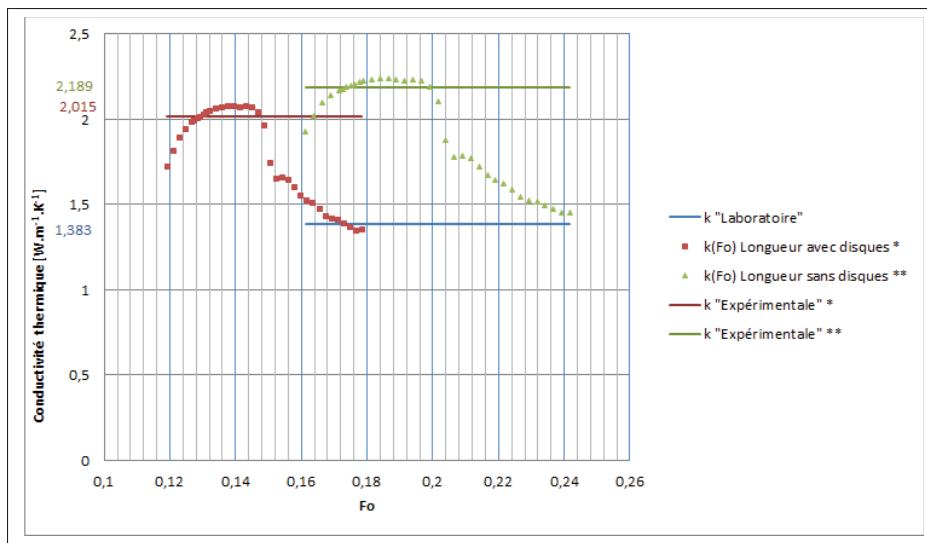


Figure 5.43 Évolution de la conductivité évaluée de façon in situ en fonction du nombre de Fourier ~ Avec rondelles de plastique souple ~ TestN°7 / Forage N°3

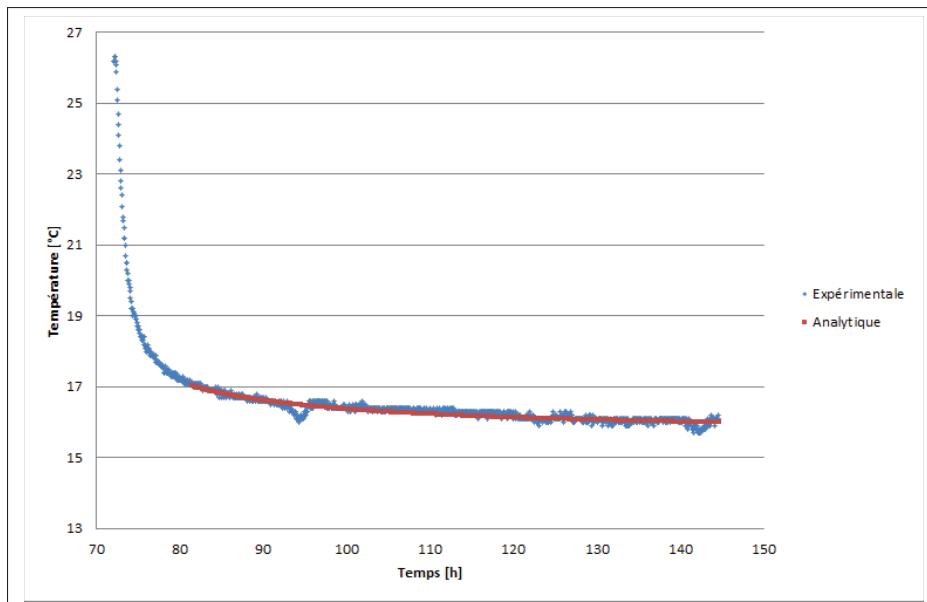


Figure 5.44 Évolution de la restitution de la température en fonction du temps ~ Avec rondelles de plastique souple ~ TestN°7 / Forage N°3

température le long du câble chauffant, car des capteurs de température ont été placés entre chaque disque de plastique souple. La mesure de la température permet de déterminer l'effica-

Tableau 5.11 Tableau récapitulatif des données issues des Tests N°6 et N°7

	Forage N°1		Forage N°2		Forage N°3	
Géométrie des tubes	4po (SDR-10)		2po (SDR-8)		1,25po (SDR-10)	
Profondeur et position du câble chauffant [m]	5.7m		3.6m		3.6m	
Capacité thermique volumique (<i>Laboratoire</i>) [$MJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$]			2.246			
Conductivité thermique (<i>Laboratoire</i>) [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]	1.264		1.383		1.383	
Présence des rondelles de plastique souple "percées"	Avec	Sans	Avec	Sans	Avec	Sans
Température initiale (<i>Expérimentale</i>) [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]	14.34 14.32*	14.37 14.36*	15.71 15.67*	15.77 15.74*	15.76 15.73*	15.78 15.75*
Conductivité thermique (<i>In-situ</i>) [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]	2.712 2.526*	2.563 2.395*	2.061 1.891*	1.962 1.802*	2.183 2.095*	1.988 1.826*
Différence entre la valeur <i>In-situ</i> / <i>Laboratoire</i>	114.6% 99.8%*	102.8% 89.5%*	49.0% 36.7%*	41.9% 30.3%*	57.8% 51.5%*	43.7% 32.0%*

cité des disques de plastique souple sur la diffusion de la chaleur le long du câble chauffant. Cette analyse permet de déterminer plus facilement quelle longueur de câble chauffant utiliser lors de l'analyse et le nombre de disques de plastique souple utiliser lors de l'expérimentation. Le test a été réalisé sur le forage N°3 muni du tuyau d'un pouce et quart, le cas le plus commun en géothermie.

5.2.6.1 Analyse

Ce dernier test a été fait plus tardivement dans la saison, le sol a donc eu le temps de se stabiliser en température. La température initiale a été déterminée sur une période de 24 heures et elle est égale à 11.134°C, comparativement à 13.756°C, température initiale utilisée lors des précédents tests. La procédure est identique au précédent test. Les astérisques présentés à la Figure 5.45 correspondent à la longueur considérée dans les calculs. un astérisque correspondant à 1.22m de longueur chauffante, deux astérisques à 1.42m, trois astérisques à 1.62m et 4 astérisques correspondant à 1.82m de longueur chauffante. La Figure 5.45 nous présente des résultats plus intéressants que précédemment. En effet, les résultats montrent une différence variant entre

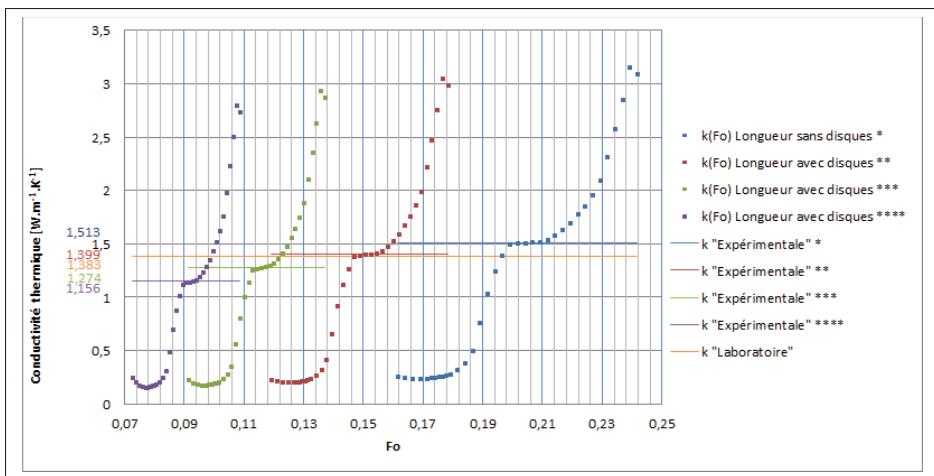


Figure 5.45 Évolution de la conductivité évaluée de façon in situ en fonction du nombre de Fourier ~ Avec rondelles de plastique souple ~ TestN°8 / Forage N°3

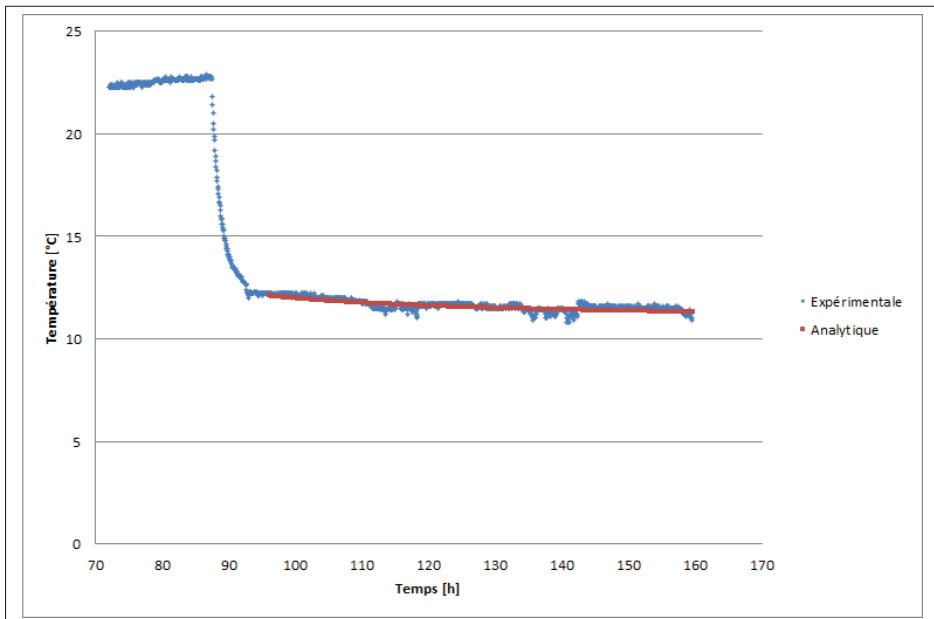


Figure 5.46 Évolution de la restitution de la température en fonction du temps ~ Avec rondelles de plastique souple ~ TestN°8 / Forage N°3

1.2% et 16.4% de la conductivité thermique évaluée de façon in situ et celle déterminée en laboratoire. Les meilleures résultats des précédentes analyses présentaient une différence d'au moins 30%. Le tableau 5.12 présente les résultats pour les différentes longueurs de sections

chauffantes considérées, de 1,22m à 1.82m. On remarque que lorsque nous considérons 1.44m de longueur chauffante, la différence entre la valeur In-situ et celle déterminée en laboratoire n'est que de 1.2%. C'est un excellent résultat au vu des précédents. L'analyse de l'évolution de la température le long du câble chauffant nous permettra de déterminer quelle longueur de câble chauffant utiliser lors de l'analyse.

Tableau 5.12 Tableau récapitulatif des données issues du Test N°8

	Forage N°3			
Géométrie du tube	1,25po (SDR-10)			
Profondeur et position du câble chauffant [m]	3.6m			
Capacité thermique volumique (<i>Laboratoire</i>) [$MJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$]	2.246			
Conductivité thermique (<i>Laboratoire</i>) [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]	1.383			
Longueur des sections chauffantes [m]	1.22	1.42	1.62	1.82
Température initiale (<i>Expérimentale</i>) [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]	10.10	10.97	10.93	10.90
Conductivité thermique (<i>In-situ</i>) [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]	1.513	1.399	1.274	1.156
Différence entre la valeur <i>In-situ</i> / <i>Laboratoire</i>	9.4%	1.2%	-7.9%	-16.4%

5.2.6.2 Analyse de l'évolution de la température le long du câble chauffant

Comme indiqué précédemment, à la section 5.2.2.2, nous pouvons choisir d'insérer ou pas les disques chauffants à la longueur chauffante. Pour savoir si les mouvements de convection se propagent au-delà des disques, nous avons placé des capteurs de température entre chacun d'eux, afin de déterminer l'influence de celle-ci sur la propagation de la chaleur. La Figure 5.47 présente l'évolution de la température le long du câble chauffant, ainsi qu'une représentation de la position du câble chauffant en fonction de la profondeur. Lors de ce test, nous avons muni le câble chauffant de quatre disques de plastique souple sur la partie supérieure et de

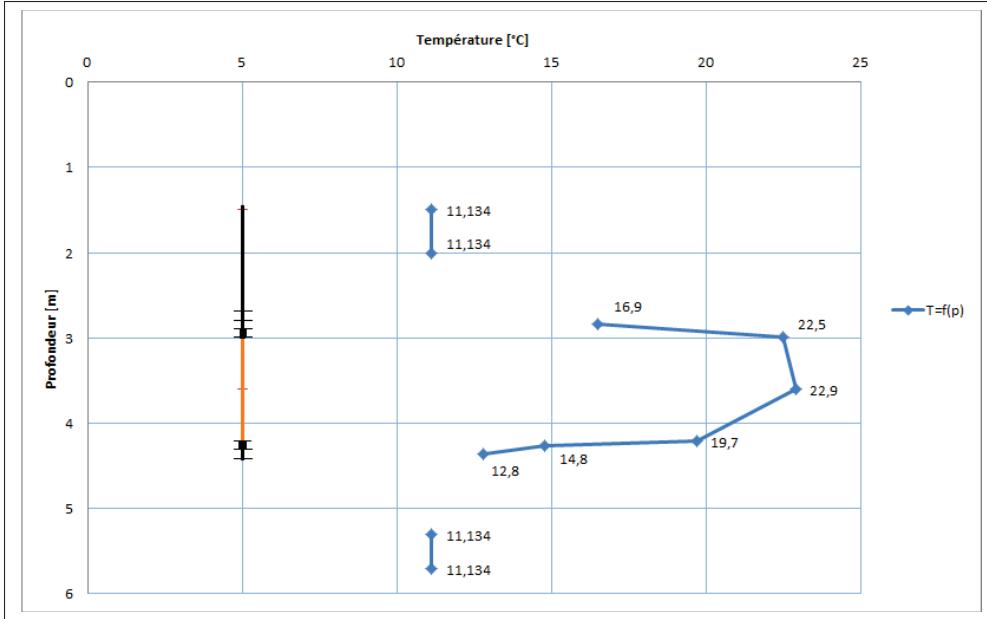


Figure 5.47 Évolution de la température le long du câble chauffant en fonction de la profondeur ~ Prise de données à la fin d'injection ~ Avec rondelles de plastique souple ~ TestN°8 / Forage N°3

trois disques de plastique souple sur la partie inférieure. Le détails de la position des disques flexibles est présentés à la Figure 5.48. Nous avons disposé six capteurs de température le long du câble chauffant. Un capteur de température au milieu du câble chauffant et deux autres à chaque extrémité. Ensuite un capteur de température au milieu du 1^{er} et 2^{ième} disques et un capteur de température au milieu du 2^{ième} et 3^{ième} disque de la partie inférieure du câble. Et enfin, un capteur de température au milieu du 2^{ième} et 3^{ième} disque de la partie supérieure du câble. Les températures indiquées sur la Figure 5.47 sont les valeurs maximales enregistrées à la fin de la période d'injection de chaleur. Le milieu du câble se trouvant à 3.6m, nous remarquons que la chaleur se propage à travers les disques de plastique souple pour se rapprocher de la température initiale qui est de 11.134°C. Une température maximale de 14.8°C a été enregistrée au milieu du 1^{er} et 2^{ième} disques de la partie inférieure. La différence avec la température initiale enregistrée est de 3.7°C et cette différence possiblement caractéristique d'un transfert de chaleur vertical par conduction. Ensuite, la température maximale enregistrée au milieu du 2^{ième} et 3^{ième} disque de la partie supérieure du câble est de 16.5 °C. La différence avec la tem-

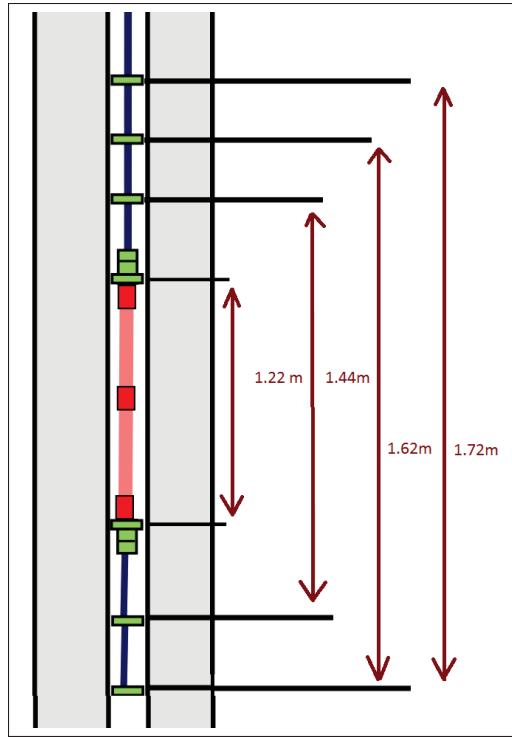


Figure 5.48 Détails des positions des disques de plastique souple (4 disques à chaque extrémité)

pérature initiale enregistrée est de 5.4°C . Cette différence de température n'est pas négligeable, il y a bel et bien transfert de chaleur convectif entre les premiers disques de plastique souple. Une température maximale de 12.8°C a été enregistrée au milieu du $2^{i\text{ème}}$ et $3^{i\text{ème}}$ disques de la partie inférieure. La différence avec la température initiale enregistrée est de 1.7°C . Cette différence de température est négligeable et il apparaît préférable de ne pas considérer cette portion du câble dans le calcul de la longueur chauffante spécifié lors de l'analyse des tests avec la solution analytique. La Figure 5.49 représente l'évolution de la température au milieu du $2^{i\text{ème}}$ et $3^{i\text{ème}}$ disque de la partie supérieure du câble. Cette évolution suggère que, sur toute la durée du test, il y a échange de chaleur conductif au niveau de cette portion du câble. De cette analyse, nous pouvons déduire qu'il y a transfert de chaleur convectif entre chaque disque de plastique souple, mais qu'il s'atténue rapidement jusqu'à devenir négligeable. Cette analyse nous permet de déterminer également quelle est la longueur active de câble qui participe à l'échange de chaleur. D'après nos résultats, il serait bon de considérer, en plus de la longueur



Figure 5.49 Évolution de la température du capteur N°6 en fonction du temps ~ Avec rondelles de plastique souple ~ TestN°8 / Forage N°3

de câble chauffant (1.22m), la longueur comprise entre le 1^{er} et le 3^{ième} disque de la partie supérieure du câble (20cm), car une différence de température de 5.4 °C ne peut être négligée face à une analyse dont la solution suppose un transfert de chaleur par conduction seulement. La longueur de câble chauffant a considéré lors de nos analyses serait donc de 1.42m.

Nous allons déterminer le nombre de Rayleigh, afin de déterminer lequels des transferts de chaleur est prédominant entre le transfert de chaleur conductif et le transfert de chaleur convectif.

$$Ra = \frac{\kappa g h^3 \Delta T}{\nu \alpha} \quad (5.1)$$

où

- κ est le coefficient d'expansion thermique, en $[K^{-1}]$;
- g est la force de gravité, en $[m \cdot s^{-2}]$;
- h est la hauteur de la colonne d'eau, en $[m]$;
- ΔT est la différence de température entre chaque extrémité de la colonne d'eau considérée, en $[^{\circ}C]$;
- ν est la viscosité cinématique de l'eau, en $[m^2 \cdot s^{-1}]$;
- α est la diffusivité thermique du matériau, en $[m^2 \cdot s^{-1}]$.

Pour l'étude de la convection dans une conduite cylindrique, le nombre de Rayleigh critique dépend principalement du ratio entre le rayon du cylindre et sa hauteur ($\delta = r/h$). Nous déterminerons les caractéristiques de l'eau à une température de $25^{\circ}C$ et nous baserons notre étude sur les valeurs présentées à la Figure 5.47. Ce critère a déjà été déterminé préalablement, pour l'étude de la convection sur une paroi verticale par Love, A.J., C.T. Simmons et D.A. Nield (2007) et est exprimé à l'aide de l'équation suivante :

$$Ra_c = \frac{215.6}{\delta^4} (1 + 3.84\delta^2) \quad (5.2)$$

Dans notre étude, nous allons considérer la conduite du milieu du câble chauffant au milieu du 3^{ième} et 4^{ième} disque de la partie supérieure du câble. La hauteur de notre colonne d'eau sera donc égale à $h = 0.86m$ et le rayon de celle-ci à $r = 0.03175m$.

D'où :

$$\delta = \frac{r}{h}$$

$$\delta = \frac{0.03175}{0.86} \quad (5.3)$$

$$\delta = 0.03692$$

Donc :

$$\begin{aligned}
 Ra_c &= \frac{215.6}{\delta^4} (1 + 3.84\delta^2) \\
 Ra_c &= \frac{215.6}{0.03692^4} (1 + 3.84 \cdot 0.03692^2) \\
 Ra_c &= 1.17 \cdot 10^8
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

et

$$\begin{aligned}
 Ra &= \frac{\kappa g h^3 \Delta T}{\nu \alpha} \\
 Ra &= \frac{0.257 \cdot 10^{-3} \cdot 9.80665 \cdot 0.86^3 (22.9 - 16.9)}{1.004 \cdot 10^{-6} \cdot 0.143 \cdot 10^{-6}} \\
 Ra &= 6.7 \cdot 10^{10}
 \end{aligned} \tag{5.5}$$

Du milieu du câble chauffant au milieu du $3^{i\text{ème}}$ et $4^{i\text{ème}}$ disque de la partie supérieure du câble, le nombre de Rayleigh est égal à $6.7 \cdot 10^{10}$, alors que sa valeur critique est de $1.17 \cdot 10^8$. Celà nous indique qu'il y a transfert de chaleur par convection du milieu du câble chauffant et au delà des disques de plastique souple. De considérer une longueur de câble chauffant supérieure à celle de la longueur stricte de celui-ci est donc justifié. Nous avons également étudié l'évolution du nombre de Rayleigh entre chaque disque, afin de déterminé l'impact des disques sur l'évolution de la convection. Les résultats ne sont pas présenté dans ce mémoire, mais le transfert de chaleur par convection continue bel et bien entre chaque disque, et même au delà du dernier disque.

5.3 Conclusion

Les premiers tests de réponse thermique nous permettent de mettre en évidence l'influence des disques de plastique souple sur les résultats. Ils améliorent les résultats au minimum d'une

dizaine de pour cent. Les premiers tests peuvent également nous servir à déterminer la géométrie des tubes qui pourraient influencer les résultats. En effet, le diamètre des tubes varie entre chaque forage. Il est difficile, au vu des résultats d'analyse, de déterminer si la géométrie influence les résultats. Le forage N°1 possède le tube le plus gros (*4po*), les résultats d'analyse auraient pu montrer une erreur plus importante due au volume d'eau plus important à chauffer et donc une différence de température entre la paroi du tube et le coulis plus faible. Mais les résultats ne corrélatent que sur deux analyses sur quatre. Le phénomène ne se répète pas sur l'ensemble des tests. Il est donc difficile de conclure que la géométrie impacte la qualité des résultats. La différence qui réside entre le dernier test et les autres est le nombre de disques présents sur le câble chauffant. Le câble chauffant est muni de quatre disques espacés de *10 cm* sur la partie supérieure et de trois disques espacés de *10 cm* également sur la partie inférieure. La procédure de test est restée la même, mis à part le fait que la température initiale a été déterminé avant le l'injection de chaleur sur une période de 24h. L'analyse de l'évolution de la température entre chaque disque de plastique souple, nous a permis de déterminé qu'il était bon d'inclure dans l'analyse, l'espace entre le disque de plastique souple supérieure du câble chauffant et le troisième disque de plastique souple supérieure dans la longueur chauffante, car le volume les séparant participe également à l'échange de chaleur par convection.

L'influence de l'augmentation des disques de plastique souple sur le câble chauffant et de la longueur chauffante lors de l'analyse est remarquable, au vu des résultats. En effet, la différence entre la conductivité thermique évaluée de façon *in situ* et celle déterminée en laboratoire est de 1.2%. Le nombre de disques de plastique souple joue un rôle très important dans le confinement de l'effet de convection et le fait d'avoir placé des thermocouples entre chacun d'entre eux, nous a permis de déterminé le déplacement du flux de chaleur (logiquement vers le haut du câble) et de montrer également que la longueur chauffante que l'on utilise lors de l'analyse ne se limite pas à la longueur du câble chauffant.

CHAPITRE 6

INFLUENCE DES ERREURS LORS DES ESSAIS

6.1 Introduction

Dans cette section, la démarche est de fournir, autour du résultat du calcul de la conductivité thermique, l'incertitude liée au calcul de celle-ci. Cette incertitude une fois évaluée, nous indiquera le degré de confiance que l'on peut avoir en nos résultats. L'incertitude dépend de plusieurs facteurs, comme l'exactitude des appareils de mesure, les conditions dans lesquelles se prend la mesure, etc. Dans ce chapitre, toute la chaîne de mesure sera analysée afin d'avoir l'incertitude sur la mesure la plus faible possible.

6.2 Analyse de l'efficacité des Power Switching Supply

L'efficacité de chaque PSS a été réalisée à l'aide de cinq tests. À chaque test, la mesure de la tension et de l'intensité en amont et en aval du PSS est faite, afin d'en calculer la puissance et l'efficacité. Le détail de chacune des mesures est donné dans les tableaux 6.1, 6.2 et 6.3. L'efficacité d'un PSS est donc égale à :

$$E_{PSS} = \frac{P_{Aval}}{P_{amont}} \quad (6.1)$$

Ensuite, la moyenne des efficacités est faite, afin d'en déterminer l'efficacité de chaque PSS, comme le montre les tableaux 6.1, 6.2 et 6.3. Pour enfin, calculer la moyenne de chaque efficacité et déterminer l'efficacité globale des PSS qui est égales à :

$$\begin{aligned} E_{PSS_{Globale}} &= \frac{E_{PSS_{Ligne1}} + E_{PSS_{Ligne2}} + E_{PSS_{Ligne3}}}{3} \\ E_{PSS_{Globale}} &= \frac{0.814 + 0.816 + 0.816}{3} = 0.81 \end{aligned} \quad (6.2)$$

Cette efficacité sera intégrée aux calculs du taux d'injection de chaleur dissipé par le câble chauffant.

Tableau 6.1 Test de l'efficacité du PSS de la Ligne 1

Tableau 6.2 Test de l'efficacité du PSS de la Ligne 2

Tableau 6.3 Test de l'efficacité du PSS de la Ligne 3

6.3 Calibration des capteurs de température

La procédure de calibration est nécessaire avant la mise en place des capteurs de température le long des câbles chauffants. Pour réaliser cette procédure, nous avons utilisé un thermocouple haute précision ainsi qu'un système d'acquisition GraphTech GL220. La procédure est la suivante, nous allons tester les thermocouples dans un bain à une température de 6°C , 22°C et 45°C successivement. À chaque plage de température, nous prenons quatre points de mesure. Le tableau suivant est obtenu :

Tableau 6.4 Tableau récapitulatif des points de mesure.

THP	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
22.09	21.7	21.7	21.8	21.6	21.8	21.8	21.8	21.8	21.6
22.15	21.7	21.7	21.8	21.8	21.7	21.7	21.8	21.8	21.7
22.08	21.8	21.7	21.9	22	21.8	21.8	21.8	21.8	21.8
22.06	21.6	21.6	21.8	21.8	21.8	21.8	21.8	21.8	21.7
6.11	6.2	6	5.9	6.1	6.1	5.8	6.2	6.1	6.6
5.82	6.3	5.8	5.8	5.3	5.8	4.7	5.6	5.7	6.5
5.77	5.8	5.7	5.6	5.7	5.6	5.6	5.6	5.6	5.5
5.75	5.8	5.8	5.8	5.7	5.6	5.5	5.3	5.5	5.8
46.64	46.6	46.6	46.6	46.5	46.4	46.4	46.3	46.5	46.1
46.32	46.1	46.1	46.1	46.2	46	46.1	45.9	46.1	45.7
45.78	45.5	45.5	45.6	45.7	45.5	45.5	45.3	45.4	44.9
45.08	44.6	44.6	44.8	44.9	44.7	44.8	44.7	44.7	44.2

6.3.1 Détermination de l'incertitude d'étalonnage

L'écart type de la série :

$$u_a = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (6.3)$$

Le Tableau 6.5 présente les écarts absolus entre la température mesurée et la température de référence obtenue à l'aide du thermomètre haute exactitude. De ces écarts est calculé, l'écart

Tableau 6.5 Tableau récapitulatif des écarts absolus et des écarts types.

THP	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
22.09	-0.39	-0.39	-0.29	-0.49	-0.29	-0.29	-0.29	-0.29	-0.49
22.15	-0.45	-0.45	-0.35	-0.35	-0.45	-0.45	-0.35	-0.35	-0.45
22.08	-0.28	-0.38	-0.18	-0.08	-0.28	-0.28	-0.28	-0.28	-0.28
22.06	-0.46	-0.46	-0.26	-0.26	-0.26	-0.26	-0.26	-0.26	-0.36
	0.083	0.041	0.071	0.172	0.088	0.088	0.039	0.039	0.094
6.11	+0.09	+0.11	-0.21	-0.01	-0.01	-0.31	+0.9	-0.01	+0.59
5.82	+0.48	-0.02	-0.02	-0.52	-0.02	-1.12	-0.22	-0.12	-0.68
5.77	+0.03	+0.07	-0.17	+0.07	-0.17	-0.17	-0.17	-0.17	-0.27
5.75	+0.05	+0.05	+0.05	-0.05	-0.15	-0.25	-0.45	-0.25	+0.05
	0.213	0.054	0.123	0.266	0.084	0.442	0.602	0.100	0.536
46.64	-0.04	-0.04	-0.04	-0.14	-0.24	-0.24	-0.34	-0.14	-0.54
46.32	-0.22	-0.22	-0.22	-0.12	-0.32	-0.22	-0.42	-0.22	-0.62
45.78	-0.28	-0.28	-0.18	-0.08	-0.28	-0.28	-0.48	-0.38	-0.88
45.08	-0.48	-0.48	-0.28	-0.18	-0.38	-0.28	-0.38	-0.38	-0.88
	0.181	0.181	0.102	0.042	0.060	0.030	0.060	0.120	0.176
	0.159	0.092	0.099	0.160	0.077	0.187	0.234	0.086	0.269

type de la série des quatre mesures, à l'aide de l'équation 6.3. L'opération a été renouvelée pour chacun des 9 capteurs et des trois paliers de mesure. Ensuite, la moyenne des écarts types a été faite pour avoir l'écart type moyen de chaque capteur. Le résultat final est indiqué à la dernière ligne du Tableau 6.5. Les thermocouples installés sont des thermocouples de surface de type K fabriqué selon la norme (IEC 584-1) leurs degrés de précision dans un intervalle de température -40 à -375 °C est de $+/- 1.5$ °C. Selon la procédure d'étalonnage, dans un intervalle de température de 5 à 50 °C, chacun des capteurs offrirait un degré de précision variant entre 0.086 °C et 0.269 °C.

6.4 Mesure de puissance

La mesure de puissance est faite à l'aide d'un Watts Up Pro ES avec une exactitude relative de $+/- 1.5\% + 3$ pour des mesures de puissances au-dessus de 60W. En dessous de cette valeur, le constructeur nous indique que les facteurs d'exactitudes de la mesure de puissance et

d'intensité se dégradent, mais que l'exactitude de la mesure de puissance est inférieure à 0.5W (Par exemple, pour 30.53W de charge, la mesure est exacte à $+/- 1.6\%$).

6.5 Mesure de l'efficacité E_{PSS}

Le calcul de l'efficacité a été fait précédemment à la section 6.2. Le résultat de l'efficacité globale a été donné avec deux chiffres après la virgule, alors qu'il est possible d'avoir une meilleure exactitude de l'ordre de trois chiffres après la virgule. L'erreur sur l'efficacité est donc de $+/- 1.2\%$.

6.6 Mesure du temps

Le système d'acquisition de données utilisé est le même que pour la mesure de température. C'est un Graphtec GL220 de la compagnie DATAQ Instruments. L'erreur sur le temps des enregistreurs de données est normalement petite, particulièrement en ce qui concerne la période de mesure. L'exactitude de l'horloge est de $+/- 0.002\%$. C'est trop faible pour être pris en considération.

6.7 Mesure de la longueur des puits

La profondeur active réelle de l'échangeur de chaleur géothermique a été mesurée avant son insertion dans le forage. L'ensemble des mesures sont répertoriées en Annexe I, aux Figures I-1, I-1 et I-1. La mesure a été réalisée à l'aide d'une bande à mesurer d'une précision du millimètre, cependant le calibrage de la mesure de bande n'a pas été réalisé. Une erreur sur la mesure de $+/- 0.8\%$ est raisonnable. En revanche, quand un forage n'est pas correctement remblayé, la longueur active peut changer pendant l'essai et créer d'autres perturbations. Par la suite, le remblai sera considéré parfaitement réalisé.

6.8 Mesure de la longueur du câble chauffant

La longueur de câble chauffant présent sur chaque ligne a été mesurée avant son insertion dans l'échangeur géothermique par un ruban à mesuré d'une précision du millimètre. Comme précédemment, le ruban n'a pas été calibré avant la mesure. Une erreur sur la mesure de $+/- 0.8\%$ est raisonnable.

6.9 Mesure de la capacité thermique du sol (C)

La capacité thermique du sous-sol est estimée à partir des essais en laboratoire. Il n'est pas facile de définir une évaluation de la gamme d'erreurs de ce paramètre. Les capacités thermiques du sol étudié varient de $1.306 \text{ à } 2.860 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$. Considérant des valeurs variant entre 0.002 et $0.02 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$, c'est à dire une erreur variant de $+/- 0.15\%$ à $+/- 1.5\%$. Tenir compte d'une erreur de $+/- 1.5\%$ semble raisonnablement conservateur dans un cas où les mesures sont réalisés en laboratoire. Dans un cas réel, il n'y aurait pas de mesure en laboratoire, la capacité thermique des matériaux serait estimée selon le type de matériaux géologiques. L'incertitude sur la mesure serait bien plus importante lorsque celle-ci est estimée selon le type de matériaux, selon Waples, D., J. Waples (2004), une incertitude de 10 à 15% doit être considérée. Nous allons donc considérer une incertitude de 15% sur la capacité thermique dans nos calculs.

6.10 Combinaison des erreurs sur le résultat final

Dans cette section, l'exactitude du calcul de conductivité thermique sera évaluée afin de déterminer le degré de confiance quant à la qualité des résultats obtenus par calcul.

6.10.1 Combinaison des erreurs sur le calcul du taux d'injection de chaleur

Le flux de chaleur dissipé par le câble chauffant est calculé par :

Tableau 6.6 Tableau récapitulatif pour le calcul d'erreur

Paramètre	Erreur		Valeur de référence
	Absolute	relative	
q_m	+/- 1.6	+/- 5.2%	30.52
H	+/- 0.01	+/- 0.8%	1.22
$E_{PSS_{Globale}}$	+/- 0.1	+/- 12.3%	0.81

$$q_d = \frac{q_m \cdot E_{PSS_{Globale}}}{L_c} \quad (6.4)$$

où

q_d est le taux d'injection de chaleur dissipé par le câble chauffant, en $[W \cdot m^{-1}]$;

q_m est la moyenne de la puissance dissipée mesurée, en $[W]$;

$E_{PSS_{Globale}}$ est l'efficacité de chaque PSS, en $[-]$;

L_c est la longueur du câble chauffant, en $[m]$.

L'erreur composée du taux d'injection de chaleur est indiquée par :

$$\frac{\delta q_d}{q_d} = \sqrt{\left(\frac{\delta q_m}{q_m}\right)^2 + \left(\frac{\delta L_c}{L_c}\right)^2} \quad (6.5)$$

En utilisant la gamme d'erreurs et les valeurs de référence dans le tableau, avec un taux d'injection de chaleur de référence de $25W/m$, nous obtenons :

$$\delta q_d = 25 \cdot \sqrt{\left(\frac{1.6}{30.52}\right)^2 + \left(\frac{0.01}{1.22}\right)^2 + \left(\frac{0.1}{0.81}\right)^2} = 25 \cdot 0.13 = 3.36 W \cdot m^{-1} \quad (6.6)$$

Avec un taux d'injection de chaleur de $25 W \cdot m^{-1}$, l'erreur est de $+/- 3.36 W \cdot m^{-1}$ ou 13 %. Pour calculer l'erreur finale, nous avons besoin du coefficient de pente m de l'équation de régression. L'erreur du coefficient de régression ne peut pas être connue à l'avance étant donné

qu'elle dépend de l'évolution de la température durant l'expérience. L'exactitude du coefficient de pente m peut être exprimée par l'écart type.

6.10.2 Combinaison des erreurs sur le calcul de la conductivité thermique

Après avoir défini les erreurs de mesure et des erreurs dans d'autres paramètres, l'erreur du résultat final (évaluation de la conductivité thermique) dépend de la façon dont toutes les erreurs sont combinées à l'erreur finale de l'évaluation. La propagation d'erreur est calculée utilisant la règle standard de combinaison des erreurs. Les calculs d'exemple emploient les valeurs de référence données dans le Tableau 6.6 et des valeurs extraites à l'aide du programme python. L'évaluation de la conductivité thermique k est obtenue par :

$$\Delta T = \frac{q'}{k} f(Fo) \quad (6.7)$$

$$\frac{\Delta T}{q'} = \frac{f(Fo)}{k}$$

$$\frac{q'}{k} = \frac{\Delta T}{f(Fo)} = Z = 9.27 \quad (6.8)$$

donc

$$k = \frac{q'}{Z} \quad (6.9)$$

d'où

$$\frac{\delta k}{k} = \sqrt{\frac{\delta q'}{q'} + \frac{\delta Z}{Z}} \quad (6.10)$$

AVEC :

$$\delta Z = 1.96 S_z = 0.984 \quad (6.11)$$

$$S_z = \sqrt{\frac{\sigma^2}{S_{xx}}} = 0.502 \quad (6.12)$$

avec

$$\sigma^2 = \frac{\Sigma(\Delta T_m - \Delta T_c)^2}{n-2} = 0.031 \quad (6.13)$$

et

$$S_{xx} = \Sigma(f - \bar{f})^2 = 0.123 \quad (6.14)$$

enfin

$$\delta k = 0.35 \quad (6.15)$$

et donc l'erreur composée peut être approximée par :

$$\frac{\delta k}{k} = \sqrt{\frac{\delta q'}{q'} + \frac{\delta Z}{Z}} \quad (6.16)$$

Prenons comme valeur de conductivité thermique de référence de $1.399 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ issue du dernier test. Donc, l'erreur sur le calcul de la conductivité thermique est de :

$$\delta k = 1.399 \cdot \sqrt{\frac{3.36}{25} + \frac{0.984}{9.27}} = 0.35 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6.17)$$

D'après nos calculs, l'erreur sur le calcul de la conductivité thermique avec une conductivité thermique égale à $1.399 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ est de $+/- 0.35 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ou 25%.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Ce mémoire répond à trois principaux objectifs. le premier est de savoir si les tests de réponse thermique multi niveaux permettent d'optimiser la longueur de puit des systèmes géothermiques. Il propose ensuite, de déterminer si les tests de réponse thermique multi niveaux avec câbles chauffants permettent d'avoir des résultats exacts sur la mesure de la conductivité thermique. Et, en dernier lieu, de déterminer le moyen de quantifier l'influence de la convection autour des câbles chauffants sur la mesure de température.

Principalement utilisés dans le domaine de la géothermie, les tests de réponse thermique permettent de déterminer la conductivité thermique des sols nécessaire au dimensionnement des systèmes géothermiques. Parmis les différents tests utilisés pour réaliser cette mesure, nous nous sommes intéressé plus particulièrement au tests de réponse thermique multi niveau, à savoir, s'il permet d'optimiser la longueur de puit géothermique. Cette étude reposant sur 5 cas de terrain, nous montre qu'il est difficile de tirer des conclusions. En effet, tous les résultats montrent que la longueur de forage a été optimisée (de 0.1% à 2.3%) en dépit de l'investissement nécessaire pour y arriver. Alors que l'avantage de la méthode TRT multi-niveau est justement au niveau de la réduction des coûts. En effet, le matériel exigé pour réaliser les TRT avec câble chauffant est moins énergivore et coûteux en termes de main d'oeuvre, que celui utilisé pour réaliser les tests conventionnels.

Parmis les tests de réponse thermique multi niveau, la méthode étudiées repose sur l'utilisation du câble chauffant pour injecter de la chaleur le long de l'échangeur géothermique, tout en enregistrant l'évolution de la température. Cette évolution sera analysée par la suite durant la période de restitution afin d'évaluer la conductivité thermique du sous-sol. Chacun des tests de réponses thermiques avait pour objectif de retrouver les conductivités thermiques déterminées en laboratoire. Une série de tests a été réalisée afin de déterminer l'influence des disques de plastique souple sur les résultats. Les données ont été analysées avec le modèle de la ligne

source couplé au principe de superposition des courbes durant la période de restitution thermique pour les méthodes analytiques. Cette série de tests comprend des tests sans disques de plastique souple et avec disques de plastique souple, afin de déterminer l'influence de leur présence. Les disques de plastique souple permettent d'améliorer au minimum de 10% l'exactitude des résultats issus de l'analyse. Dans l'analyse, nous avons également montré que les résultats étaient plus près des valeurs mesurées en laboratoire en augmentant la longueur active de chauffage dans le modèle mathématique utilisé pour l'analyse, sans pour autant prouver que la longueur active de chauffage est belle et bien supérieure à la longueur stricte du câble chauffant.

Enfin, un dernier test a été réalisé avec les nouveaux éléments d'analyse. Le nombre de disques de plastique souple sur la longueur chauffante a été augmenté afin d'améliorer le blocage du phénomène de convection. Une analyse des températures a permis de conclure qu'il ne fallait pas se limiter à la longueur de câble chauffant dans l'analyse, car le volume compris entre le disque de plastique souple supérieur et le troisième intervient également dans l'échange de chaleur. Nous avons également validé cette hypothèse en montrant qu'il s'agissait bien d'un transfert de chaleur par convection à l'intérieur du puit en calculant le nombre de rayleigh.

Si l'on considère, dans l'analyse des nouveaux résultats, la longueur active de câble chauffant incluant les deux disques supérieurs ($1.42m$), la différence entre la conductivité thermique évaluée de façon *in situ* et celle déterminée en laboratoire n'est plus que de 1.2%.

La contribution majeure de ce mémoire repose sur la caractérisation et l'impact du transfert de chaleur par convection sur la mesure de la conductivité thermique du sous-sol à l'aide de câbles chauffants.

En recommandation, il serait souhaitable de continuer les essais notamment pour des puits plus profond, en utilisant des disques de plastique souple de meilleur qualité. Une amélioration de

l'instrumentation, notamment des capteurs de température, améliorerait la qualité des résultats. Pour l'étude du transfert de chaleur entre chaque disque de plastique souple une augmentation du nombre de capteur de température le long de la section chauffante et entre les disques de plastique souple, nous permettrait de déterminer le nombre de disque idéal afin de minimiser le transfert de chaleur par convection.

En définitive, l'étude présentée dans ce mémoire permet de faire avancer les connaissances au niveau de l'utilisation des tests de réponse thermique multi niveau avec câbles chauffants.

ANNEXE I

RAPPORT DES FORAGES

Qualitas

RAPPORT DE FORAGE

Page 1 de 1

FORAGE : F-1

CLIENT : École de technologie supérieure
PROJET : Installation de 3 tubes d'observation pour des essais de conductivité thermique.
ENDROIT : 1100, rue Notre-Dame Ouest
DOSSIER : 629117

DATE : 2015-05-22 et 2015-05-25

PROFONDEUR (m)	NIVEAU (m) ARBITRAIRE	DESCRIPTION	NIVEAU D'EAU	ÉCHANTILLONS		ESSAIS IN SITU ET EN LABORATOIRE									
				TYPE ET NUMÉRO	ÉTAT	RÉCUPÉRATION (%)	TENEUR EN EAU ET LIMITES D'ATTERBERG (%)				AUTRES ESSAIS	TESTS			
							W _p	W	W _L	N ou RQD (%)		20	40	60	80
	99,95														
		Forage sans échantillonnage des sols.													
1															
2															
3															
4															
5	94,92	Till grossier : sable et silt, un peu de gravier.		CF-1			63	64							
5,64	94,31	Compacité très dense.		CF-2			67	49							
6		Till fin : silt et sable fin uniforme.		CF-3			38	65							
7		Compacité très dense.		CF-4			42	77							
8	91,87	Forage sans échantillonnage des sols.		CF-5			63	46							
9															
10															
11	89,74	Fin du forage													
REMARQUES : Installation d'un tube HDPE DR-11 de 4 po de diamètre.															
MÉTHODE DE FORAGE : Rotation de tubes de calibre SW.															

Figure-A I-1 Rapport du forage N°1.

RAPPORT DE FORAGE

Page 1 de 1

Qualitas

FORAGE : F-2

DATE : 2015-05-25

CLIENT : École de technologie supérieure
PROJET : Installation de 3 tubes d'observation pour des essais de conductivité thermique.
ENDROIT : 1100, rue Notre-Dame Ouest
DOSSIER : 629117

PROFONDEUR (m)	NIVEAU (m) ARBITRAIRE	DESCRIPTION	NIVEAU D'EAU	ÉCHANTILLONS			ESSAIS IN SITU ET EN LABORATOIRE													
				TYPE ET NUMÉRO	ÉTAT	RÉCUPÉRATION (%)	TENEUR EN EAU ET LIMITES D'ATTERBERG (%)				AUTRES ESSAIS	Δs_u (kPa) ∇s_{ul} (kPa)								
							W _D	W	W _L	N cu ROD (%)		20	40	60	80	Δs_r (kPa) ∇s_{rl} (kPa)	20	40	60	80
	90,83	Forage sans échantillonage des sols.																		
3,51	96,32	Argile silteuse.																		
3,81	96,02	Till grossier : sable et gravier, un peu de silt, traces d'argile. Compacité très dense.																		
5,04	93,89	Till fin : silt et sable fin uniforme. Compacité dense.																		
6,55	93,28	Forage sans échantillonage des sols.																		
10,21	80,62	Fin du forage																		
REMARQUES : Installation d'un tube HDPE DR-11 de 2 po de diamètre.																				
MÉTHODE DE FORAGE : Rotation simultanée de tubes de calibre HW et d'un carotter HQ ou d'un trépan à molettes.																				

Figure-A I-2 Rapport du forage N°2.



RAPPORT DE FORAGE

Page 1 de 1

PROFONDEUR (m)	NIVEAU (m) ARBITRAIRE	DESCRIPTION	NIVEAU D'EAU	ÉCHANTILLONS			ESSAIS IN SITU ET EN LABORATOIRE				AUTRES ESSAIS	
				TYPE ET NUMÉRO	ÉTAT	RÉCUPÉRATION (%)	TENEUR EN EAU ET LIMITES D'ATTERBERG (%)		W _D	W _L		
							N ou RQD (%)	W _P	W	W _C		
99,80							20 40 60 80					20 40 60 80
1		Forage sans échantillonnage des sols.										
3,51	96,20	Argile silteuse.										
3,86	95,94	Till grossier : sable et gravier, un peu de silt, traces d'argile. Compacité à moyenne.		CF-1	✗	79	7					
4,72	95,08	Till fin : silt et sable fin uniforme. Présence d'odeurs d'hydrocarbures entre les profondeurs de 4,72 et 5,33 m. Compacité très dense.		CF-2	✗	63	25					
6,55	93,25	Forage sans échantillonnage des sols.		CF-3	✗	63	55					
10,11	89,80	Fin du forage		CF-4	✗	75	65					
11				CF-5	✗	83	37					
REMARQUES : Installation d'un tube HDPE DR-11 de 1,25 po de diamètre.												
MÉTHODE DE FORAGE : Rotation simultanée de tubes de calibre NW et d'un trépan à molettes.												

Figure-A I-3 Rapport du forage N°3.

ANNEXE II

PROGRAMME PYTHON : DIMENSIONNEMENT

```

#coding: latin-1
from geothermal_mod import *
from properties_mod import *
from numpy import *
from matplotlib.pyplot import *
# vecteurs d'heures
hrm = array([744,672,744,720,744,720,744,744,720,744,720,744])
hrr = array([ 744,1416,2160,2880,3624,4344,5088,5832,6552,7296,8016,8760])
#
# sol
#
als = 0.1448 # Diffusivité thermique [m2/jr].
alhr = als/24.0 # Diffusivité thermique [m2/hr].
ks = 3.52 # Conductivité thermique [W/m/K].
To = 12.80 # Température du sol non perturbée [°C].
#
# puits
#
rb = 0.15/2.0 # Rayon du puits [m].
Rpb = 0.0816 # Résistance thermique équivalente du puits [m.K/W].
#
# choix de configuration initiale
#
nx = 7 # Nombre de puits [-]
ny = 4 # Distance entre chaque puit [m]
nb = nx*ny
d = 6.1
#
# fluide
#
mp = 25.8 # Débit massique total de fluide
caloporteur [kg/s]
Cp = 3972.0
Tfo_ch = 0.0 # Température de sortie des puits en chauffage [°C]
Tfo_cl = 33.0 # Température de sortie des puits en climatisation [°C]
#
# COP de La pompe à chaleur
#
COP_ch = 3.3 # COP de La pompe à chaleur en chauffage
COP_cl = 4.9 # COP de La pompe à chaleur en climatisation
#
# charges
#
qh_ch = 292730.0 # Charge au sol Max en chauffage [W]
qm_ch = 76419.0 # Charge au sol mensuelle en chauffage [W]
qh_cl = -505713.0 # Charge au sol Max en climatisation
qa = -4634.0 # Déséquilibre thermique annuel du sol [W]
qm_cl = -100000.0 # Charge au sol mensuelle en climatisation [W]
#

```

```

# Début du design
#
# Calcul des Tf
#
Tfi_ch = Tfo_ch - qh_ch/(mp*Cp)
Tfi_cl = Tfo_cl - (-qh_cl)/(mp*Cp)
Tf_ch = (Tfi_ch+Tfo_ch)/2.0
Tf_cl = (Tfi_cl+Tfo_cl)/2.0
#
# temps
#
ta = 10.0*8760.0
tm = ta + 730.0
tf = tm + 6.0
Fof = alhr*tf/rb**2
Fo1 = alhr*(tf-ta)/rb**2
Fo2 = alhr*(tf-tm)/rb**2
#
# Début du design
#
# Calcul des Tf
#
Tfi_ch = Tfo_ch - qh_ch/(mp*Cp)
Tfi_cl = Tfo_cl - qh_cl/(mp*Cp)
Tf_ch = (Tfi_ch+Tfo_ch)/2.0
Tf_cl = (Tfi_cl+Tfo_cl)/2.0
#
# Calcul des résistances du sol
#
Gf = g_function(Fof)
G1 = g_function(Fo1)
G2 = g_function(Fo2)
Rsa = (Gf-G1)/ks
Rsm = (G1-G2)/ks
Rsh = (G2)/ks
#
# calcul de la Longeur Chauffage
#
# 1ere iteration
Tp = 0.0
ok = False
delta = 1.0
Li = 6000.0
compt = 1
compt_max = 20
while not ok :
    Lch1 = (qa*Rsa)/(To - Tf_ch - Tp)
    Lch2 = (qm_ch*Rsm)/(To - Tf_ch - Tp)
    Lch3 = (qh_ch*Rsh)/(To - Tf_ch - Tp)
    Lch4 = (qh_ch*Rpb)/(To - Tf_ch - Tp)
    L_ch = Lch1 + Lch2 + Lch3 + Lch4
    #
    # calcul de la Longeur Climatisation
    #
    Lcl1 = (qa*Rsa)/(To - Tf_cl - Tp)
    Lcl2 = (qm_cl*Rsm)/(To - Tf_cl - Tp)
    Lcl3 = (qh_cl*Rsh)/(To - Tf_cl - Tp)
    Lcl4 = (qh_cl*Rpb)/(To - Tf_cl - Tp)
    L_cl = Lcl1 + Lcl2 + Lcl3 + Lcl4
    L = max(L_ch,L_cl)
    print 'la longueur est '+ str(L) + ' m'

```

```

qpa = qa/L
H = L/nb
Tpn = Calcul_Tp_fls(nx,ny,d,qpa,als,ks,10)
if (abs(L-Li)) < delta:
    ok = True
else:
    Tp = Tpn
    Li = L
    compt = compt +1
    if compt > compt_max:
        print 'erreur'
        ok = True
Hi = H
dx = d/Hi
dy = d/Hi
#
# génération du champ de capteur rectangulaire 3x2 , configuration initiale
#
zt = zeros([nb,2])
k = 0
for i1 in range(0,nx):
    x = i1*dx
    for i2 in range(0,ny):
        y = i2*dy
        zt[k] = [x,y]
        k = k+1
ts = Hi**2/(9*rb**2)
rr = rb/Hi
ttf = Fof/ts
tt1 = Fo1/ts
tt2 = Fo2/ts
Gfn = calcul_fonction_g(zt,ttf,rr)      # SI on écrit pas D/H , la fonction prend 0.04
par défaut ( Comme Eskilson)
G1n = calcul_fonction_g(zt,tt1,rr)      # SI on écrit pas D/H , la fonction prend 0.04
par défaut ( Comme Eskilson)
G2n = calcul_fonction_g(zt,tt2,rr)      # SI on écrit pas D/H , la fonction prend 0.04
par défaut ( Comme Eskilson)
Rsan = (Gfn-G1n)/(2*pi*ks)
Rsmn = (G1n-G2n)/(2*pi*ks)
Rshn = (G2n)/(2*pi*ks)
# calcul de La Longeur Chauffage
# 1ere iteration
Tp = 0
Lch1 = (qa*Rsan)/(To - Tf_ch )
Lch2 = (qm_ch*Rsmn)/(To - Tf_ch)
Lch3 = (qh_ch*Rshn)/(To - Tf_ch)
Lch4 = (qh_ch*Rpb)/(To - Tf_ch)
L_ch = Lch1 + Lch2 + Lch3 + Lch4
# calcul de La Longeur Climatisation
Lcl1n = (qa*Rsan)/(To - Tf_cl )
Lcl2n = (qm_cl*Rsmn)/(To - Tf_cl )
Lcl3n = (qh_cl*Rshn)/(To - Tf_cl)
Lcl4n = (qh_cl*Rpb)/(To - Tf_cl)
L_cln = Lcl1n + Lcl2n + Lcl3n + Lcl4n
L = max(L_ch,L_cln)
print 'la longueur g-function est '+ str(L) + ' m'
qpa = qa/L
H = L/nb
print 'la longueur d''un puits est '+ str(H) + ' m'

```

ANNEXE III

PROGRAMME PYTHON : ANALYSE DES RÉSULTATS

```

#coding: latin-1
#
# exemple de la méthode de la ligne source pour évaluer La conductivité du sol
#
from geothermal_mod import *
from conversion_mod import *
import os , time
from numpy import *
from matplotlib.pyplot import *
from scipy.optimize import curve_fit
from scipy.integrate import quad
from scipy.special import erfc
from mmath_mod import *
from xlrd import *
from xlwt import *
#
# Données initiales du test
#
def g_cable_chauffant_poly(t):
    if t ==0:
        return 0.0
    x = log(t)
    p = [-0.000000006151469,-0.00000268105230,-0.00005129274945,-0.000056574151010, \
        -0.000397096670832,-0.001843569322403,-0.005654408320876,-0.010740810731966,- \
        0.008929315469961,0.010698156589633, \
        0.042711054432555,0.065449954503878,0.013409695030925,0.157394330223695, \
        4.527284689210551]
    y = polyval(p,x)
    y = max(0,y)
    return y
def g_cable_chauffant(r,t,h):
    def func(x):
        ar = sqrt((r**2+x**2)/(4*t))
        ai1 = sqrt((r**2+(h-x)**2)/(4*t))
        ai2 = sqrt((r**2+(h+x)**2)/(4*t))
        z1 = erfc(ar)/sqrt(x**2+r**2)
        z2 = erfc(ai1)/sqrt((h-x)**2+r**2)
        z3 = erfc(ai2)/sqrt((h+x)**2+r**2)
        z = z1+z2+z3;
        return z
    y2 = quad(func,-0.5,0.5)[0]/2.0
    return y2

def g_cable_chauffant_simp(r,t):
    def fund(x):
        ar = sqrt((r**2+x**2)/(4*t))
        z1 = erfc(ar)/sqrt(x**2+r**2)
        return z1
    y2 = quad(fund,-0.5,0.5)[0]/2.0
    return y2

qpm = loadtxt('Q_testN3_Ligne1.txt')
q = mean(qpm)*0.81          # multiplié par l'efficacité des power switching supply
CC = 2.246e6                 # valeur de la capacité thermique volumique
d1,d2 = calcul_sdr(4.0,11)   # choix des tuyaux SDR-11
rb = d1/2
gam = 0.5772157
H = 1.4                      # Longueur des sections chauffantes

```

```

Rb = 0.05                      # valeur initiale
qp = q/H                        # flux de chaleur par metre
t1 = 72.0                         # temps ou on arrete l'injection de chaleur
M = loadtxt('Temp_testN3_Ligne1.txt')
t = M[:,0]                         # temps en heures
ks1 = 2.0
als = ks1/CC                      # Hypothese sur la diffusivite en m2/s
alhr = als*3600                    # Hypothese sur la diffusivite en m2/hr
#
# Calcul de la temperature initiale
Tf1 = M[:,1]
Tf2 = M[:,3]
Tf3 = M[:,5]
Tini = array([13.756,14.5,14.5])
To = Tini[0]
Tf = Tf2
#
#
#
nt = len(t)
n_inj = sum(t < t1)              # nombre de points d'injection
n_res = nt - n_inj                # nombre de points d'injection
Tf_inj = Tf[0:n_inj]
Tf_res = Tf[n_inj:nt]
t_inj = t[0:n_inj]
t_res = t[n_inj:nt]

#
# écriture dans un fichier Excel
#
vecteur = array([0,1,2])
vecteur1 = array([1,2,3])
hyp = ones((9,1))
hyp[1,0]= CC
hyp[2,0]= ks1
hyp[3,0]= als
hyp[4,0]= alhr
hyp[5,0]= H
hyp[6,0]= To
hyp[7,0]= Rb
hyp[8,0]= ks1
classeur = Workbook()
ic = 0
feuille1 = classeur.add_sheet('Temp_testN1_Ligne1')
feuille2 = classeur.add_sheet('vraie valeur ')
for i in range(0,10):            # On agrandit la Largeur des colonnes
    col = feuille1.col(i)
    col.width = 512 * 25
style0 = easyxf('font :bold on')
style1 = easyxf("pattern: pattern solid, fore_color light_green; font: color black;
align: horiz center")
# debut de l'écriture
feuille1.write(ic,0,'Temperature initiale du sol [C]',style0)
feuille1.write(ic+2,0,To,style1)

ic = 4
feuille1.write(ic,0,'Hypotheses',style0)

feuille1.write(ic+1,0,'Valeur de la capacite thermique [J/m3.K]',style0)

```

```
feuille1.write(ic+1,1,'Hypothese sur la conductivite thermique [W/m.K]',style0)
feuille1.write(ic+1,2,'Hypothese sur la diffusivite en [m2/s]',style0)
feuille1.write(ic+1,3,'Hypothese sur la diffusivite en [m2/hr]',style0)
feuille1.write(ic+1,4,'Longueur des sections chauffantes [m]',style0)
feuille1.write(ic+3,0,'Resistance thermique calculee [K/W]',style0)
feuille1.write(ic+3,1,'Conductivite thermique calculee [W/m.K]',style0)

feuille1.write(ic+6,0,'Temperature mesuree [C]',style0)
feuille1.write(ic+6,1,'Temperature issue de la simulation [C]',style0)
feuille1.write(ic+6,2,'Temps [h]',style0)

feuille1.write(ic+2,0,hyp[1,0],style1)
feuille1.write(ic+2,1,hyp[2,0],style1)
feuille1.write(ic+2,2,hyp[3,0],style1)
feuille1.write(ic+2,3,hyp[4,0],style1)
feuille1.write(ic+2,4,hyp[5,0],style1)
feuille1.write(ic+4,0,hyp[7,0],style1)
feuille1.write(ic+4,1,hyp[8,0],style1)

#
# Estimation de k par la restitution
#
r = 0.01
L = 10.0
Lt = L/H
rr = r/H

Liste = [50,70,90,110,130,140,150,160,170,180,190,210,230,250,270,290,310,330,350,370,
390,410,430,450,470,490]
zt = zeros([2,1000])
k2 = 0
e = 0
ip = 16
for j1 in Liste:
    ti = t_res[j1:n_res]
    Tf_res = Tf[n_inj:nt]
    y = Tf_res[j1:n_res]
    nte = len(y)
    gvect = vectorize(g_cable_chauffant_poly)
    def T_theo(tn, knew,Ti):
        aln = knew/CC*3600.0
        Fo = aln*tn/H**2
        Fo1 = aln*t1/H**2
        x = (gvect(Fo)-gvect(Fo-Fo1))/(2.0*pi)
        return Ti + qp*x/knew
    po = [ks1,To]
    params,resn = curve_fit(T_theo,ti,y,po)
    perr = sqrt(diag(resn))

    R11 = resn
    ksn = params[0]
    Tini = params[1]
    T_th = T_theo(ti,ksn,Tini)
    zt[0,k2] = ksn
    zt[1,k2] = Tini

    a = t_res.size
    b = ti.size
    feuille1.write(k2+ip,4,ksn,style1)
```

BIBLIOGRAPHIE

- Acuña, J., B. Palm. 2010. « A Novel Coaxial Borehole Heat Exchanger : Description and First Distributed Thermal Response Test Measurements ». In : *Proceedings of the world Geothermal Congress, Bali, Indonesia*, p. 7.
- Acuña, J., B. Palm. 2013. « Distributed thermal response tests on a pipe-in-pipe borehole heat exchangers ». *Applied Energy*, vol. 109, p. 312-320.
- Acuña, J., P. Mogensen et B. Palm. 2011. « Distributed thermal response tests on a multi-pipe coaxial borehole heat exchanger ». *HVAC et Research*, p. 1012-1029.
- Agence de L'efficacité énergétique. 2009. « Géothermie : Critères d'analyse et de sélection des systèmes ».
- ASHRAE. , 2003b. *ASHRAE Handbook - HVAC Applications*, book section 32.
- Austin III, W.A. 1998. « Development of an In Situ System for Measuring Ground Thermal Properties. Oklahoma State University, Oklahoma, USA ». *Master's thesis*.
- Banks, D. 2008. « An Introduction to Thermogeology : Ground Source Heating and Cooling ». UK : Blackwell.
- Beier, R.A., J. Acuña et P. Mogensen et B. Palm. 2012. « Vertical temperature profiles and borehole resistance in a U-tube borehole heat exchanger ». *Geothermics*, vol. 44, n° 0, p. 23-32.
- Bernier, M. A. 2006. « Closed-loop ground-coupled heat pump systems ». *Ashrae Journal*, vol. 48, n° 9, p. 12-+.
- Blomberg, T., J. Claesson et P. Eskilson et G. Hellström et B. Sanner. 2008. « EED 3.0 - Erath Energy Designer ». *User Manual. (Blocon.) Sweden*.
- Borinaga-Treviño, R., P. Pascual-Muñoz et D. Castro-Fresno et E. Blanco-Fernandez. 2013. « Borehole thermal response and thermal resistance of four different grouting materials measured with a TRT ». *Applied Thermal Engineering*, vol. 53, n° 1, p. 13-20.
- Borinaga-Treviño, Roque, J. Norambuena-Contreras et D. Castro-Fresno. 2015. « How to correct the ambient temperature influence on the thermal response test results ». *Applied Thermal Engineering*, vol. 82, n° 0, p. 39-47.
- Centre de la technologie de l'énergie de CANMET (CTEC), 2005. *Analyse de projets de pompes à chaleur géothermique*.
- Coalition canadienne de l'énergie géothermique. 2010. « État de l'industrie canadienne de la géothermie 2010 : Analyse du marché et enquête de l'industrie ».

- Coalition canadienne de l'énergie géothermique. 2011. « État de l'industrie canadienne de la géothermie 2011 ».
- Esen, H., M. Inalli et Y. Esen. 2009. « Temperature distributions in boreholes of a vertical ground-coupled heat pump system ». *Renewable Energy*, vol. 34, n° 12, p. 2672-2679.
- Eskilson, P. 1987. « Thermal analysis of heat extraction boreholes ». *Ph.D. Thesis. University of Lund, Lund, Sweden.*
- Farouki, O., 1981. *Thermal properties of soils*, p. 136.
- Fontaine, P.O. 2010. « Modélisation des systèmes géothermiques à boucles horizontales pour chauffer les bâtiments et prévenir la fonte pergélisol ».
- Fujii, H., H. Okubo et K. Nishi et R. Itoi et K. Ohyama et K. Shibata. 2009. « An improved thermal response test for U-tube ground heat exchanger based on optical fiber thermometers ». *Geothermics*, vol. 38, n° 4, p. 399-406.
- Fujii, H., H. Okubo et R. Itoi. 2006. « Thermal Response Tests Using Optical Fiber thermometers ». *GRC Transactions*, vol. 30, p. 545-551.
- Gehlin, S. 1998a. « Thermal response test ». *situ measurements of thermal properties in hard rock. Licentiate thesis, Lulea University of Technology, Sweden*, vol. 37, p. 1307–1320.
- Gehlin, S., G. Hellström. 2003. « Comparison of four models for thermal response test evaluation ». *A S H R A E Transactions*, vol. 109, p. 135–146.
- Gehlin, S., J.D. Spitler. 2002. « Thermal response test for BTES applications ». *State of the art 2001. In : Internal Report, International Energy Agency, Energy Conservation through Energy Storage, Annex13.*
- Geothermal Energy Association. 2012. « Geothermal Basics : QetA ».
- Glassley, W.E., 2014. *Direct use of Geothermal resources*, book section 11, p. 423.
- Hellström, G. 1991. « Ground Heat Storage - Thermal analyses of Duct Storage Systems ». *Ph.D. Thesis. University of Lund, Lund, Sweden.*
- Holtz, R.D., Kovacs, W.D. 1991. « Introduction à la géotechnique ». *Éditions de l'École polytechnique de Montréal*.
- Huber, H., U. Arslan. 2012. « Geothermal Field Tests with forced groundwaterflow ». *Stanford Geothermal Workshop*, p. 5.
- International Energy Agency. 2015. « Energy and Climate Change ». *World Energy Outlook*.
- Jinguuji, M., T. Takehara et T. Yamaguchi et S. Kunimatsu. 2002. « In-Situ Thermal Conductivity Exploration Using Penetrometer ». *Journal of the Geothermal Research Society of Japan*, vol. 24, n° 4, p. 349-356.

- Lamarche, L., B. Beauchamp. 2007. « A new contribution to the finite line-source model for geothermal boreholes ». *Energy and Buildings*, vol. 39, n° 2, p. 188-198.
- Lamarche, L., G. Dupré et S. Kajl. 2012. « A new design approach for ground source heat pumps based on hourly load simulations ».
- Lamarche, L., S. Kajl et B. Beauchamp. 2010. « A review of methods to evaluate borehole thermal resistances in geothermal heat-pump systems ». *Geothermics*, vol. 39, n° 2, p. 187-200.
- Langlois, A. 2010. « Pompes à chaleur géothermiques optimisant des banques thermiques à matériau à changement de phase ».
- Lanini, S., F. Delaleux et X. Py et R. Olivès et D. Nguyen. 2014. « Improvement of borehole thermal energy storage design based on experimental and modelling results ». *Energy and Buildings*, vol. 77, n° 0, p. 393-400.
- Lasdon, L.S., A.D. Waren et A. Jain et M. Ratner. 1978. « Design and testing of a generalized reduced gradient code for nonlinear programming ». *ACM Transactions on Mathematical Software*, vol. 4, p. 34-49.
- Le Dû, M., R. Marquis et J. Brossard et D. Rousse. 2012. « Analyse Thermo-economique d'une installation géothermique pour le secteur résidentiel selon l'implantation géographique ». *CONFREGÉ*.
- Lee, C., M. Park et S. Park et J. Won et H. Choi. 2013. « Back-analyses of in-situ thermal response test (TRT) for evaluating ground thermal conductivity ». *International Journal Of Energy Research*, , p. 1397-1404.
- Love, A.J., C.T. Simmons et D.A. Nield. 2007. « Double-diffusive convection in ground-water wells. ». *Water resources research*, vol. 43.
- Low, J.E., F.A. Loveridge et W. Powrie et D. Nicholson. 2014. « A comparison of laboratory and in situ methods to determine soil thermal conductivity for energy foundations and other ground heat exchanger applications ». *Acta geotechnica*.
- Luo, J., J. Rohn et M. Bayer et A. Priess et W. Xiang. 2014. « Analysis on performance of borehole heat exchanger in a layered subsurface ». *Applied Energy*, vol. 123, n° 0, p. 55-65.
- Marcotte, D. et P. Pasquier. 2008. « On the estimation of thermal resistance in borehole thermal conductivity test ». *Renewable Energy*, vol. 33, p. 2407-2415.
- Martos, J., À. Montero et J. Torres et J. Soret et G. Martínez et R. García-Olcina. 2011. « Novel wireless sensor system for dynamic characterization of borehole heat exchangers ». *Sensors 11*, p. 7082-7094.

- Mitchell, J.K. et T. Kao. 1978. « Measurements of soil thermal resistivity ». *J. Geotech. Engrg. Div.AJGEB6*, p. 1307–1320.
- Mogensen, P. 1983. « Fluid to duct wall heat transfer in duct system heat storages ». *Document-Swedish Council for Building Research*, , p. 652-657.
- Pehme, P.E., B.L. Parker et J.A. Cherry et J.W. Molson et J.P. Greenhouse. 2013. « Enhanced detection of hydraulically active fractures by temperature profilling in lines heates bedrock boreholes ». *Journal of Hydrology*.
- Philippe, M., M. Bernier. 2010. « Vertical Geothermal Borefields ».
- Radioti, G., R. Charlier et F. Nguyen et P. Radu. 2013. « Thermal Response Test in Borehole Heat Exchangers Equipped With Fibre Optics ». *International Workshop on Geomechanics and Energy*.
- Rancourt-Ouimet, M. 2012. « PERFORMANCES D'UN CHAMP DE PUITS GÉOTHERMIQUES VERTICAUX PEU PROFONDS EN BOUCLE FERMÉE ».
- Raymond, J. 2010. « Geothermal system optimization in mining environments ». *Département de géologie et de génie géologique*, vol. Philosophiae Doctor (PH. D.), p. 268.
- Raymond, J., L. Lamarche. 2014. « Development and numerical validation of a novel thermal response test with a low power source ». *Geothermics*, vol. 51, n° 0, p. 434-444.
- Raymond, J., L. Lamarche et M. Malo. 2014a. « Insights from field experiments to conduct thermal response tests with heating cables ». *DIVEX-GRREBS Geothermal Workshop*.
- Raymond, J., L. Lamarche et M. Malo. 2014b. « Insights from field experiments to conduct thermal response tests with a low power source ». *11 th IEA Heat Pump Conference*.
- Raymond, J. L. Lamarche et M. Malo. 2015. « Field demonstration of a first thermal response test with a low power source ». *Applied Energy*, vol. 147, n° 0, p. 30-39.
- Raymond, J., R. Therrien et L. Gosselin. 2011. « Borehole temperature evolution during thermal response tests ». *Geothermics*, vol. 40, n° 1, p. 69-78.
- Rohner, E., L. Rybach et U. Schärli. 2005. « A New, Small, Wirelless Instrument to Determine Ground Thermal Conductivity In-Situ for Borehole Heat Exchanger Design ». *Proceedings World Geothermal Congress*.
- Rousseau, P.G., C.G. Du Toit et W. Van Antwerpen et H.J. Van Antwerpen. 2014. « Separate effects tests to determine the effective thermal conductivity in the PBMR HTTU test facility ». *Nuclear Engineering and Design*, vol. 271, n° 0, p. 444-458.
- Ruiz-Calvo, F., C. Montagud. 2014. « Reference data sets for validating GSHP system models and analyzing performance parameters based on a five-year operation period ». *Geothermics*, vol. 51, n° 0, p. 417-428.

- Sailer, E., D.M.G. Taborda et J. Keirstead. 2015. « Assessment of Design Procedures for Vertical Borehole Heat Exchangers ». *PROCEEDINGS, Fortieth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*.
- Sanner, B., G. Hellström et J. Spitler et S. Gehlin. 2005. « Thermal Response Test - Current Status and World-Wide Application ».
- Soldo, V., L. Leposa et L. Boban et S. Borovic. 2015. « Implementation of the Distributed Thermal Response Test at Characteristic Geological Regions Throughout Croatia ». *Proceedings World Geothermal Congress*, p. 9.
- Srivastava, R., A. Guzman-Guzman. 1998. « Practical Approximations of the Well Function ». *Ground Water*, vol. 36, n° 5, p. 844-848.
- Swamee, P. K., C.S.P. Ojha. 1990. « Pump Test Analysis of Confined Aquifer ». *Journal of Irrigation and Drainage Engineering-Asce*, vol. 116, n° 1, p. 99-106.
- Talaboulma, T. A. 2013. « Test de réponse thermique (TRT) par câbles chauffants dans un échangeur de chaleur géothermique à expansion directe (DX) ». *Génie mécanique*, vol. Maîtrise en Ingénierie, p. 135.
- Tanguay, D. 2014. « La contribution de la géothermie basse température et autres technologies connexes dans la gestion de l'offre et de la demande d'énergie dans les trois territoires du Nord ».
- Waples, D., J. Waples. 2004. « A review and evaluation of specific heat capacities of rocks, minerals, and subsurface fluids. Part 1 : Minerals and nonporous rocks ». *Natural resources research*, vol. 13, n° 2, p. 187-200.
- Witte, H.J.L. 2013. « Error analysis of thermal response tests ». *Applied Energy*, vol. 109, p. 302-311.
- Witte, H.J.L., G.J. Van Gelder et J.D. Spitler. 2002. « In situ measurement of ground thermal conductivity : the Dutch perspective ». *ASHRAE Transactions*, p. 135-146.
- Zhang, S., Y. Yu. 2011. « Thermal conductivity test and coupling Simulation of heat-transfer in Fracture rock ». *Advanced Materials Research*, vol. 382, p. 3-6.